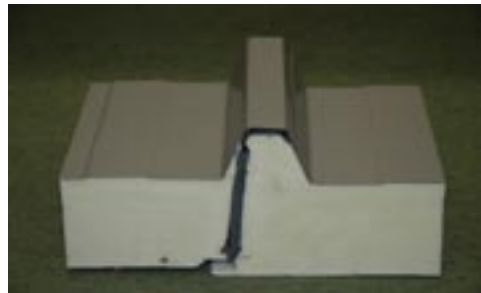


Energiebedarf bei Heizung und Lüftung mehr als halbieren

Energiesparen im Stall ist nicht nur ökologisch, sondern auch wirtschaftlich sinnvoll

Oktober 2010



Autoren

Ludo Van Caenegem, Gallus Jöhl, Markus Sax, Alina Soltermann, ART

Impressum

Herausgeber:
Forschungsanstalt Agroscope
Reckenholz-Tänikon ART
Tänikon, CH-8356 Ettenhausen,
Redaktion: Etel Keller, ART

Die ART-Berichte/Rapports ART erscheinen in rund 20 Nummern pro Jahr. Jahresabonnement Fr. 60.–. Bestellung von Abonnements und Einzelnummern: ART, Bibliothek, 8356 Ettenhausen
T +41 (0)52 368 31 31
F +41 (0)52 365 11 90
doku@art.admin.ch
Downloads: www.agroscope.ch

ISSN 1661-7568

Abb. 1: Mit Wärmedämmung, CO₂-gesteuerter Lüftung, Erdwärmenutzung und Wärmerückgewinnung lässt sich der Heizenergiebedarf drastisch reduzieren.

Der Jahresenergiebedarf in Schweineställen wird auf 90 Millionen Kilowattstunden für die Heizung und 40 Millionen Kilowattstunden für die Lüftung geschätzt. Modellrechnungen und praktische Versuche an der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART zeigen, dass sich der Energiebedarf durch verschiedene Massnahmen drastisch reduzieren lässt.

Untersucht wurde das Energiesparpotenzial von Wärmedämmung, Lüftungsregelung, Erdwärmenutzung und Wärmerückgewinnung aus der Abluft in Schweine- und Geflügelmastställen.

Da die Lüftung für den Hauptteil der Wärmeverluste verantwortlich ist, hat sie ein grösseres Energiesparpotenzial als die



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches
Volkswirtschaftsdepartement EVD
Forschungsanstalt
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Wärmedämmung. Dies bedeutet jedoch nicht, dass bei Neubauten auf eine sehr gute Wärmedämmung verzichtet werden soll. Diese ist bei richtiger Bauweise mit geringen Mehrkosten verbunden. Die einfachste Energiesparmassnahme besteht darin, nicht mehr zu lüften als notwendig ist. Versuche zeigen, dass durch eine gut eingestellte CO₂-Steuerung die Lüftrate ständig dem momentanen Bedarf angepasst werden kann. Weitere bedeutende Energiesparmassnahmen sind möglich durch Nutzung von Erdwärme und Wärmerückgewinnung aus der Abluft. Mit der Wärmerückgewinnung lässt sich der Heizbedarf am meisten reduzieren. Die eingesparte Ener-

giemenge hängt jedoch sehr stark vom thermischen Wirkungsgrad des Wärmetauschers unter Praxisbedingungen ab. Ausserdem nimmt der Strombedarf für die Lüfter wegen des höheren Luftwiderstands zu. Es sollten deshalb bei Wärmetauschern nur energieeffiziente Lüftersteuerungen eingesetzt werden.

Energiesparmassnahmen sind nur wirtschaftlich, wenn die dafür notwendigen Investitionen innerhalb der zu erwartenden Lebensdauer abgeschrieben werden können. Dies bedingt, dass durch richtige Dimensionierung, Ausführung und Handhabung das theoretische Energiesparpotenzial auch ausgeschöpft wird.

Problemstellung

Der Energiebedarf für Stalllüfter, die ganztägig in Betrieb sind, und Heizungen, die in Ställen mit hohen erforderlichen Lufttemperaturen über längeren Zeiten eingeschaltet sind, ist auf vielen Betrieben unnötig hoch. Steigen die Energiepreise weiter an, könnte die Energierechnung auf solchen Betrieben teuer werden. Man sollte es deshalb nicht so weit kommen lassen, sondern jetzt schon Massnahmen zur Senkung des Energiebedarfs ergreifen. Da die energiesparenden Massnahmen mit erheblichen Investitionen verbunden sind, ist es wichtig zu wissen, in welcher Zeit sich diese zurückzahlen lassen, damit die am erfolgversprechendsten ausgewählt werden können.

Der Bericht vergleicht verschiedene Massnahmen zur Senkung des Energiebedarfs mittels Modellrechnungen und stellt die Ergebnisse von praktischen Versuchen dar. Für die Modellrechnungen wurde eine eigene dynamische Methode entwickelt, die es erlaubt, den Jahresenergiebedarf unter praxisnahen Bedingungen zu ermitteln. Die eigene Berechnungsweise war notwendig, da die Methode des Energienachweises nach der SIA Norm 380/1 [1] sich aus verschiedenen Gründen nicht auf Stallgebäude anwenden lässt. Sowohl die Raumtemperatur als auch die Lüftrate ist in Stallgebäuden nicht konstant, sondern tierabhängig. Die fühlbare und latente Wärmeabgabe der Tiere – sie selbst auch von der Stalltemperatur abhängig – beeinflusst wesentlich die Energiebilanz. Weiter müssen die für jeden Stalltypen praxisüblichen Belegungszyklen berücksichtigt werden.

Die Sollwerte für Temperatur und relative Feuchtigkeit sowie auch die Grenzwerte der Gaskonzentrationen wurden nach international anerkannten Empfehlungen festgelegt [2, 3]. Neben dem Heizbedarf wurde auch der Strombedarf für die Stallventilatoren berechnet. Da zur Berechnung des Energiesparpotenzials der CO₂-gesteuerten Lüftung Grundlagen fehlten, wurde ein praktischer Versuch im Abferkelstall der ART zur Abklärung der Genauigkeit der Lüftratenanpassung durchgeführt. Der beste Anreiz für die freiwillige Umsetzung von Energiesparmassnahmen ist das wirtschaftliche Interesse. Deshalb durfte eine begleitende wirtschaftliche Betrachtung nicht fehlen.

Modellrechnungen

Energiesparmassnahmen

Mit den Simulationsmodellen wurde der ganzjährige Energiebedarf für verschiedene Varianten hinsichtlich Wärmedämmung (I), Erdwärmenutzung (II) und Wärmerückgewinnung (III) berechnet. Untersucht wurden fünf in der Praxis verbreitete Stalltypen mit Heizbedarf: Abferkelstall (16 Abferkelbuchten), Ferkelaufzuchtstall (480 Ferkel), Schweinevormaststall (200 Schweine), Schweine-Endmaststall (200 Schweine), Geflügelmaststall (12000 Hühner; Abb. 2, Tab. 1).

Tab. 1: Abmessungen der untersuchten Ställe.

	Fläche			Länge
	Wand	Dach	Fenster/ Türe	Perimeter
	m ²	m ²	m ²	m
Abferkelstall ABF	134	188	17	61
Ferkelaufzuchtstall FA	155	293	27	76
Vormaststall VM	157	232	29	73
Endmaststall EM	199	313	29	79
Geflügelmaststall PM	623	979	89	159

Bei der Wärmedämmung der Wände und des Dachs wurden drei U-Werte untersucht: 0,56 W/m²K, 0,30 W/m²K und 0,20 W/m²K. Die Wärmedurchgangszahlen (U) entsprechen 4, 8 und 12 cm Polyurethan (PUR) und sind als Sandwichpaneel im Handel erhältlich. Bei den Fenstern und Türen wurde für alle Varianten von einem U-Wert von 2,5 W/m²K ausgegangen. Beim Perimeter beträgt der lineare U-Wert 0,8 W/mK [4].

Die Berechnungen der Erdwärmenutzung beruhen auf Zulufttemperaturen, die in früheren Versuchen bei einem Rippenrohr-Erdwärmetauscher mit einem thermischen Wirkungsgrad von 70 % im Winter und 50 % im Sommer aufgezeichnet wurden [5]. Der zusätzliche Luftwiderstand im Erdwärmetauscher wurde mit 30 Pa bei maximaler Lüftrate angenommen. Beim Abferkelstall mit relativ geringer Tierdichte lässt sich etwa die gleiche Erwärmung der Zuluft im Winter erreichen, wenn die Luft aus dem Hohlraum unter dem Stall bezogen wird [6]. Bei den anderen Stalltypen steht jedoch unter dem Stall zu wenig Wärmetauscherfläche mit dem Erdreich im Verhältnis zur Tiermasse zur Verfügung.

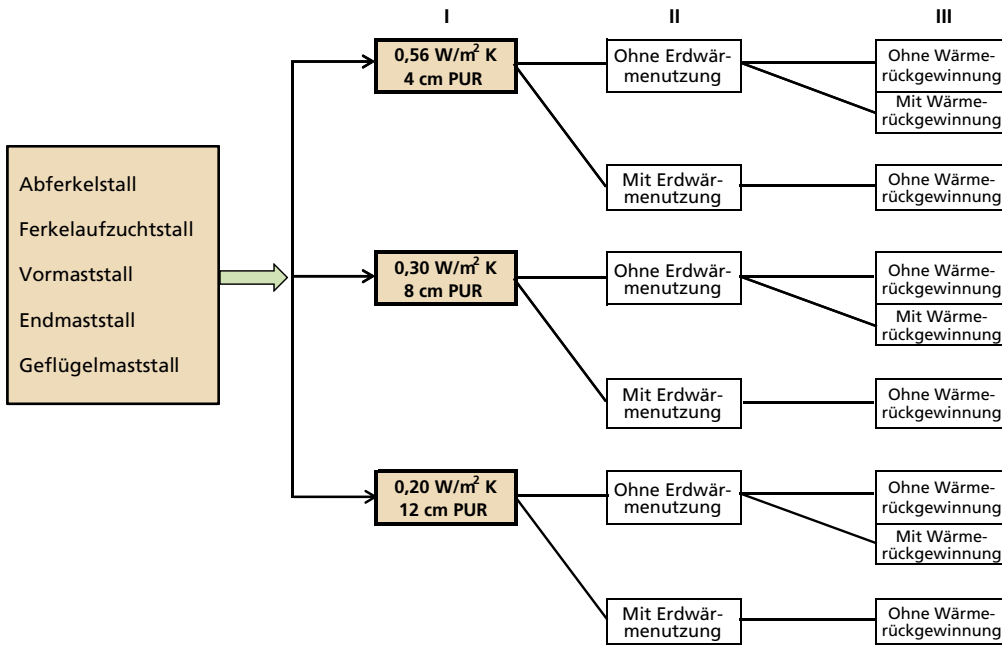


Abb. 2: Ausgeführte Modellrechnungen für verschiedene Stalltypen und Energiesparmassnahmen.

Bei der Wärmerückgewinnung wird in einem Gegenstrom-Wärmetauscher die Abluft aus dem Stall gekühlt und die Zuluft von aussen erwärmt. Kühlt die Abluft bis unter den Taupunkt ab, wird Wasser ausgeschieden. Dank der dabei freigesetzten Kondensationswärme kann der thermische Wirkungsgrad des Wärmetauschers theoretisch mehr als 70 % betragen. Wegen Verschmutzung, Undichtigkeiten von Kanälen und ungenauer Klappensteuerung erreicht man unter Praxisbedingungen diesen Wert jedoch bei weitem nicht. Bei den Modellrechnungen wurde von einem Wirkungsgrad von 50 % ausgegangen. Der durch den Wärmetauscher verursachte Luftwiderstand wurde mit 100 Pa bei einer maximalen Luftrate von 40 % angenommen. Bei einer höheren Luftrate wird der Wärmetauscher auf der Zu- und Abluftseite kurzgeschlossen, indem die Frischluft direkt von aussen bezogen und die Abluft durch ein separates Kamin hinausbefördert wird. Ist der Wärmetauscher ausser Betrieb, reduziert sich der gesamte Luftwiderstand wie für die Variante ohne Wärmetauscher auf 90Pa bei einer Luftrate von 100 %.

Energiebilanzrechnung

Der Heizenergiebedarf berechnet sich aus der Energiebilanz. In der Energiebilanz werden die Wärmeproduktion der Tiere und die Heizenergie den Wärmeverlusten durch die Bauhülle und den Luftwechsel gegenübergestellt (Abb. 3). Die Luftrate muss drei Bedingungen erfüllen: die CO₂-Konzentration darf 2000 ppm (0,2 Vol.-%) nicht übersteigen, die relative Feuchtigkeit (%) muss geringer als «90 minus Stalltemperatur» sein und die Stalltemperatur darf den maximal zulässigen Wert nach Tabelle 2 nicht übersteigen. Wird die maximal zulässige Stalltemperatur überschritten, schaltet die Lüftung auf 100 % der maximal verfügbaren Kapazität. Für die Temperatur und relative Feuchtigkeit der Aussenluft wurden Zeitreihen im Halbstundentakt verwendet, die während eines früheren Versuchs in Buckten (2005–2006) aufgezeichnet wurden. Der Energiebedarf für die Heizung und Lüftung wurde für jede halbe Stunde berechnet. Die Summe der Teilberechnungen ergibt den Energiebedarf pro Jahr für jeden Stalltypen und jede Ausführungsvariante.

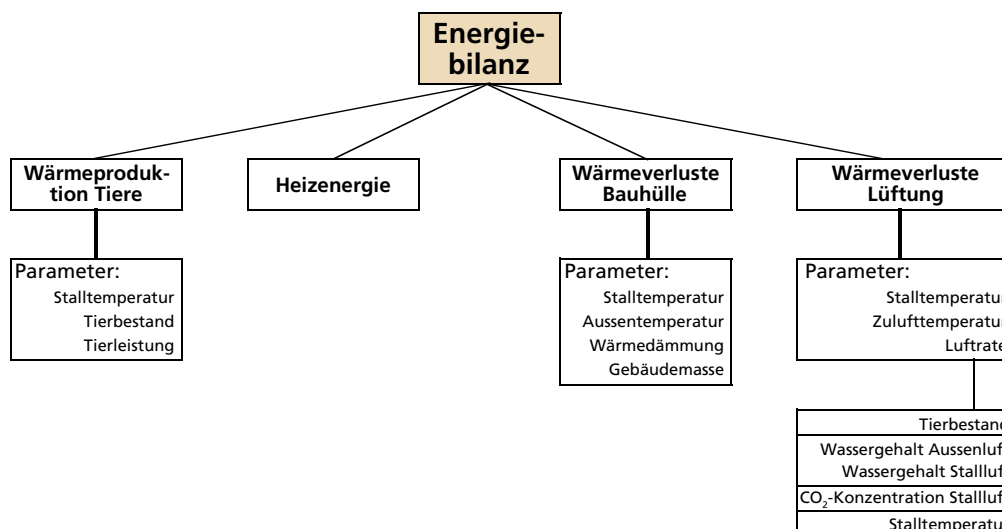


Abb. 3: Einflussparameter zur Berechnung der Energiebilanz.

Tab. 2: Grenzwerte der Stalltemperatur, relativen Feuchtigkeit, CO₂-Konzentration und Luftrate für die Modellrechnungen der untersuchten Stalltypen.

	Abferkelstall (16)	Ferkelaufzuchtstall (480)	Vormaststall (200)	Endmaststall (200)	Pouletmaststall (12000)
Minimale Stalltemperatur (°C)	Stall: 18 Ferkelstall 34 > 26	26 > 20 abfallend mit zunehmendem Alter	18	16	34 > 20 abfallend mit zunehmendem Alter
Maximal zulässige Stalltemperatur (°C) *	22	26	22	22	–
Maximal zulässige relative Feuchtigkeit (%)	90 – Stalltemperatur	90 – Stalltemperatur	90 – Stalltemperatur	90 – Stalltemperatur	90 – Stalltemperatur
Maximal zulässige CO ₂ -Konzentration (ppm)	2000	2000	2000	2000	2000
Tiergewicht (Mittelwert) (kg)	Sau: 250 Ferkel: 1.5 > 8	8 > 25	40	80	0.04 > 2.2
Maximale Luftrate (m ³ / Tier u. h)	375	40	50	90	8.33

* Ab dieser Temperatur wird die Luftrate maximal.

Berechnungsergebnisse

Wärmedämmung

Durch eine Verdoppelung der Wärmedämmung (8 cm statt 4 cm PUR) lässt sich der Heizbedarf je nach Stalltyp um 18 bis 27 % reduzieren (Tab. 3). Eine weitere Zunahme der Wärmedämmung um 4 cm verringert den Heizbedarf nochmals um 7 bis 20 %.

Tab. 3: Jahresenergiebedarf für die Heizung bei drei unterschiedlichen Wärmedämmungen (PUR=Polyurethan).

	Heizbedarf [kWh] pro Jahr bei unterschiedlicher Wärmedämmung				
	4 cm PUR	8 cm PUR	12 cm PUR	% [8/4cm]	% [12/4cm]
Abferkelstall (ABF)	19372	14100	11350	73	59
Ferkelaufzuchtstall (FA)	51114	42136	39031	82	76
Vormaststall (VM)	26934	21048	19016	78	71
Endmaststall (EM)	22684	16839	14702	74	65
Geflügelmaststall (HM)	193850	151814	137064	78	71

Erwartungsgemäss nimmt der Grenznutzen sowohl relativ wie auch absolut mit steigender Wärmedämmung ab. Eine noch stärkere Wärmedämmung von 16 cm PUR ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$) würde den jährlichen Heizbedarf im Abferkelstall lediglich um 970 kWh gegenüber 12 cm PUR reduzieren. Der Strombedarf der Lüfter steigt mit zunehmender Wärmedämmung leicht an. Dies liegt daran, dass wegen der geringeren Transmissionsverluste mehr Tierwärme über die Lüftung abgeführt werden muss und folglich die erforderliche Luftrate grösser wird. Diese Zunahme ist jedoch gegenüber der Energieeinsparung bei der Heizung vernachlässigbar klein.

Erdwärmenutzung

Durch Erdwärmenutzung kann zwischen 94 und 35 % der Heizenergie eingespart werden (Tab. 4). Die relative Senkung des Heizbedarfs wird besser mit zunehmender Wärmedämmung. Bei der Schweine-Endmast kann ausser beim Einstellen im Winter ganz auf eine Heizung verzichtet werden, wenn die Bauhülle eine Wärmedämmung von 8 cm

PUR ($0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) aufweist. Der Erdwärmetauscher erhöht den Luftwiderstand um etwa 30 Pa bei voller Lüfterleistung. Andererseits kann durch die Kühlung die Luftrate bei hohen Aussentemperaturen geringer sein. Hierdurch steigt der jährliche Energiebedarf für die Lüfter nur unwesentlich an (Tab. 5).

Tab. 4: Jahresenergiebedarf für die Heizung bei unterschiedlicher Wärmedämmung, mit oder ohne Erdwärmetauscher (EWT) oder Wärmerückgewinnung (WRG).

	Heizbedarf [kWh] pro Jahr		
	Ohne	Mit EWT	Mit WRG
Abferkelstall 4 cm PUR	19372	11618	4748
Abferkelstall 8 cm PUR	14100	6662	1572
Abferkelstall 12 cm PUR	11350	5034	898
Ferkelaufzuchtstall 4 cm PUR	51114	33392	8368
Ferkelaufzuchtstall 8 cm PUR	42136	24969	3863
Ferkelaufzuchtstall 12 cm PUR	39031	22110	2618
Vormaststall 4 cm PUR	26934	11256	2149
Vormaststall 8 cm PUR	21048	6282	653
Vormaststall 12 cm PUR	19016	4795	333
Endmaststall 4 cm PUR	22684	4181	581
Endmaststall 8 cm PUR	16839	1514	67
Endmaststall 12 cm PUR	14702	954	16
Geflügelmaststall 4 cm PUR	193850		85719
Geflügelmaststall 8 cm PUR	151814		54426
Geflügelmaststall 12 cm PUR	137064		48849

Wärmerückgewinnung

Die Modellrechnungen bescheinigen der Wärmerückgewinnung ein sehr grosses Energiesparpotenzial (Tab. 4). Die Raumheizung erübrigt sich praktisch bei allen Schweinemastställen, wenn der Stall voll belegt und die Wärmedämmung einen U-Wert von $0,56 \text{ W/m}^2\text{K}$ (4 cm PUR) nicht überschreitet. Lediglich vor dem Einstellen im Winter muss geheizt werden. Die durch die Ferkelställe abgegebene Wärme genügt, um in Abferkelställen das verbleibende Energiedefizit zu kompensieren. Lediglich bei der Ferkelaufzucht dürfte noch ein kleiner Heizbedarf anfallen.

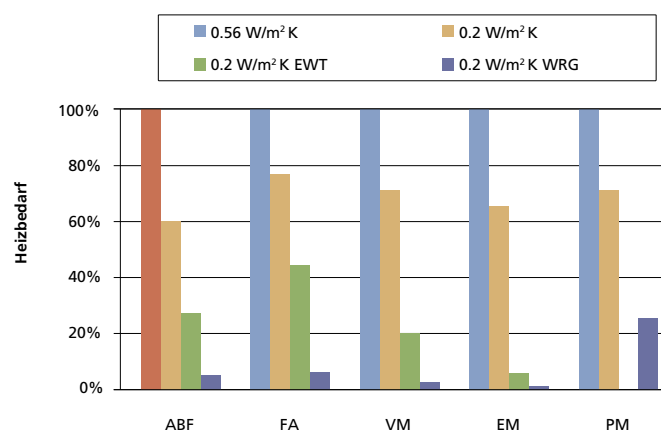
Diese Aussagen gelten jedoch nur unter der Voraussetzung, dass der Wärmetauscher einen Wirkungsgrad von mindestens 50 % aufweist. Die letzte Bedingung dürfte in Geflügelmastställen wegen der starken Staubbelastung der Abluft und der grossen Bandbreite bei der Lüftrate nur schwer zu erfüllen sein.

Bei der Dimensionierung des Wärmetauschers muss neben dem thermischen Wirkungsgrad auch der Luftwiderstand beachtet werden. Dieser soll möglichst tief sein, damit der Strombedarf der Lüfter nicht zu hoch wird (Tab. 5).

Tab. 5: Jahresenergiebedarf für die Lüfter bei unterschiedlicher Wärmedämmung, mit oder ohne Erdwärmetauscher (EWT) oder Wärmerückgewinnung (WRG)

	Energiebedarf Lüfter [kWh] pro Jahr		
		Mit EWT	mit WRG
Abferkelstall 4 cm PUR	1312	1308	1565
Abferkelstall 8 cm PUR	1351	1347	1598
Abferkelstall 12 cm PUR	1372	1374	1597
Ferkelaufzuchtstall 4 cm PUR	2233	1932	3024
Ferkelaufzuchtstall 8 cm PUR	2306	2002	3121
Ferkelaufzuchtstall 12 cm PUR	2334	2022	3118
Vormaststall 4 cm PUR	2705	2973	3661
Vormaststall 8 cm PUR	2781	3075	3747
Vormaststall 12 cm PUR	2794	3120	3751
Endmaststall 4 cm PUR	4150	4362	4816
Endmaststall 8 cm PUR	4217	4520	4850
Endmaststall 12 cm PUR	4239	4567	4878
Geflügelmaststall 4 cm PUR	8630	-	12565
Geflügelmaststall 8 cm PUR	8783	-	12945
Geflügelmaststall 12 cm PUR	8863	-	13017

Durch Kombination einer sehr guten Wärmedämmung mit Erdwärmennutzung oder Wärmerückgewinnung lässt sich der Heizbedarf in allen Varianten mehr als halbieren (Abb. 4). Da bei solchen Anlagen der Widerstand für die Lüfter zunimmt, ist es wichtig, nur energiesparsame Lüfter



ABF=Abferkelstall, FA=Ferkelaufzuchtstall,
VM=Vormaststall, EM=Endmaststall, PM=Geflügelmaststall

Abb. 4: Je nach Stalltypen bewirken die einzelnen Energiesparmassnahmen eine unterschiedliche Senkung des Energiebedarfs.

einzusetzen. Während des Versuchs (15.09.2009 bis 31.05.2010) brauchten die zwei phasenanschnittgesteuerten Lüfter (Ø 40cm) 1075kWh, die beiden elektronisch kommutierten ETAvent-Lüfter (Ø 40cm) unter ähnlichen Bedingungen nur 366kWh.

CO₂-gesteuerte Lüftung

Bei der konventionellen Lüftung wird die Lüftrate nach der Stalltemperatur gesteuert. Die minimale Lüfterdrehzahl ist nicht variabel, sondern hat einen fixen Wert. Dies hat zur Folge, dass solange die Solltemperatur nicht überschritten wird, die Lüftrate konstant bleibt, unabhängig vom realen Frischluftbedarf der Tiere. Dieser hängt nicht nur von der Besatzdichte, sondern auch von der Aktivität der Tiere ab. Während Ruhephasen (vor allem nachts) wird zu viel und bei starker Aktivität der Tiere zu wenig gelüftet. Die Folgen im Winter sind eine stark schwankende Luftqualität und ein erhöhter Energiebedarf für die Heizung, da in der Nacht die Aussentemperatur meistens am tiefsten und während dieser Zeit die fühlbare Wärmeabgabe der Tiere am geringsten ist.

Versuchsanlage

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 wird in Gleichdruck gelüftet (2 Lüfter ETAvent FC040-4IQ.4C.3). Die Lüftersteuerung basiert auf Temperatur und CO₂-Konzentration (VengSystem, Abb. 1). Neben der Stalltemperatur und 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 Ammoniakmessung erfolgt durch einen Multisensor mit Vorwärmung (VE 18). Die Luftproben werden über einen Filter abwechselnd aus beiden Kammern und von aussen angesaugt. Durch die Spülung mit Aussenluft nach jeder Beprobung der Stallluft soll verhindert werden, dass der NH₃-Sensor gesättigt wird. Die Genauigkeit der CO₂- und NH₃-Messungen wurde in regelmässigen Zeitabständen mit Dräger-Röhrchen überprüft. Die Lüftrate wird aus der Luftgeschwindigkeit im Zuluftkanal abgeleitet. Sämtliche Elemente sind über ein BUS-System mit dem Klimacomputer (VE 108) und dem PC verbunden.

Messergebnisse

Bei einer CO₂-gesteuerten Lüftung wird die Lüftrate ständig dem momentanen Bedarf der Tiere angepasst, indem die in Echtzeit gemessene CO₂-Konzentration für die Steuerung der Lüfterdrehzahl verwendet wird. Wenn während Ruhephasen der CO₂-Austoss der Tiere sich reduziert, verringert sich automatisch auch die Lüftrate, da der gewählte Sollwert für die CO₂-Konzentration unterschritten wird. Der Sollwert darf gemäss Schweizer Stallklimanorm maxi-

mal 3000 ppm (0,3 Vol.-%) betragen. Erfahrungen zeigen jedoch, dass in den meisten Ställen bei 3000 ppm CO₂ die Ammoniakkonzentration den Grenzwert (20 ppm) überschreitet. Es empfiehlt sich, deshalb den Sollwert tiefer zu wählen (2000 ppm).

Je effizienter die Lüftersteuerung ist, desto geringer sind die Schwankungen der CO₂-Konzentration um deren Sollwert. In der Praxis sind Schwankungen der CO₂-Konzentration nicht vollständig zu vermeiden, denn die Tiere ändern ihre CO₂-Produktion (Abb. 5) in sehr kurzen Zeitspannen stark und 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 wegen der Pufferwirkung des Stallvo-

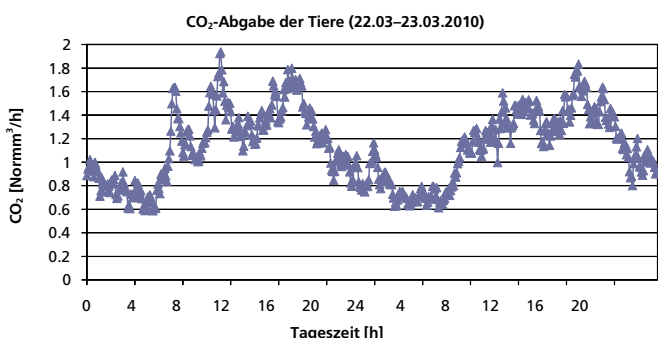


Abb. 5: Die CO₂-Abgabe der Tiere und folglich auch der Frischluftbedarf schwankt stark im Tagesverlauf.

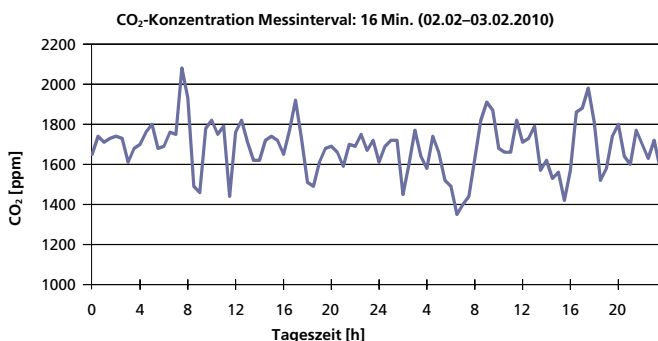


Abb. 6: Wird die Lüfterrate nur alle 16 Minuten geregelt, schwankt die CO₂-Konzentration im Stall stark (Sollwert 1600 ppm).

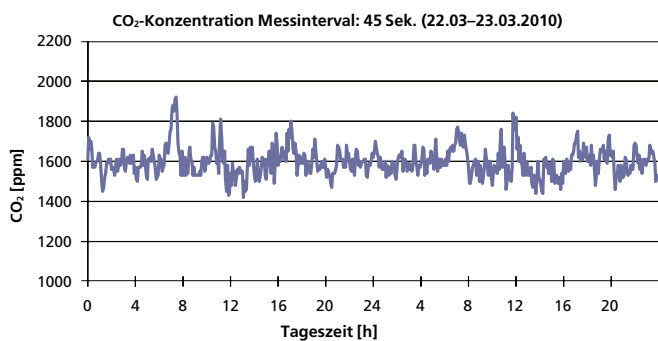


Abb. 7: Eine häufigere Anpassung der Lüfterrate (45-Sekunden-Intervall) führt zu besserer Angleichung der CO₂-Konzentration an den Sollwert (1600 ppm).

lumens ausserdem nur langsam auf den Anstieg der CO₂-Konzentration im Stall aus [7]. Aus diesen Gründen kommt es oft vor, dass die Lüfterrate 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. Die Angleichung an den Sollwert ist deutlich besser bei einer Messfrequenz von 45 Sekunden (Abb. 7) als bei 16 Minuten (Abb. 6).

Damit die CO₂-Schwankungen sehr gering bleiben, ist nicht nur ein kurzes Messintervall notwendig, sondern muss auch die Anpassung der Lüfterdrehzahl und folglich der Lüfterrate aufgrund der registrierten Abweichung der CO₂-Konzentration schnell und angemessen sein. Der ideale Regelwert kann für jeden Stall nur durch Versuche ermittelt werden.

Wie viel Energie sich nach Umstellung auf eine CO₂-gesteuerte Lüfterrate einsparen lässt, hängt von der Handhabung der bisherigen Lüftung ab. Je höher die Ansprüche an die Luftqualität und folglich die minimale Lüfterrate waren und je weniger die minimale Lüfterdrehzahl von Hand dem Tierbestand angepasst wurde, desto grösser werden die Energieeinsparungen nach Einbau der CO₂-Steuerung sein. Damit das Energiesparpotenzial voll ausgeschöpft werden kann, muss auch der Regelbereich des Lüfters gross genug sein. In Ställen, wo sich der Tierbestand stark ändert, reicht ein Regelbereich von 1:5 nicht aus. Im Abferkelstall wurde am 24. März bei einem Tierbestand von 8 Sauen und 78 säugenden Ferkeln von durchschnittlich 8,3 kg während der Aktivitätsphase eine maximale CO₂-Produktion von 1,62 Normm³/h gemessen. Vor dem Abferkeln betrug am 13. Februar während der Ruhephase die minimale CO₂-Produktion 0,12 Normm³/h. Die CO₂-Steuerung des Lüfters hat zur Folge, dass die Lüfterrate während der Ruhephasen der Tiere drastisch gesenkt wird. Die Befürchtung, dass hierdurch die Ammoniakkonzentration in der Stallluft stark ansteigen könnte, hat sich während der Versuche als unbegründet erwiesen. In der Periode 15.09.2009 bis 31.05.2010 betrug im Versuchsstall der ART die Energieeinsparung durch die CO₂-gesteuerte Lüftung gegenüber der konventionellen etwa 35 %.

Wirtschaftlichkeit

Durch Kombination verschiedener Massnahmen lässt sich der Energiebedarf stark reduzieren (Tab. 6). Bei Neubauten sind alle Massnahmen möglich. Bei bestehenden Bauten kann eine Verbesserung der Wärmedämmung oft nur mit grossem Aufwand realisiert werden. Beim nachträglichen Einbau einer Wärmerückgewinnung muss wegen der zentralen Zu- und Abluftführung in der Regel das ganze Lüftungskonzept geändert werden. Dagegen lässt sich die Umstellung der Lüftung auf eine CO₂-Steuerung relativ einfach durchführen.

Damit die Energiesparmassnahmen wirtschaftlich sind, müssen sie innerhalb der zu erwartenden Lebensdauer abgeschrieben werden können. Bei Sandwichpaneelen betragen die Mehrkosten für 8 cm PUR-Wärmedämmung

gegenüber 4cm etwa Fr. 11.– pro m², für 12cm gegenüber 4cm Fr. 20.– pro m². Bei einem Kilowattstundenpreis von Fr. 0.10 lässt sich eine Verdoppelung der Wärmedämmung (8cm statt 4cm PUR) je nach Stalltyp innerhalb von 4,2 bis 9,6 Jahren amortisieren (Tab. 7). Eine Wärmedämmung von 12 statt 4cm fordert eine Amortisationszeit von 5,6 bis 12,8 Jahren. Am wirtschaftlichsten ist die Verbesserung der Wärmedämmung im Geflügelmast- und im Ferkelaufzuchtstall, wo hohe Stalltemperaturen erforderlich sind, sowie auch im Abferkelstall, wo wegen der geringen Tierbesatzdichte die Wärmeverluste durch die Bauhülle anteilmässig hoch sind.

Da die erforderlichen Investitionen für die CO₂-gesteuerte Lüftung, Erdwärmenutzung und die Wärmerückgewinnung firmen- und stallspezifisch sind, lässt sich die Amortisationszeit dieser Massnahmen nicht eindeutig ermitteln. Deshalb wurden die maximalen Investitionen (Investitionsgrenze) berechnet, die aufgrund der zu erwartenden Heizenergieeinsparungen (Tab. 4) und unter bestimmten Voraussetzungen (Zins- und Reparaturansatz, Abschreibungsdauer und Energiepreis) wirtschaftlich noch sinnvoll sind (Tab. 8).

Die Wirtschaftlichkeit der CO₂-Steuerung hängt vor allem von der Anzahl Sensoren ab, die pro Stall erforderlich sind. Im Hinblick auf ein kurzes Messintervall sollen mit dem gleichen Sensor nur wenige Abteile gemessen werden. Die Zeitspanne zwischen zwei Messungen sollte fünf Minuten nicht übersteigen. Beim Geflügelmaststall lässt sich die Investitionsgrenze momentan nicht berechnen, da noch grosse Unsicherheit bei der Energieeinsparung unter Praxisbedingungen besteht. Viele Geflügelmäster kämpfen mit Feuchtigkeitsproblemen in der Einstreue und sind deshalb gezwungen, mehr zu lüften, als aufgrund der CO₂-

Konzentration im Stall notwendig wäre. Da jedoch die ganze Luftrate der 12000 Tiere mit einem einzigen Sensor geregelt werden kann und der Heizbedarf sehr hoch ist, reicht eine Energieeinsparung von wenigen Prozenten aus, um die CO₂-Steuerung zu amortisieren.

Es zeigt sich, dass ausser beim Aufzuchtferkelstall die Investitionsgrenze beim Erdwärmetauscher (EWT) höher liegt als bei der Wärmerückgewinnung. Die wirtschaftlich maximal möglichen Investitionen reichen jedoch bei weitem nicht aus, um einen Rippenrohr-Erdwärmetauscher zu finanzieren. Eine solche Anlage kann deshalb nur wirtschaftlich sein, wenn neben der Heizkosteneinsparung dank Kühlung im Sommer auch bessere Tierleistungen

Tab. 8: Investitionsgrenze pro Einheit für eine CO₂-gesteuerte Lüftung, Erdwärmenutzung (EWT) und Wärmerückgewinnung (WRG, Wirkungsgrad 50%) bei einer Wärmedämmung von 0,2 W/m² K und Energieeinsparungen nach Tab. 4.

	CO ₂ -Lüftung	EWT	WRG
Zins	3 %	3 %	3 %
Reparatur	3 %	1 %	3 %
Abschreibung	10 Jahre	25 Jahre	15 Jahre
Energiepreis	0.1 Fr./kWh	0.1 Fr./kWh	0.1 Fr./kWh

Einheit	Investitionsgrenze Fr.		
	Fr./Einheit	Fr./Einheit	Fr./Einheit
Abferkelbucht	249	582	490
Aufzuchtferkelplatz	22	52	57
Vormastplatz	28	105	70
Endmastplatz	23	101	55
Geflügelmastplatz	?		5.5

Tab. 6: Berechneter Heizbedarf in Schweineställen nach Verbesserung der Wärmedämmung ($U = 0,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), nach Umstellung von konventioneller Lüftung ($L_{\text{konventionell}}$) auf CO₂-gesteuerte Lüftung (L_{CO_2}), bei Erdwärmenutzung (EWT) oder bei Wärmerückgewinnung (WRG).

Stalltyp	U=0,6 W/m ² K	U=0,2 W/m ² K	U=0,2 W/m ² K	U=0,2 W/m ² K	U=0,2 W/m ² K	U=0,2 W/m ² K	U=0,2 W/m ² K
	$L_{\text{konventionell}}$	$L_{\text{konventionell}}$	L_{CO_2}	$L_{\text{konventionell}}$	$L_{\text{konventionell}}$	L_{CO_2}	L_{CO_2}
				EWT	WRG	EWT	WRG
Abferkelstall	100%	64%	45%	26%	5%	18%	3%
Ferkelaufzucht	100%	76%	53%	43%	5%	30%	4%
Vormast	100%	71%	49%	18%	1%	12%	1%
Endmast	100%	65%	45%	4%	0%	3%	0%

Tab. 7: Amortisationszeit für eine zusätzliche Wärmedämmung mit Sandwichpaneelen bei verschiedenen Stalltypen (Energiepreis: Fr. 0.10 pro kWh, entspricht einem Heizölpreis von Fr. 1.00 pro Liter).

	Wand+Decke 8 statt 4 cm PUR			Wand+Decke 12 statt 4 cm PUR		
	Zusätzliche Investitionen	Energie-Einsparungen	Amortisationszeit	Zusätzliche Investitionen	Energie-Einsparungen	Amortisationszeit
	Fr.	Fr./Jahr	Jahre	Fr.	Fr./Jahr	Jahre
Abferkelstall	3542	527	6.7	6440	802	8.0
Ferkelaufzuchtstall	4928	898	5.5	8960	1208	7.4
Vormaststall	4279	589	7.3	7780	792	9.8
Endmaststall	5621	584	9.6	10220	798	12.8
Geflügelmaststall	17622	4204	4.2	32040	5679	5.6

erzielt werden. Die berechneten Daten für die Wärmerückgewinnung sind mit Vorsicht zu betrachten. Da wenige Erfahrungen mit neueren Wärmetauschertypen, die sowohl über eine automatische Reinigung als auch über eine Bypassregelung verfügen, vorliegen, ist ihr thermischer Wirkungsgrad unter Praxisbedingungen noch unsicher.

Zusammenfassung

Bei Neubauten lassen sich die Mehrkosten für eine Wärmedämmung von 8 cm Polyurethan ($0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) statt 4 cm ($0,56 \text{ W/m}^2\text{K}$) bei gleichzeitiger Verwendung kostengünstiger Bauweisen (Sandwichpaneel) und einem Kilowattstundenpreis von Fr. 0.10 für alle untersuchten Schweinestalltypen sowie auch Geflügelmastställe innerhalb von vier bis zehn Jahren zurückbezahlen. Werden 12-cm-Sandwichpaneel ($0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$) verwendet an Stelle der 8 cm dicken, erhöht sich die Amortisationszeit auf sechs bis 13 Jahre.

Bei dieser Wärmedämmung beträgt der Anteil der Lüftung an die gesamten Wärmeverluste mehr als 80 %. Eine bedeutende zusätzliche Senkung des Energiebedarfs ist deshalb nur über den Luftwechsel möglich. Die erste auf der Hand liegende Massnahme besteht darin, zu verhindern, dass mehr gelüftet wird, als notwendig. Eine automatische Anpassung der Lüfrate an den momentanen Bedarf ist möglich, indem die CO_2 -Konzentration im Stall kontinuierlich gemessen und für die Lüfratensteuerung verwendet wird. Messungen zeigen, dass die Lüfrate während Ruheperioden (Nacht) sehr stark reduziert werden kann, ohne dass die Grenzwerte der Luftqualität (Ammoniak) überschritten werden. Damit das Energiesparpotenzial der CO_2 -Steuerung ausgeschöpft werden kann, müssen die Messintervalle der CO_2 -Konzentration kurz sein und die Lüftersteuerung den spezifischen Stallbedingungen angepasst werden. Das Energiesparpotenzial der CO_2 -gesteuerten Lüftung kann bei Schweineställen auf etwa 30 % geschätzt werden. Die gleichmässige Luftqualität, die sich auf die Gesundheit von Mensch und Tier günstig auswirkt, ist neben der Verringerung der Heizkosten ein zusätzlicher Vorteil. In grösseren Ställen lassen sich die Mehrkosten für die CO_2 -Steuerung innerhalb weniger Jahre zurückverdienen. Bei Geflügelmastställen, die mit Feuchtigkeit in der Einstreue zu kämpfen haben, besteht noch Unsicherheit bezüglich Energiesparpotenzial.

Eine weitere starke Senkung des Energiebedarfs ist möglich, indem die Zuluft im Winter durch Erdwärmenutzung vorgewärmt wird. Kombiniert man eine sehr gute Wärmedämmung ($0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$) mit einem Rippenrohr-Erdwärmetauscher (EWT), kann gemäss den Modellrechnungen der Heizbedarf in Abferkelställen um 74 %, in Ferkelaufzuchtställen um 57 %, bei der Vormast um 82 % und bei der Endmast um 96 % im Vergleich zum Referenzstall ($U=0,56 \text{ W/m}^2\text{K}$) reduziert werden. Angesichts der hohen Investitionen, ist ein Rippenrohr-Erdwärmetauscher jedoch nur wirtschaftlich, wenn neben der Heizkostensenkung auch bessere Tierleistungen erzielt werden können. Die Unterflurzuluftführung ist eine kostengünstigere Alternative,

hat allerdings nur bei genügend Kontaktfläche mit dem Erdreich im Verhältnis zur Tiermasse, wie das beim Abferkelstall der Fall ist, eine vergleichbare Wärmeleistung.

Von allen Massnahmen hat die Wärmerückgewinnung (WRG) aus der Abluft theoretisch das grösste Heizsparpotenzial. In Schweineställen kann bei Vollbelegung praktisch auf eine Heizung verzichtet werden, vorausgesetzt der Stall ist sehr gut wärmegeämmt und der Wärmetauscher weist einen Wirkungsgrad von mindestens 50 % auf. Bei der Dimensionierung des Wärmetauschers muss neben dem thermischen Wirkungsgrad auch der Luftwiderstand beachtet werden. Dieser soll auf der Zu- und Abluftseite bei voller Leistung jeweils nicht über 50 Pa liegen, damit der Anstieg des Strombedarfs der Lüfter im Jahresdurchschnitt unter 30 % bleibt. Wegen des höheren Luftwiderstands sollten nur Lüfter mit energieeffizienter Steuerung eingesetzt werden. Weiter müssen die Zu- und Abluftkanäle perfekt dicht sein und die Bypass-Klappen auf der Zu- und Abluftseite im Winter sehr gut schliessen. Unter Berücksichtigung, dass der Wärmetauscher die konventionelle Heizanlage ersetzen kann, dürfte er bei Neubauten in allen Schweineställen wirtschaftlich sein.

In Geflügelmastställen beträgt das theoretisch mögliche Heizsparpotenzial durch Wärmerückgewinnung etwa 60 %. Es ist jedoch anzunehmen, dass dieses Potenzial beim heutigen Stand der Technik wegen der starken Staubbelastung in der Abluft und der extremen Differenz zwischen der erforderlichen Lüfrate am Anfang und am Schluss der Mast nicht ausgeschöpft werden kann. Da ausserdem damit zu rechnen ist, dass der Strombedarf für die Lüfter erheblich zunimmt, ist die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen in Geflügelmastställen heutzutage noch fraglich. In diesem Bereich ist noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit erforderlich.

Literatur

- [1] SIA-Norm 380/1: 2009. Thermische Energie im Hochbau.
- [2] C.I.G.R. (1984). First Report of working group on Climatisation of animal houses. UK-Aberdeen, 1984.
- [3] Van Caenegem L. u. B. Wechsler, 2000. Stallklimawerte und ihre Berechnung. FAT-Schriftenreihe Nr. 51, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen.
- [4] Sagelsdorff R. u. T. Frank, 1990. Wärmeschutz und Energie im Hochbau.
- [5] Van Caenegem L. u. D. Deglin, 1998. Erdwärmetauscher für Schweineställe. Schriftenreihe Nr. 48, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen.
- [6] Van Caenegem L., 2007. Zuluft aus dem Hohlraum unter dem Stall. ART-Bericht Nr. 672. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen.
- [7] Van Caenegem L., Soltermann A. u. M. Schick, 2010. Energiesparpotenzial durch CO_2 -gesteuerte Lüfrate in Abferkelställen. Landtechnik 65, 6.