

Ludo Van Caenegem, Alina Soltermann-Pasca und Matthias Schick

Energiesparpotenzial durch CO₂-gesteuerte Luftrate in Abferkelställen

Die Lüftung verursacht in Abferkelställen bei sehr guter Wärmedämmung bis zu 90 % der gesamten Wärmeverluste. Indem die in Echtzeit gemessene CO₂-Konzentration für die Steuerung der Lüfterdrehzahl verwendet wird, lässt sich die Luftrate automatisch und kontinuierlich dem wirklichen Bedarf anpassen. Dies trifft jedoch, wie Versuche an der ART zeigen, nur dann zu, wenn die CO₂-Messungen in kurzen Zeitintervallen durchgeführt werden und die Lüfterregelung angemessen erfolgt. Der Sollwert der CO₂-Konzentration soll sich nach der NH₃-Konzentration im Stall richten. Das theoretische Energiesparpotenzial durch eine CO₂-gesteuerte Luftrate ist beträchtlich.

Schlüsselwörter

Energie, Lüftung, CO₂-Messung, Lüfterregelung

Keywords

Energy, ventilation, CO₂-measurement, fan regulation

Abstract

Van Caenegem, Ludo; Soltermann-Pasca, Alina and Schick, Matthias

Potential energy savings through CO₂-controlled ventilation in farrowing houses

Landtechnik 65 (2010), no. 6, pp. 410-413, 6 figures, 2 references

In farrowing houses with very good thermal insulation the ventilation causes up to 90% of the total heat losses. Using real-time CO₂ measurements to control the fan speed, the ventilation rate can be automatically and continuously adapted to the real needs of the animals. However, according to tests conducted at ART, this only works if CO₂ is measured in short time intervals and if the fan is adjusted accordingly. The set point of the CO₂ concentration has to be aligned with the NH₃ concentration in the building. The potential energy savings through CO₂-controlled ventilation are substantial.

■ Die neue Norm 380/1 [1] des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) legt eine sehr gute Wärmedämmung von Abferkelställen fest. Werden diese Vorgaben eingehalten, geht die meiste Wärme über die Lüftung verloren, sodass Einsparungen hier zu den einfachsten Maßnahmen gehören, um Heizenergie zu sparen. In der Praxis stimmt die Luftrate selten mit dem aktuellen Frischluftbedarf der Tiere überein. Der Hauptgrund liegt in den großen Schwankungen des Frischluftbedarfs, denn dieser hängt nicht nur vom Tierbestand und den -leistungen ab, sondern auch von der Tieraktivität, die sich im Tagesverlauf erheblich ändert. Eine bedarfsgerechte Lüftung erfordert deshalb eine ständige Anpassung der Luftrate.

Versuchsaufbau

Im Versuchsstall der Forschungsanstalt ART wurde in einer der beiden vorhandenen Abferkelkammern der Einfluss einer CO₂-gesteuerten Lüftung auf den Tagesverlauf der CO₂-Konzentration und den Energiebedarf für die Raumheizung untersucht.

Die Kammer umfasst acht Abferkelbuchten (FAT2-Typ) mit isolierten und temperaturgesteuerten Ferkelnestern. Sie wurde im Gleichdruck gelüftet (zwei Lüfter ETavent FC040-4IQ.4C.3). Die Frischluft wurde aus einem Erdwärmetauscher bezogen. Die Lüftersteuerung basierte auf Temperatur und CO₂-Konzentration (VengSystem). Neben der Stalltemperatur und der CO₂-Konzentration wurden die Temperatur der Außen- und Zuluft, die Luftgeschwindigkeit im Zuluftkanal, die relative Feuchtigkeit der Zu- und Stallluft, die NH₃-Konzentration im Stall sowie der Energiebedarf der Lüfter, der Ferkelnest- und der Raumheizung erfasst. Die CO₂- und NH₃-Messung erfolgte durch einen Multisensor mit Vorwärmung (VE 18). Die Luftproben

wurden über einen Filter abwechselnd aus beiden Kammern und von außen angesaugt. Durch die Spülung mit Außenluft nach jeder Beprobung der Stallluft sollte verhindert werden, dass der NH_3 -Sensor gesättigt wird. Die Genauigkeit der CO_2 - und NH_3 -Messungen wurde in regelmäßigen Zeitabständen mit Dräger-Röhrchen überprüft. Die Luftrate wurde aus der Luftgeschwindigkeit im Zuluftkanal abgeleitet. Sämtliche Elemente waren über ein BUS-System mit dem Klimacomputer (VE 108) und dem PC verbunden.

Versuchsergebnisse

Die Daten wurden vom 01.10.2009 bis 10.02.2010 in 30-Minuten-Intervallen gespeichert. Da die Schwankungen diverser Parameter in diesem Zeitabstand nur ein unvollständiges Bild abgaben, wurde für den weiteren Verlauf das Intervall auf fünf Minuten verkürzt. Während des Versuchs betrug der Sollwert der Stalltemperatur 18°C , der Anfangstemperatur der Heizung 17°C und der CO_2 -Konzentration 1 600 ppm.

CO_2 -Produktion im Tagesverlauf

Aus der Luftrate (V_L), der CO_2 -Konzentration im Stall ($[\text{CO}_2]_i$) der Außenluft ($[\text{CO}_2]_a$) und der Luftdichte (ρ) kann unter gleichbleibenden Bedingungen die CO_2 -Abgabe der Tiere (V_{CO_2}) in Normkubikmetern pro Stunde berechnet werden [2] (**Gleichung 1**).

$$V_{\text{CO}_2} = V_L \cdot ([\text{CO}_2]_i - [\text{CO}_2]_a) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1.29}{\rho} \quad (\text{Gl. 1})$$

Da jedoch im Stall keine gleichbleibenden Bedingungen herrschen, sondern die Luftrate aufgrund der CO_2 -Steuerung dauernd schwankt, muss das Stallvolumen (vol) mit einbezogen werden. Die CO_2 -Abgabe der Tiere in der Zeitspanne Δt errechnet sich aus der Differenz der CO_2 -Konzentration zwischen der momentanen Periode ($[\text{CO}_2]_i$) und der vorangehenden Periode ($[\text{CO}_2]_{i-1}$) in Norm- m^3/h (**Gleichung 2**).

$$V_{\text{CO}_2} = V_L \cdot ([\text{CO}_2]_i - [\text{CO}_2]_a) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1.29}{\rho} + \frac{[\text{CO}_2]_i - [\text{CO}_2]_{i-1} \cdot vol \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1.29}{\rho}}{\Delta t} \quad (\text{Gl. 2})$$

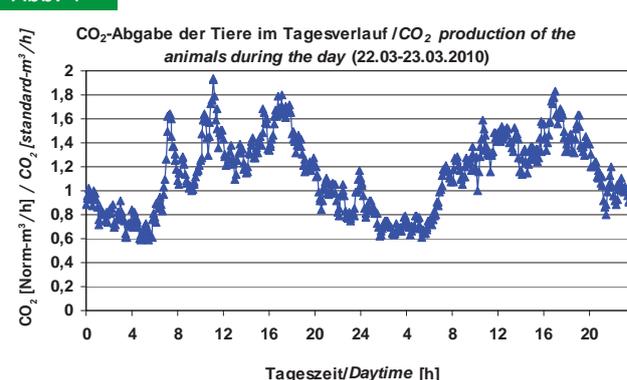
Die aus der CO_2 -Konzentration und Luftrate nach **Gleichung 2** berechnete CO_2 -Abgabe der Tiere zeigt sehr große Schwankungen im Tagesverlauf (**Abbildung 1**). Die Unterschiede zwischen Maximal- und Minimalwert betragen mehr als 300%. Der Verlauf der CO_2 -Abgabe ist tagsspezifisch. Das Verhältnis zwischen Maximal- und Minimalwert ist jedoch an jedem Tag in etwa gleich. Die mittlere freigesetzte CO_2 -Menge pro Stunde ist in der Periode 07.04.2010 bis 18.04.2010 während der Nacht (20:00–6:00 Uhr) etwa 30% geringer als am Tag (6:00–20:00 Uhr). In dieser Periode befanden sich acht Mutterschweine mit 78 Ferkeln im Stall.

CO_2 -Konzentration und NH_3 -Konzentration

Nach schweizerischer Stallklimanorm [2] beträgt der Grenzwert der CO_2 -Konzentration 3 000 ppm. Da erfahrungsgemäß bei dieser CO_2 -Konzentration der Grenzwert der NH_3 -Konzentration (20 ppm) in den meisten Ställen nicht eingehalten werden kann, empfiehlt die Norm für den Tagesmittelwert der CO_2 -Konzentration einen Höchstwert von lediglich 2 000 ppm. Während eines kurzen Vorversuchs mit einer CO_2 -Konzentration von 2 000 ppm lag die NH_3 -Konzentration kurz vor dem Absetzen der Ferkel zeitweise über 15 ppm. Wegen der relativ hohen NH_3 -Konzentration wurde der Sollwert der CO_2 -Konzentration während des Versuchs auf 1 600 ppm festgelegt. Hierdurch wurde auch sichergestellt, dass die Lüfterregelung stets nach der CO_2 -Konzentration und nicht nach der Stalltemperatur erfolgte.

Die CO_2 -Steuerung des Lüfters hat zur Folge, dass die Luftrate während der Ruhephasen der Tiere drastisch gesenkt wird. Die Befürchtung, dass hierdurch die Ammoniakkonzentration in der Stallluft stark ansteigen könnte, hat sich als unbegründet erwiesen (**Abbildung 2**).

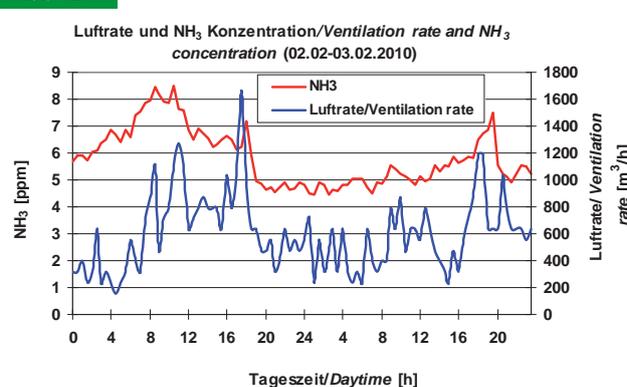
Abb. 1



Die CO_2 -Abgabe der Tiere zeigt sehr große Schwankungen im Tagesverlauf

Fig. 1: The CO_2 -production of the animals is changing strongly during the day

Abb. 2



Die NH_3 -Konzentration ist während der Ruhephase tendenziell geringer - ungeachtet der stark reduzierten Luftrate

Fig. 2: The NH_3 concentration has the tendency to decrease during the resting phase despite the strongly reduced ventilation rate

Messfrequenz und Gleichmäßigkeit CO₂-Konzentration

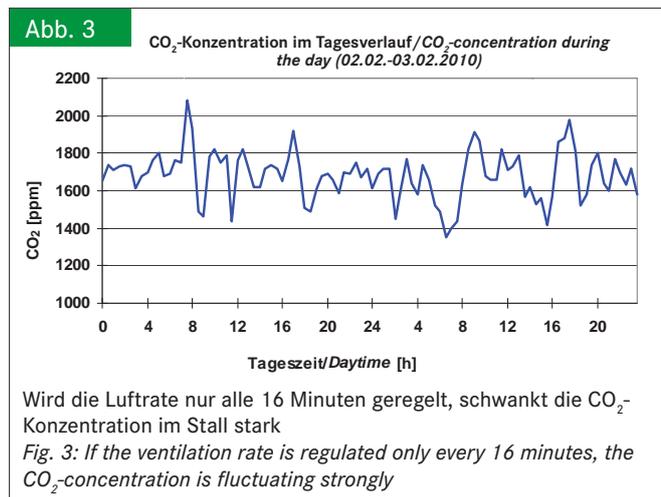
Für eine konstante CO₂-Konzentration ist es erforderlich, dass der Lüfter schnell und angemessen auf Änderungen der CO₂-Abgabe reagiert. In der Praxis sind Schwankungen der CO₂-Konzentration nicht vollständig zu vermeiden, denn die Tiere ändern ihre CO₂-Produktion in sehr kurzen Zeitspannen stark. Die Korrektur der Lüfterdrehzahl ist stets verzögert, da sie auf der CO₂-Konzentration des vorangegangenen Zeitabschnitts basiert. Eine Erhöhung der CO₂-Abgabe der Tiere wirkt sich auf Grund der Pufferwirkung des Stallvolumens außerdem nur langsam auf den Anstieg der CO₂-Konzentration im Stall aus. Aus diesen Gründen kommt es oft vor, dass die Luftrate erst dann geändert wird, wenn die CO₂-Abgabe schon am Abklingen ist oder umgekehrt.

Hieraus folgt, dass die Schwankungen der CO₂-Konzentration nur wirksam bekämpft werden können, wenn die CO₂-Messungen und Lüfteranpassungen in sehr kurzen Zeitintervallen erfolgen. Wird das CO₂-Messgerät für die Messung der Konzentration in verschiedenen Stallabteilen genutzt, ergeben sich lange Intervallzeiten. Dies war während der ersten Versuchsperiode (01.10. 2009 bis 10.01.2010) der Fall. Das Messintervall betrug in dieser Periode wegen der langen Spülzeiten für den NH₃-Sensor 16 Minuten. Die niedrige Messfrequenz spiegelt sich wider in den relativ großen Abweichungen der CO₂-Konzentration vom Sollwert (1 600 ppm; **Abbildung 3**).

Sie betragen im Durchschnitt 126 ppm. Der Unterschied zwischen Maximal- und Minimalwert beträgt 730 ppm. Nachdem für die Versuchskammer ein separater CO₂-Messapparat installiert worden war, konnte das Messintervall auf 45 Sekunden reduziert werden. Die Angleichung der CO₂-Konzentration um den Sollwert von 1 600 ppm gelang deutlich besser (**Abbildung 4**). Die mittlere Abweichung vom Sollwert beträgt nur noch 53 ppm, der Unterschied zwischen Maximal- und Minimalwert 500 ppm.

Lüftersteuerung und Gleichmäßigkeit CO₂-Konzentration

Damit Schwankungen sehr gering bleiben, ist nicht nur ein kurzes Messintervall notwendig, sondern es muss auch die Lüfterdrehzahl und folglich die Luftrate an die registrierte



Abweichung der CO₂-Konzentration angepasst werden. Modellrechnungen zeigen: je kürzer das Messintervall ist, desto größer kann die Drehzahländerung nach jeder Messung sein. Die Luftratenänderung ($V_{L,i} - V_{L,i-1}$) erfolgt proportional zur Abweichung der CO₂-Konzentration vom Sollwert ($[CO_2]_i - [CO_2]_{soll}$) (**Gleichung 3**). Der optimale Proportionalitätsfaktor, auch Integrationskonstante genannt (a), hängt außer der Messzeit vom Raumvolumen ab.

$$V_{L,i} = V_{L,i-1} \cdot \left(1 + a \cdot \frac{[CO_2]_i - [CO_2]_{soll}}{[CO_2]_{soll}}\right) \quad (\text{Gl. 3})$$

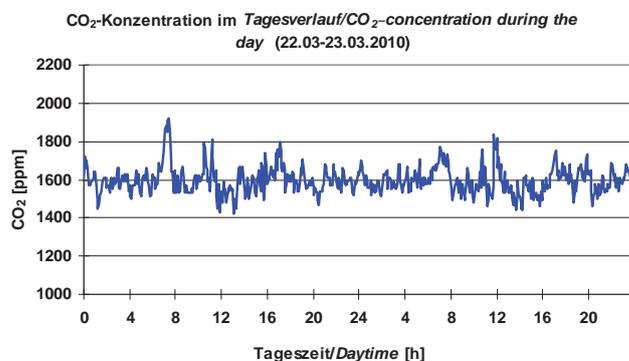
Die Integrationskonstante (a) soll möglichst groß sein, darf jedoch einen gewissen Wert nicht überschreiten, um eine Überreaktion des Lüfters zu vermeiden. Reagiert der Lüfter zu stark, kann die Steuerung ins Schwingen geraten. Der ideale Wert für jeden Stall kann nur durch Versuche ermittelt werden.

Im ART-Abferkelstall sind die berechneten Abweichungen der CO₂-Konzentration für den Verlauf der CO₂-Abgabe am 22.03.2010 minimal, wenn die Integrationskonstante (a) 25 beträgt. Der Unterschied zwischen Maximal- und Minimalwert beträgt dann nur noch 116 ppm (**Abbildung 5**). Wegen der Gefahr der Überreaktion des Lüfters wird man unter Praxisbedingungen einen kleineren Wert für a wählen und größere Abweichungen vom [CO₂]-Sollwert in Kauf nehmen müssen.

Energiesparpotenzial der CO₂-gesteuerten Lüftung

Die Aktivität der Tiere ist nachts am geringsten. Wird die Luftrate nicht drastisch abgesenkt, steigt der Heizbedarf in dieser Zeit bei tiefen Außentemperaturen wegen der geringeren fühlbaren Wärmeabgabe der Tiere stark an. Dies ist bei herkömmlichen Lüftungsanlagen der Fall, denn ihre minimale Lüfterdrehzahl variiert nicht im Tagesverlauf, sondern wird höchstens von Tag zu Tag dem sich ändernden Tierbestand automatisch oder von Hand angepasst.

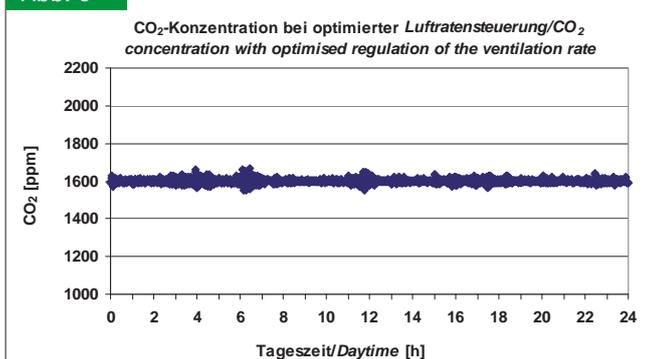
Abb. 4



Eine häufigere Anpassung der Luftrate (45-Sekunden-Intervall) führt zu besserer Angleichung der CO₂-Konzentration an den Sollwert (1 600 ppm)

Fig. 4: More frequently adjusting the ventilation rate (interval 45 seconds) leads to a better approximation of the CO₂-concentration to the set point (1 600 ppm)

Abb. 5



Bei optimaler Lüfterregelung würde der Unterschied zwischen maximaler und minimaler CO₂-Konzentration am 22.03.2010 nur noch 116 ppm betragen

Fig. 5: In case of optimal regulation of the ventilation rate the difference between the maximum and the minimum CO₂-concentration would only be 116 ppm (22.03.2010)

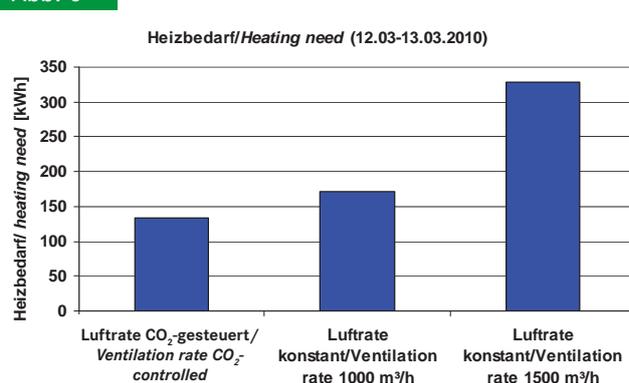
Wenn die minimale Lüfterrate aber nicht mehr ein fest eingestellter Wert ist, sondern von der CO₂-Konzentration abhängt, lässt sich der Heizbedarf theoretisch senken. Wieviel Energie durch die CO₂-Steuerung der Lüfterrate unter Praxisbedingungen gegenüber einer konventionellen Lüftung (temperaturgesteuert) eingespart wird, ist stark betriebsspezifisch. Die Energieeinsparung hängt davon ab, wie hoch die konstant eingestellte minimale Lüfterrate und folglich die Ansprüche an die Luftqualität bei der konventionellen Lüftung sind. Weiter spielt eine wichtige Rolle, wie regelmäßig die minimale Lüfterrate bei der konventionellen Lüftung dem sich ändernden Tierbestand angepasst wird.

In der Versuchskammer mit CO₂-gesteuerter Lüftung betrug am 12./13.03.2010 der Heizbedarf 134 kWh. Wäre die Lüfterrate nicht CO₂-gesteuert worden, sondern wäre konstant Tag und Nacht auf 1000 m³/h eingestellt gewesen, würde der Heizbedarf theoretisch 171 kWh betragen (**Abbildung 6**). Bei einer Lüfterrate von 1500 m³/h müsste man mit 329 kWh rechnen. Bei einer konstanten Lüfterrate von 1000 m³/h wird der CO₂-Sollwert während 42% des Untersuchungszeitraumes überschritten. Die maximale CO₂-Konzentration beträgt 169% des Sollwerts. Bei 1500 m³/h ist die zeitliche Überschreitung auf 6% beschränkt. Die maximale CO₂-Konzentration beträgt 121% des Sollwerts. In der Periode Oktober 2009 bis März 2010 betrug die Energieeinsparung für die Raumheizung in der Versuchskammer mit CO₂-gesteuerter Lüftung gegenüber der Kammer mit herkömmlich temperaturgesteuerter Lüftung 40% (2160 kWh).

Schlussfolgerungen

Die Lüftung verursacht in Abferkelställen mit sehr guter Wärmedämmung bis zu 90% der gesamten Wärmeverluste. Folglich besteht die erste Maßnahme zur Senkung des Heizbedarfs darin, überflüssige Lüftung zu vermeiden. Durch CO₂-Steuerung der Lüfter lässt sich theoretisch die Lüfterrate ständig dem momentanen Bedarf der Tiere anpassen. Wie genau sich die

Abb. 6



Heizbedarf bei einer variablen minimalen Lüfterrate (CO₂-gesteuert) im Vergleich zu einer konstanten minimalen Lüfterrate von 1000 oder 1500 m³/h

Fig. 6: Heating demand with a variable minimal ventilation rate (CO₂-controlled) compared to a constant minimal ventilation rate of 1000 or 1500 m³/h

Lüfterrate durch eine solche Steuerung dem Soll-Wert der CO₂-Konzentration angleichen lässt und welche Energie-Einsparung hierdurch möglich ist, wurde an der ART in einem Abferkelstall untersucht.

Wegen der sich schnell ändernden CO₂-Abgabe der Tiere und der verzögerten Reaktion des Lüfters sowie auch der Pufferwirkung des Stallluftvolumens können Schwankungen bei der CO₂-Konzentration nur wirksam bekämpft werden, wenn die CO₂-Messungen und Lüfteranpassungen in sehr kurzen Zeitintervallen erfolgen. Außerdem hat die Lüftersteuerung angemessen zu verlaufen. Der Integrationsfaktor, der zusammen mit der Abweichung der CO₂-Konzentration vom Sollwert die Lüfteranpassung bestimmt, soll möglichst groß sein, darf jedoch nicht zur Überreaktion des Lüfters führen.

Die mögliche Energieeinsparung bei CO₂-Steuerung der Lüfterrate ist gegenüber der konventionellen Lüftung umso größer, je höher die Ansprüche bezüglich einer bedarfsgerechten Lüftung sind. Während des Versuchs (Oktober 2009 bis März 2010) konnten bei der Raumheizung 40% Energie eingespart werden. Die Befürchtung, dass durch die starke Reduktion der Lüfterrate während der Ruhephasen der Tiere die Ammoniakkonzentration in der Stallluft stark ansteigen könnte, hat sich als unbegründet erwiesen.

Literatur

- [1] SIA-Norm 380/1 (2009): Thermische Energie im Hochbau. (SIA = Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein)
- [2] Van Caenegem, L.; Wechsler, B. (2000): Stallklimawerte und ihre Berechnung. FAT-Schriftenreihe Nr. 51, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen

Autoren

Dipl. Ing. Ludo Van Caenegem ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsgruppe Bau, Tier und Arbeit (Leiter: **PD Dr. habil. Matthias Schick**) der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Ettenhausen, E-Mail: ludo.vancaenegem@art.admin.ch

Dipl. Ing. Alina Soltermann-Pasca ist Doktorandin in dieser Forschungsgruppe, E-Mail: alina.pasca@art.admin.ch