

Renate Luise Dörfler, Ludo Van Caenegem und Matthias Schick

Berechnungsmethode für den jährlichen Heizwärmebedarf von Abferkelställen

Die entwickelte Methode zur Berechnung des Heizwärmebedarfs von Abferkelställen beruht auf der thermischen Energiebilanz, in welcher Energiegewinne und -verluste gegenübergestellt werden. Während die Wärmeabgabe durch Tiere und elektrische Geräte sowie solare Wärme-gewinne die Bilanz positiv beeinflussen, haben Transmissions- und Lüftungswärmeverluste eine entgegengesetzte Wirkung. Die Ergebnisse der Berechnung geben im Vergleich mit Zielwerten Auskunft über die Energieeffizienz und wärmeschutztechnische Schwachstellen von Gebäuden. Gleichzeitig kann das Potenzial von Maßnahmen zur Energieeinsparung beurteilt werden.

Schlüsselwörter

Jährlicher Heizwärmebedarf, Energiebilanz, Abferkelstall, Energieeinsparung

Keywords

Annual thermal heat requirement, energy balance, farrowing unit, energy conservation

Abstract

Dörfler, Renate Luise; Van Caenegem, Ludo and Schick, Matthias

Calculation method for the annual thermal heat requirement of farrowing units

Landtechnik 67 (2012), no. 1, pp. 17–21, 1 figure, 2 tables, 5 references

The developed method for the calculation of the thermal heat requirement for farrowing units is based on the thermal energy balance in which energy gains and energy losses are compared. While the heat dissipation from animals and electrical devices, and solar heat gains positively influence the balance, transmission heat losses and ventilation heat losses have the opposite effect. In comparison to the target values the results of the calculation provide information about the energy efficiency and weaknesses of the thermal perfor-

mance of buildings. At the same time, the potential of energy saving measures can be assessed.

■ Für das Beheizen von Abferkelställen ist viel Energie nötig. In der strohlosen Haltung ist einerseits besonderes Augenmerk auf den Wärmebedarf der Ferkel zu legen, andererseits vergrößern steigende Energiepreise den Zwang zur Energieeinsparung. Durch den Vergleich des berechneten Heizwärmebedarfs mit Zielwerten können Aussagen zur thermischen Energieeffizienz eines Gebäudes getroffen werden.

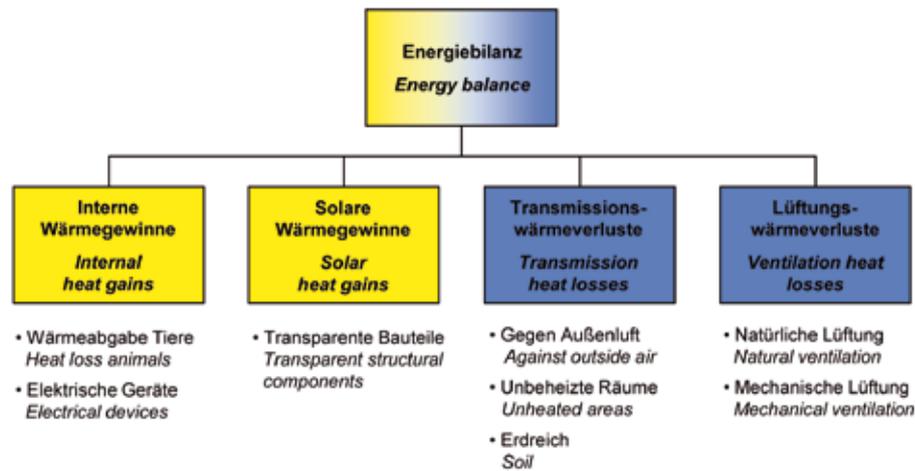
Das Berechnungsverfahren für den Heizwärmebedarf in den bestehenden technischen Normen (z. B. SIA 380/1) ist für Stallgebäude nicht anwendbar, weil in diesen, anders als in Wohn- und Zweckbauten, weder die Raumtemperatur noch die Lüftrate konstant, sondern tierabhängig ist. Die Wärmeproduktion und -abgabe der Tiere, die selbst von der Stalltemperatur abhängt, beeinflusst die Energiebilanz wesentlich.

In der vorliegenden Untersuchung wurde eine Berechnungsmethode entwickelt, die es erlaubt den jährlichen Heizwärmebedarf von Abferkelställen unter praxisnahen Bedingungen zu ermitteln.

Material und Methode

Die Berechnung des jährlichen Heizwärmebedarfs für nicht eingestreute, zwangsbelüftete Aufstallungssysteme basiert auf der thermischen Energiebilanz, in welcher Energiegewinne und Energieverluste gegenübergestellt werden (**Abbildung 1**). Die Gewinne umfassen interne (Wärmeabgabe durch Tiere und elektrische Geräte) und solare Beiträge. Zu den Verlusten zählt die Wärmeabfuhr durch die Bauhülle (Transmis-

Abb. 1



Wärmegewinne und -verluste der thermischen Energiebilanz von Stallgebäuden
 Fig. 1: Heat gains and heat losses in the thermal energy balance of housing units

sionswärmeverluste) und durch die Lüftung (Lüftungswärmeverluste).

Heizwärmebedarf

Der zu ermittelnde Heizwärmebedarf Q_h beschreibt die Wärmemenge, die pro Jahr erforderlich ist, um ein Gebäude mit einer festgelegten Fläche auf einem bestimmten Temperaturniveau zu halten (Gl. 1). Die Summe der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste Q_T und Q_V muss durch Heizwärme ersetzt werden, um die Stallinnentemperatur konstant zu halten. Der erforderliche Heizwärmebedarf reduziert sich um interne und solare Energiegewinne Q_i und Q_s [1].

$$Q_h = \Sigma Q_T + Q_V - \eta_g (Q_i + Q_s) \quad (\text{kWh bzw. MJ}) \quad (\text{Gl. 1})$$

Der jährliche Heizwärmebedarf berechnet sich aus der Summe des Heizwärmebedarfs für alle Monate, in denen ein positiver Gesamtwärmeverlust auftritt. Wärmegewinne können nur dann genutzt werden, wenn sie im betrachteten Zeitintervall geringer als die Verluste sind. Mithilfe des Ausnutzungsgrads der Wärmegewinne η_g in Gleichung 1 wird das Verhältnis der Wärmegewinne zu den -verlusten und die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes berücksichtigt. Für den Ausnutzungsgrad kann für Gebäude in Massivbauweise der Wert 1,0, für Gebäude in Leichtbauweise der Wert 0,9 angenommen werden [2].

Transmissionswärmeverluste

Wärmeverluste über die luft- bzw. winddichte Bauhülle oder Transmissionswärmeverluste treten auf, wenn ein Temperaturgefälle zwischen der Gebäudeinnen- und -außenseite besteht. Der spezifische Transmissionswärmeverlust H_T beschreibt ei-

nen stationären Wärmeabfluss durch die gesamte Gebäudehülle bei einem Grad Unterschied zwischen Innen- und Außentemperatur. Er berechnet sich aus den Produkten der Flächen A_j , der Wärmedurchgangskoeffizienten U_j und gegebenenfalls der Korrekturfaktoren F_{xi} für die einzelnen Bauteile, welche aufsummiert werden (Gl. 2).

Bei Bauteilen, die nicht an die Außenluft, sondern an unbeheizte Räume (z.B. Innenwand zum Futterlager) oder das Erdreich (z.B. Bodenplatte) angrenzen, ist der Wärmeabfluss aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen vermindert. Deshalb sind für solche Bauteile Korrekturfaktoren nach den gültigen Normen (z.B. SIA 380/1 [1]) zu berücksichtigen.

$$H_T = \Sigma (A_j \cdot U_j \cdot F_{xi}) \quad (\text{W/K}) \quad (\text{Gl. 2})$$

Der U-Wert ist ein Indikator für die Wärmedurchlässigkeit von Bauteilen, die aus unterschiedlichen Materialschichten zusammengesetzt sind. Die rechnerische Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten U ($\text{W/m}^2\text{K}$) erfolgt mithilfe der Wärmeübergangswiderstände innen R_{si} und außen R_{se} sowie der Dicke d_j (m) und der spezifischen Wärmeleitfähigkeit λ_j der Bauteilschichten (W/mK) (Gl. 3). Der innere Wärmeübergangswiderstand beträgt $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$, der äußere Wärmeübergangswiderstand für Bauteile gegen Außenluft $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$. Die Zahlenwerte für die Wärmeleitfähigkeit basieren auf Herstellerangaben oder Baustoffnormen.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{se}} \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (\text{Gl. 3})$$

Der jährliche Transmissionswärmeverlust Q_T eines Gebäudes beschreibt die gesamte, durch Transmission abfließende, Wärmemenge bei gegebener Temperaturdifferenz zwischen Stall- und Außenluft im Zeitraum eines Jahres. Seiner Berechnung liegt eine dynamische Simulation zugrunde, nach welcher das Jahr in Zeitintervalle (z. B. Halbstundenintervalle) unterteilt wird. Für alle Intervalle wird der Wärmeabfluss aus dem Gebäude aus dem Produkt des spezifischen Transmissionswärmeverlusts H_T , der Differenz zwischen Stalllufttemperatur und Außenlufttemperatur ΔT (K) sowie dem Zeitintervall Δt (h) bestimmt. Die, über alle Zeitintervalle summierten, Teilergebnisse bilden den monatlichen bzw. jährlichen Transmissionswärmeverlust des Stallgebäudes (Gl. 4).

$$Q_T = H_T \sum (\Delta T \cdot \Delta t) \quad (\text{kWh bzw. MJ}) \quad (\text{Gl. 4})$$

Lüftungswärmeverluste

Neben Transmissionswärmeverlusten kommt es in zwangsbelüfteten Ställen auch zu Wärmeverlusten durch lüftungstechnische Anlagen, die Gase und Feuchtigkeit aus den Stallräumen abtransportieren. Die Lüftungswärmeverluste über Stalllüfter beschreiben einen dynamischen Wärmeabfluss, der durch die Differenz zwischen Stallluft- und Zulufttemperatur verursacht wird. Der spezifische Lüftungswärmeverlust H_V errechnet sich aus dem Produkt der erforderlichen Lüftrate V_{eff} (m^3/h) und der spezifischen Wärmespeicherfähigkeit der Luft $c_{\text{pa}} \cdot \rho_a$ ($\text{Wh}/\text{m}^3\text{K}$ bzw. $\text{J}/\text{m}^3\text{K}$) (Gl. 5).

$$H_V = V_{\text{eff}} \cdot c_{\text{pa}} \cdot \rho_a \quad (\text{W/K}) \quad (\text{Gl. 5})$$

In der Regel dient die CO_2 -Konzentration der Stallluft als Maß für die erforderliche Lüftrate V_{eff} . Die maximal zulässige CO_2 -Konzentration der Stallluft beträgt 2 000 ppm [3]. **Tabelle 1** gibt die erforderliche Lüftrate V_{eff} pro Tier und Tierkategorie bei dieser Maximalkonzentration in Abhängigkeit vom Körpergewicht der Tiere an. Die erforderliche Lüftrate für das Stallgebäude ergibt sich durch Multiplikation der erforderlichen Lüftrate pro Tier und Tierkategorie mit der Anzahl Tiere je Tierkategorie.

Die spezifische Wärmespeicherfähigkeit der Luft $c_{\text{pa}} \cdot \rho_a$ kann mit Gleichung 6, unter Ergänzung der Höhe h des Stallgebäudes über Meer in Meter, berechnet werden [1]. Die spezifische Wärmespeicherfähigkeit der Luft wird in $\text{J}/\text{m}^3\text{K}$ angegeben. 1000 $\text{J}/\text{m}^3\text{K}$ entsprechen 0.277 $\text{Wh}/\text{m}^3\text{K}$.

$$c_{\text{pa}} \cdot \rho_a = 1200 - (0.14 \cdot h) \quad (\text{J}/\text{m}^3\text{K}) \quad (\text{Gl. 6})$$

Analog zum jährlichen Transmissionswärmeverlust errechnet sich der jährliche Lüftungswärmeverlust Q_V aus dem Produkt des spezifischen Transmissionswärmeverlusts H_V (W/K), der Differenz der Stall- und Zulufttemperatur ΔT (K) und dem

Tab. 1

Erforderliche Lüftrate V_{eff} pro Tier zur Begrenzung der CO_2 -Konzentration in Ställen auf 2 000 ppm [modifiziert nach 3]
 Table 1: Air rate V_{eff} per animal required for limitation of the CO_2 -concentration to 2 000 ppm in pens [modified from 3]

Tierkategorie Animal category	Körpermasse Body weight kg	Erforderliche Lüftrate V_{eff} Requisite air rate V_{eff} $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{Tier}^{1)}$
Ferkel Piglets	2	2
	5	4
	10	7
	20	11
Jung- und Wartesauen Gilts and pregnant sows	150	26
	200	32
Laktierende Sauen ohne Ferkel Lactating sows without piglets	200	49
	250	55

¹⁾ Die Werte der erforderlichen Lüftrate sind für eine Höhe von 500 m über Meer gültig. Für höher liegende Orte sind die Zahlen um 1 % pro 100 m zu erhöhen.
 The values of the requisite air rate are valid at an altitude of 500 m above sea level. For higher locations the numbers have should be increased by 1 % per 100 m.

Zeitintervall Δt (h). Der jährliche Lüftungswärmeverlust des Stallgebäudes ergibt sich aus der Summe der Teilergebnisse über alle Zeitintervalle (Gl. 7).

$$Q_V = H_V \sum (\Delta T \cdot \Delta t) \quad (\text{kWh bzw. MJ}) \quad (\text{Gl. 7})$$

Interne Wärmegewinne

Der interne Wärmegewinn Q_i in Abferkelställen umfasst Gewinne durch die Wärmeproduktion und -abgabe der Tiere Q_{iA} sowie durch Heizquellen in Ferkelnestern Q_{iN} (Gl. 8). Die durch andere elektrische Quellen, wie Lüfter und Beleuchtung, abgegebene Wärme bleibt in dieser Methode unberücksichtigt.

$$Q_i = Q_{iA} + Q_{iN} \quad (\text{kWh bzw. MJ}) \quad (\text{Gl. 8})$$

Die Wärmeproduktion eines Tieres variiert mit dessen Aktivität. Sie setzt sich zusammen aus der sensiblen Wärme und der latenten Wärme. Erstere geben die Tiere mithilfe der Übertragungsmechanismen Konvektion, Radiation und Konduktion, letztere durch Transpiration und Respiration an ihre Umgebung ab. Als Gewinn fließt nur die sensible Wärme in die Energiebilanz ein. Der jährliche interne Wärmegewinn durch die Wärmeabgabe der Tiere Q_{iA} errechnet sich aus dem Produkt der sensiblen Wärmeabgabe pro Tier Φ_s (W) bei der Stalltemperatur T , der Anzahl der Tiere n_j , die sich im jeweiligen Zeitintervall im Stall befinden und dem Zeitintervall Δt (h). Auf der

Grundlage einer dynamischen Simulation werden Zeitintervalle gebildet und die Teilergebnisse aller Intervalle zum Endergebnis aufsummiert (Gl. 9).

$$Q_{iA} = \sum \Phi_s \cdot n_j \cdot \Delta t \quad (\text{kWh bzw. MJ}) \quad (\text{Gl. 9})$$

In die Ermittlung der sensiblen Wärmeabgabe pro Tier Φ_s fließt die Gesamt-Wärmeproduktion pro Tier bei 20 °C H_p (W) bei einer Stalltemperatur von 20 °C ein. Diese wird in Abhängigkeit von der tatsächlich herrschenden Stalltemperatur T (°C) korrigiert (Gl. 10).

$$\Phi_s = [0.62 (1 + 0.012 (20-T)) - 1.15 \cdot 10^{-10} \cdot T^6] H_p \quad (\text{W}) \quad (\text{Gl. 10})$$

Die Gesamt-Wärmeproduktion H_p eines Tieres bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C kann mit dem Ansatz der C. I. G. R.-Arbeitsgruppe „Climatization of animal houses heat and moisture production at animal and house levels“ [4] bestimmt werden. Danach berechnet sich die Gesamt-Wärmeproduktion H_p bei laktierenden Sauen mit Ferkeln unter Berücksichtigung der Körpermasse des Tieres m (kg) und der Milchleistung Y_1 , die mit 6 kg/Tag in die Gleichung eingeht (Gl. 11).

$$H_p = 4.85 \cdot m^{0.75} + 28 \cdot Y_1 \quad (\text{W}) \quad (\text{Gl. 11})$$

Bei Warte- und Jungsauen erfolgt die Berechnung der Gesamt-Wärmeproduktion H_p mithilfe der Körpermasse des Tieres m (kg), dem Trächtigkeitstag p (Tag) und der täglichen Zunahme Y_2 (Gl. 12). Die tägliche Zunahme beträgt 0,18 kg/Tag bei trächtigen Sauen und 0,62 kg/Tag bei Jungsauen.

$$H_p = 4.85 \cdot m^{0.75} + 8 \cdot 10^{-5} \cdot p^3 + 76 \cdot Y_2 \quad (\text{W}) \quad (\text{Gl. 12})$$

Die Bestimmung der Gesamt-Wärmeproduktion H_p von Ferkeln ab dem 20. Lebenstag berücksichtigt ebenfalls die Körpermasse der Tiere m (kg). Darüber hinaus fließt die tägliche Energieaufnahme im Futter bezogen auf den Erhaltungsbedarf n , die den Wert 2 annimmt, in Gleichung 13 ein.

$$H_p = 7.4 \cdot m^{0.66} + [1 - (0.47 + 0.003 \cdot m)] [n \cdot 7.4 \cdot m^{0.66} - 7.4 \cdot m^{0.66}] \quad (\text{W}) \quad (\text{Gl. 13})$$

Interne Wärmegewinne werden neben der Wärmeabgabe der Tiere auch durch Wärmequellen in Ferkelnestern erzielt. Der jährliche interne Wärmegewinn durch elektrische Ferkelnestheizungen Q_{iN} wird aus dem Produkt der jährlichen pro Ferkelnest abgegebenen Wärme Φ_N , welche pauschal mit 700 kWh berücksichtigt wird, und der Anzahl der Ferkelnester n_j ermittelt (Gl. 14).

Tab. 2

Spezifische Strahlungsenergiekonstante $I_{s,j}$ für verschiedene Orientierungen transparenter Bauteile [5]

Table 2: Specific solar radiation energy constant $I_{s,j}$ for different orientations of transparent structural components [5]

Orientierung des Fensters Window orientation	Spezifische Strahlungsenergiekonstante $I_{s,j}$ Specific solar radiation energy constant $I_{s,j}$ kWh/m ² a
Südost bis Südwest Southeast to southwest	270
Nordwest bis Nordost Northwest to northeast	100
Andere Richtungen Other orientations	155

$$Q_{iN} = \Phi_N \cdot n_j \quad (\text{kWh bzw. MJ}) \quad (\text{Gl. 14})$$

Solare Wärmegewinne

Solare Wärmegewinne entstehen, wenn Sonnenstrahlung über transparente Flächen ins Gebäude eintritt und sich in Wärme umwandelt. In die Berechnung des jährlichen solaren Wärmegewinns Q_s fließen die spezifische Strahlungsenergiekonstante $I_{s,j}$ (kWh/m²a bzw. MJ/m²a), Abminderungsfaktoren für Verschattung F_S , Rahmenanteil F_F und nicht senkrechten Strahlungseinfall F_W , die Gesamtenergiedurchlassgrade der Verglasungen bei senkrechtem Strahlungseinfall $g_{\perp i}$ und die Rohbaumaße von Fensteröffnungen $A_{i,j}$ (m²) ein (Gl. 15).

$$Q_s = \sum (I_{s,j} \sum F_S \cdot F_F \cdot F_W \cdot g_{\perp i} \cdot A_{i,j}) \quad (\text{kWh bzw. MJ}) \quad (\text{Gl. 15})$$

Der Wert der spezifischen Strahlungsenergiekonstante $I_{s,j}$ ist je nach Orientierung der transparenten Bauteile unterschiedlich (**Tabelle 2**). Die Abminderungsfaktoren für Verschattung F_S , Rahmenanteil F_F und nicht senkrechten Strahlungseinfall F_W betragen 0,9, 0,7 bzw. 0,9. Für den Durchlassgrad der Verglasung an Gesamtenergie können bei senkrechtem Strahlungseinfall $g_{\perp i}$ für Klarglas 0,75 bei Zweifach-Isolierverglasung und 0,70 bei Dreifach-Isolierverglasung [1] oder Herstellerangaben verwendet werden.

Schlussfolgerungen

Mit der entwickelten Berechnungsmethode kann der jährliche Heizwärmebedarf für Abferkelställe in einfacher Weise bestimmt werden. Die Methode nimmt Bezug auf die besonderen Bedingungen der Tierhaltung, die im energiesparenden Wärmeschutz bisher nicht berücksichtigt sind. Über den Vergleich der berechneten Kennwerte mit Grenz- und Zielwerten aus technischen Normen, können Aussagen zur Energieeffizienz eines Gebäudes getroffen werden. Die Methode erlaubt auch unterschiedliche Bauweisen im Hinblick auf ihre Energieeffizienz zu vergleichen.

Die integrierte Ermittlung von U-Werten unterschiedlicher Bauteile stellt Informationen über mögliche Schwachstellen bzw. Wärmebrücken im Gebäude bereit. Darüber hinaus kann mithilfe des jährlichen Heizwärmebedarfs und seinen Teilkomponenten das Potenzial für Maßnahmen zur Energieeinsparung beurteilt werden. Ausgehend von der Größe der Wärmeverluste, können beispielsweise durch Wärmedämmung oder den Einbau einer Wärmerückgewinnung in das Lüftungssystem erzielbare Energieeinsparungen und die damit verbundene Kostenreduzierung beim Betrieb von Abferkelställen eingeschätzt werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf die rechnerische Bemessung von Verlusten der Heizungsanlagen-technik (Endenergiebedarf) und von Verlusten, die bei der Gewinnung des Energieträgers, seiner Aufbereitung und seinem Transport bis zum Verbrauchsort sowie der Verteilung und Speicherung im Gebäude anfallen (Primärenergiebedarf). Besondere Bedeutung kommt dabei dem Einsatz von erneuerbaren Energien bei der Deckung des Energiebedarfs von Stallgebäuden zu.

Literatur

- [1] SIA 380/1 (2009): Thermische Energie im Hochbau. Schweizer Norm 2008-12
- [2] OIB (Österreichisches Institut für Bautechnik) 1999: Leitfaden für die Berechnung von Energiekennzahlen. Nummer OIB-382-010/99. <http://www.bluesave.at/website/file/oib-energieausweis-leitfaden-1999-03.pdf>, Zugriff im November 2011
- [3] Van Caenegem, L.; Wechsler, B. (2000): Stallklimawerte und ihre Berechnung. FAT-Schriftenreihe Nr. 51, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen
- [4] C. I. G. R. (Commission Internationale du Génie Rural) (2002): 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses Heat and moisture production at animal and house levels. <http://www.agrsci.dk/jbt/spe/CIGRreport>, Zugriff im November 2011
- [5] Schild, K.; Willems, W. M. (2011): Wärmeschutz. Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 1. Aufl.

Autoren

Dr. Renate Luise Dörfler war als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Forschungsgruppe Bau, Tier und Arbeit der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Ettenhausen tätig, E-Mail: renate.doerfler@gmx.de

Dipl.-Ing. Ludo Van Caenegem ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Bau, Tier und Arbeit der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Ettenhausen, E-Mail: ludo.vancaenegem@art.admin.ch

PD Dr. habil. Matthias Schick ist Leiter der Forschungsgruppe Bau, Tier und Arbeit der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Ettenhausen, E-Mail: matthias.schick@art.admin.ch