

# Notwendige Strahlungstemperaturen der Umwelt zur Aufzucht von Saugferkeln mit Infrarotstrahlern

Dr. rer. nat. B. Bresk/OVR Dr. sc. J. Stolpe  
Institut für angewandte Tierhygiene Eberswalde-Finow

## Verwendete Formelzeichen

$A_K$	$m^2$	effektive Körperoberfläche für Konvektion (einzeln stehendes Tier)
$A_{KGr}$	$m^2$	effektive Körperoberfläche für Konvektion (liegendes Tier in der Gruppe)
$A_L$	$m^2$	Kontaktfläche zum Boden beim Liegen
$A_O$	$m^2$	Körperoberfläche gesamt
$A_R$	$m^2$	effektive Körperoberfläche für Radiation (einzeln stehendes Tier)
$A_{RGr}$	$m^2$	effektive Körperoberfläche für Radiation (liegendes Tier in der Gruppe)
$d$	$m$	Rumpfdurchmesser
$LM$	$kg$	Lebendmasse
$T$	$K$	absolute Temperatur ( $T = 273 + t$ )
$t$	$^{\circ}C$	Temperatur
$Q_{Evap}$	$W/Tier$	evaporativer Wärmeverlust
$Q_{Konv}$	$W/Tier$	konvektiver Wärmeverlust
$Q_{Kond}$	$W/Tier$	konduktiver Wärmeverlust
$Q_{Prod}$	$W/Tier$	Wärmeproduktion der Tiere
$Q_{Rad}$	$W/Tier$	radiativer Wärmeverlust
$Q_{Sens}$	$W/Tier$	sensibler Wärmeverlust
$W_{60}$	$W/m^2$	Wärmeableitung in der ersten Stunde der Berührung
$\alpha_K$	$W/m^2 \cdot K$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_R$	$W/m^2 \cdot K$	radiativer Wärmeübergangskoeffizient
$\sigma$	$W/m^2 \cdot K^4$	Stefan-Boltzmann-Konstante ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ )

## Indizes

GO	optimale Grenztemperatur
H	Hauttemperatur
L	Lufttemperatur
R	Strahlungstemperatur
U	Umwelt

## 1. Einleitung

Die optimalen Stalllufttemperaturen für Saugferkel liegen in der ersten und zweiten Lebenswoche bei 30 und 28 °C [1]. Sie werden in der Praxis durch eine Zonenheizung des Ferkelliegebereichs erzielt. Die Aufheizung des gesamten Luftvolumens eines Stalles auf diese Temperaturen würde nicht nur einen erheblichen energetischen Aufwand erfordern, sondern auch zu einer unvermeidbaren thermischen Belastung der ferkelführenden Sau mit den damit verbundenen Risiken für Gesundheit und Leistung der Tiere führen. In der breiten Praxis und z. T. auch in der industriemäßigen Tierproduktion werden zur örtlichen bzw. Zonenheizung Infrarotstrahler angewendet. Dabei können die Stalllufttemperaturen in bestimmtem Maß von den im Standard TGL 29 084 angegebenen Werten abweichen. Die zulässige Abweichung der Stalllufttemperaturen wird im Standard nicht angegeben. In den folgenden Ausführungen wird versucht, die zulässige Abweichung der Stalllufttemperatur von den Optimaltemperaturen für die Saugferkelhaltung beim Einsatz von Infrarotstrahlern zu quantifizieren.

## 2. Wärmeverlust eines Ferkels

Bei einer vorauszusetzenden Konstanz der Körpertemperatur muß die als Ergebnis biologischer Umsetzungen für die Prozesse der

Lebenserhaltung und Nahrungsumwandlung anfallende Wärmemenge an die Umwelt abgeführt werden. Der Wärmetransport vom Tier an die Umwelt erfolgt durch:

- Radiation (Strahlung)
- Konvektion (Luftströmung)
- Evaporation (Verdunstung)
- Konduktion (Leitung).

Optimale thermische Bedingungen sind dann gegeben, wenn die Wärmeproduktion des Tieres keine umweltbedingte Erhöhung aufweist. Demnach kann folgende Beziehung formuliert werden [1]:

$$Q_{Prod.} = Q_{Rad.} + Q_{Konv.} + Q_{Evap.} + Q_{Kond.} \quad (1)$$

Um bei den liegenden Ferkeln eine Unterkühlung der Bauch- und Brustregion durch starke Wärmeableitung zu vermeiden, ist ein berührungswarmer Boden für den Ferkelliegebereich zu fordern. Bei einer Stroheinstreu von 1 kg/m<sup>2</sup> auf Betonestrich ergibt sich eine Wärmeableitung in der ersten Stunde der Berührung ( $W_{60}$ ) von 50 W/m<sup>2</sup> [2]. Für die ungeheizte elektrisch beheizbare Ferkelliegefläche liegt der  $W_{60}$ -Wert im selben Größenordnungsbereich [3]. Unter Verwendung der in der Literatur [4, 5] vorliegenden Angaben zur Kontaktfläche von Schweinen mit dem Boden errechnet sich der Wärmeverlust eines liegenden Ferkels zum wärmegeprägten Boden ( $W_{60} = 50 W/m^2$ ) überschlagsmäßig zu rd. 5 % der Wärmeproduktion. Dieser relativ geringe Betrag wird unter dem Aspekt der zu erwartenden Unsicherheiten bei der Abschätzung anderer Wärmeströme nachfolgend als vernachlässigbar angesehen. Gl. (1) reduziert sich demnach auf die Glieder  $Q_{Rad.}$ ,  $Q_{Konv.}$  und  $Q_{Evap.}$ .

Die Wärmeverluste durch Radiation und Konvektion führen dabei zu einer Temperaturerhöhung der Umwelt, während der evaporative Wärmeverlust an die Wasserdampf-abgabe des Tieres gebunden ist und den Wasserdampfgehalt der Umwelt erhöht. Die Differenz aus  $Q_{Prod.}$  und  $Q_{Evap.}$  wird auch als sensibler Wärmeverlust  $Q_{Sens.}$  bezeichnet:

$$Q_{Prod.} = Q_{Evap.} + Q_{Sens.} = Q_{Konv.} + Q_{Rad.} \quad (2)$$

Unter Benutzung von Wärmeübergangskoeffizienten kann Gl. (2) in Gl. (3) umgewandelt werden:

$$Q_{Sens.} = \alpha_K (t_H - t_U) + \alpha_R (t_H - t_R) \quad (3)$$

Die Lufttemperatur muß dabei mit Geräten gemessen werden, die eine Beeinflussung des Meßergebnisses durch Wärmestrahlung ausschließen. Ein geeignetes Meßgerät ist z. B. das Aspirationspsychrometer. Die Strahlungstemperatur einer vielgestaltigen Umwelt ist eine fiktive Temperatur. Definiert ist sie als die einheitliche Oberflächentemperatur eines gedachten physikalisch schwarzen Raumes (Emissionskoeffizient 1), in dem ein Körper den gleichen Strahlungswärmeverlust wie in einem realen Raum mit unterschiedlichen Oberflächentemperaturen und verschiedenen Emissionskoeffizienten der begrenzenden Flächen hat [6]. Die Strahlungstemperatur der Umwelt errechnet sich

aus Meßergebnissen von Geräten, die die Wirkung der Wärmestrahlung und der Lufttemperatur gleichzeitig erfassen. Vor allem für die Bewertung der Wärmestrahlung in der Humanhygiene wurde das „black-globe-thermometer“ (Schwarzkugelthermometer) entwickelt. Bei diesem Thermometer ragt das Vorratsgefäß eines Quecksilberthermometers in eine geschwärzte Metallkugel hinein [7]. Aus der Temperatur im Inneren der schwarzen Kugel kann die Strahlungstemperatur errechnet werden. Nach [8] kommt es darauf an, daß die durch starke Vereinfachung der Wärmeaustauschprozesse entstehenden Differenzen zwischen dem Meßgerät und dem Menschen möglichst klein bleiben und die physikalischen Eigenschaften, wie z. B. die Strahlungszahlen für Sonnen- und Temperaturstrahlung des Meßgeräts, möglichst denen des menschlichen Körpers gleichen. Zwischen der menschlichen Haut und der Haut eines Ferkels dürften bezüglich der Eigenschaften, die den Wärmeübergang beeinflussen, nur geringe Unterschiede bestehen. Von verschiedenen Autoren ([8] und [9]) werden z. B. die gleichen radiativen Wärmeübergangskoeffizienten für den Menschen bzw. für Schweine angegeben. Die für humanhygienische Belange entwickelten Meßgeräte, aus denen die Strahlungstemperatur errechnet werden kann, dürften demnach auch für tierhygienische Aufgaben verwendbar sein, soweit es die Aufzucht von Ferkeln betrifft. Die Kenntnis der in Gl. (3) aufgeführten Wärmeübergangskoeffizienten und damit des sensiblen Wärmeverlustes von Ferkeln ermöglicht einige grundsätzliche Aussagen und Ableitungen:

- Sind die Wärmeübergangskoeffizienten bekannt, kann rechnerisch die Beziehung zwischen absinkender Lufttemperatur und notwendig werdendem Anstieg der Strahlungstemperatur ermittelt werden, wenn die Bedingung  $Q_{Sens.} = \text{konstant}$  erfüllt bleibt.
- Bei unterschiedlichen Heizsystemen auf der Basis von Infrarotstrahlung muß die Strahlungstemperatur in Beziehung zur Heizleistung und zur Lufttemperatur experimentell ermittelt werden.
- Aus der Kenntnis der o. g. Aussagen läßt sich für das jeweilige Heizsystem eine Gleichung ableiten, die zur Ermittlung der notwendigen Heizleistung in Abhängigkeit vom Alter der Ferkel und von der Lufttemperatur führt.

## 3. Ableitung der Wärmeübergangskoeffizienten und der notwendigen Strahlungstemperaturen

Nach den Angaben in [8] und [9] kann für den radiativen Wärmeübergangskoeffizienten folgende Gleichung formuliert werden:

$$\alpha_R = 4 \sigma \left[ \frac{T_H + T_R}{2} \right]^3 \quad (4)$$

Tafel 1. Abhängigkeit des sensiblen Wärmeverlustes von Saugferkeln bei Gruppenhaltung an der unteren Grenze des optimalen Temperaturbereichs

LM kg	Alter Wochen	t <sub>GO</sub> °C	Q <sub>rad.</sub> W/Tier	Q <sub>konv.</sub> W/Tier	Q <sub>Sens.</sub> W/Tier
1,3	neu-geboren	32	1,45	0,91	2,36
2,5	1.	30	3,59	2,56	6,15
3,7	2.	28	6,37	4,90	11,27
5,0	3.	26	9,82	7,97	17,79
6,5	4.	24	14,02	11,84	25,86
8,0	5.	23	17,32	14,78	32,10

Wird bei optimalen thermischen Bedingungen eine Hauttemperatur der Ferkel von rd. 35°C vorausgesetzt [10], kann Gl. (4) wie folgt umgeformt werden:

$$\alpha_R = 0,8283 + 8,068 \cdot 10^{-3} T_R + 2,620 \cdot 10^{-5} T_R^2 + 2,835 \cdot 10^{-8} T_R^3 \quad (5)$$

Die Variation von  $\alpha_R$  liegt damit im Bereich zwischen 6 und 7 W/m<sup>2</sup> · K.

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient bei natürlicher Konvektion, wie sie für den Ferkelliegebereich angenommen werden kann, wird nach [9] für Schweine mit der Gl. (6) angegeben:

$$\alpha_K = 1,4 [(t_H - t_U)/d]^{0,25} \quad (6)$$

Unter Annahme einer linearen Abhängigkeit ergibt sich der Rumpfdurchmesser als Funktion der Lebendmasse nach [9]:

$$d = 0,0925 + 0,0069 LM \quad (7)$$

Die Variation von  $\alpha_K$  liegt im Bereich zwischen 3 W/m<sup>2</sup> · K und 5 W/m<sup>2</sup> · K. Werden die Gln. (4) und (6) in Gl. (3) eingesetzt, läßt sich der sensible Wärmeverlust wie folgt berechnen:

$$Q_{Sens.} = 1,4 [(t_H - t_U)/d]^{0,25} (t_H - t_U) + 4 \sigma \left( \frac{T_H + T_R}{2} \right)^3 (t_H - t_R) \quad (8)$$

Gilt die eingangs aufgeführte Annahme, daß optimale thermische Bedingungen dann gegeben sind, wenn die Wärmeproduktion keine umweltbedingte Erhöhung aufweist, dann muß für Q<sub>Sens.</sub> eine lebendmasseabhängige Konstanz an der unteren Grenze des optimalen Temperaturbereichs t<sub>GO</sub> nach Standard TGL 29084 angenommen werden. Die Temperatur t<sub>GO</sub> setzt t<sub>L</sub> = t<sub>R</sub> voraus.

Um Gl. (8) auf das Tier bzw. die Tiergruppe zu beziehen, sind die am konvektiven (A<sub>K</sub>) und radiativen (A<sub>R</sub>) Wärmeaustausch beteiligten Körperflächen als Teil der Gesamtoberfläche (A<sub>O</sub>) einzuführen. Bei der Ableitung von Näherungsgleichungen müssen die Kontaktfläche zum Fußboden (A<sub>J</sub>), die gegeneinander strahlenden Hautpartien des einzelnen Schweines bzw. einer Schweinegruppe sowie die Berührungsfläche einzelner Tiere untereinander in einer Schweinegruppe berücksichtigt werden. Alle aufgeführten Flächen sind nicht exakt vorhersagbar, weil das Liegeverhalten der Schweine sehr variabel ist. Unter Bezugnahme auf [3, 4, 11] können die folgenden Beziehungen angegeben werden:

$$A_O = 0,1 LM^{0,63} \quad (9)$$

$$A_L = 0,0123 + 0,068 LM \quad (10)$$

Ferkel einzeln stehend:

$$A_K = A_O \quad (11)$$

$$A_R = 0,9 A_O \quad (12)$$

Ferkel in Gruppen liegend:

$$A_{KGr} = 0,790 A_O \quad (13)$$

$$A_{RGr} = 0,624 A_O \quad (14)$$

Die Verwendung der Gln. (8), (13) und (14) führt zu den in Tafel 1 zusammengestellten sensiblen Wärmeverlusten.

Werden die in der Tafel ausgewiesenen Werte für Q<sub>Sens.</sub> in Gl. (8) eingesetzt und wird bei Variation von t<sub>L</sub> diese Gleichung nach t<sub>R</sub> aufgelöst, so ergibt sich die im Bild 1 dargestellte Abhängigkeit. Die aus unterschiedlichen effektiven Körperoberflächen (A<sub>K</sub> und A<sub>R</sub>) resultierenden Auswirkungen auf die notwendige Strahlungstemperatur der Umwelt sind im Bild 1 für einzeln stehende Ferkel und für eine Gruppe liegender Ferkel dargestellt. Bei einer Lufttemperatur, die für das entsprechende Alter rd. 10 K unterhalb des Optimalbereichs liegt, beträgt die Abweichung der notwendigen Strahlungstemperatur zwischen einem einzeln stehenden Ferkel und einer liegenden Ferkelgruppe nur ≤ 1 K. Die Differenz wird um so kleiner, je kleiner die Abweichung der Lufttemperatur von den Optimalwerten ist. Als unzulässiger Bereich sind im Bild 1 die Temperaturkombinationen ausgewiesen, bei denen die Lufttemperatur die untere Grenze des Optimalbereichs nach Standard TGL 29084 um mehr als 10 K unterschreitet bzw. die Stalllufttemperatur unter 15°C absinkt. Diese Festlegung resultiert aus dem Wechseln der Ferkel zwischen dem spezifischen Mikro- und dem allgemeinen Stallklimabereich.

Aus den im Bild 1 dargestellten Berechnungsergebnissen lassen sich vereinfachte Näherungsgleichungen für die notwendige Strahlungstemperatur ableiten:

Ferkel einzeln stehend:

$$t_R = 61,8 - 0,761 t_L - 2,112 LM - 0,066 LM t_L + 0,005 LM^2 t_L \quad (15)$$

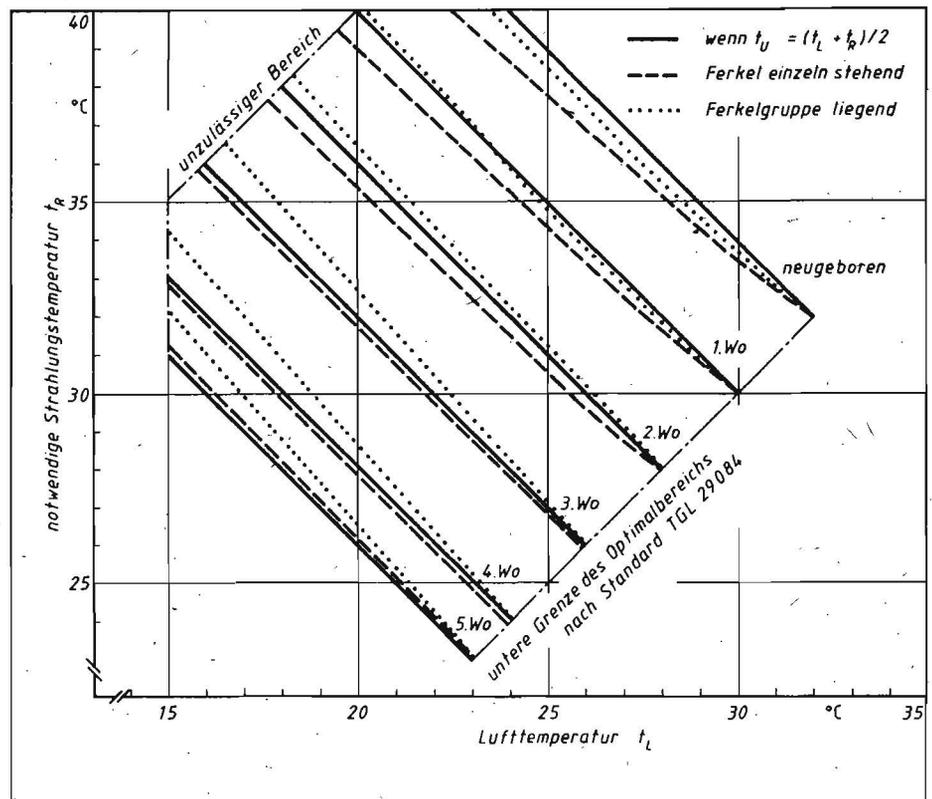
Ferkelgruppe liegend:

$$t_R = 64,9 - 0,845 t_L - 1,894 LM - 0,082 LM t_L + 0,005 LM^2 t_L \quad (16)$$

#### 4. Einschätzung der thermischen Umwelt mit Hilfe der gewichteten Strahlungs- und Lufttemperatur

Wie bisher gezeigt werden konnte, lassen sich mit der Strahlungs- und Lufttemperatur die thermischen Umweltbedingungen bewerten. Sollen optimale thermische Bedingungen vorhanden sein, muß jeder Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Lebendmasse der Ferkel eine andere Strahlungstemperatur zugeordnet werden (Bild 1). Wird aus der notwendigen Strahlungstemperatur nach den Gln. (15) bzw. (16) und der entsprechenden Lufttemperatur das arithmetische Mittel gebildet, so ergibt sich eine Umwelttemperatur t<sub>U</sub>, die zahlenmäßig in der Nähe der unteren Grenztemperatur des Optimalbereichs der Lufttemperatur für Ferkel nach Standard TGL 29084 liegt. Die so ermittelte Umwelttemperatur hat für den im Bild 1 ausgewiesenen Einschränkungsbereich eine maximale Abweichung von 1 K von der unteren Grenztemperatur des Optimalbereichs. Für die Lebendmassen von 1,3, 2,5, 3,7, 5,0, 6,5 und 8,0 kg liegen die maximalen Abweichungen bei -0,2, -0,1, +0,7, +1,0 und +0,5 K. Aufgrund verschiedener Unsicherheiten bei der Einschätzung der effektiven Strahlungs- und Konvektionsflächen sowie der Wärmeübergangskoeffizienten ist eine spezifischere Wichtung der Strahlungs- und Lufttemperatur für die Saugferkelhaltung nicht notwendig und eine mathematische Rundung der t<sub>U</sub> auf ganze Werte angezeigt. Liegt die nach Gl. (17) ermittelte Umwelttemperatur in der

Bild 1. Abhängigkeit der zur Aufzucht von Saugferkeln notwendigen Strahlungstemperatur der Umwelt von der Lufttemperatur und dem Alter der Ferkel



Nähe der unteren Grenztemperatur des Optimalbereichs nach Standard TGL 29 084, dann sind optimale thermische Bedingungen für die Ferkel gegeben:

$$t_{0} = (t_{r} + t_{l}) / 2. \quad (17)$$

Aus den Ableitungen sowie aus Bild 1 wird deutlich, daß im Verlauf des Wachstums der Ferkel entweder die Lufttemperatur oder die Strahlungstemperatur geregelt bzw. gesteuert werden muß, wenn neben thermisch optimalen Umweltbedingungen für die Ferkel ein rationeller Energieeinsatz gewährleistet sein soll. Die notwendige Strahlungstemperatur wird bei vorhandener Stalllufttemperatur durch eine entsprechende Heizleistung des Infrarotstrahlers realisiert. In welcher Beziehung notwendige Strahlungstemperatur und Heizleistung des Infrarotstrahlers stehen, ist von der konkreten technischen Konstruktion des Strahlers abhängig. Zur Ableitung der notwendigen Heizleistung einer bestimmten technischen Lösungsvariante sind Temperaturverteilungsmessungen im Mikroklimabereich notwendig.

### 5. Zusammenfassung

Die Notwendigkeit eines rationellen Energieeinsatzes erfordert in der Ferkelaufzucht

eine den Wärmeansprüchen der Tiere entsprechende Heizenergieanwendung. Auf der Grundlage von Modellbetrachtungen konnte aus den in der Literatur vorliegenden Informationen eine Gleichung abgeleitet werden, die die Errechnung einer notwendigen Strahlungstemperatur der Umwelt bei einer gegebenen Lufttemperatur im Ferkelliegebereich ermöglichte. Das arithmetische Mittel aus der notwendigen Strahlungstemperatur und der ihr zugeordneten Lufttemperatur entspricht annähernd der unteren Grenztemperatur des optimalen Temperaturbereichs nach Standard TGL 29 084.

### Literatur

- [1] TGL 29 084 Stallklimagestaltung; Rinder, Schafe, Schweine und Geflügel. Ausg. 7. 1986.
- [2] Bresk, B.: Wechselbeziehung zwischen Stallklima und Mastleistung in der Schweineproduktion. Tierhygiene-Information, Eberswalde-Finow 16 (1984) Sonderheft.
- [3] Bresk, B.; Rehmann, U.: Notwendiger Heizenergieeinsatz bei Anwendung der elektrisch beheizten Ferkelliegefläche zur Aufzucht von

- Saugferkeln. agrartechnik, Berlin 38 (1988) 1, S. 40-42.
- [4] Grammers, F. J.; Christison, G. J.; Cortis, S. E.: Estimating animal floor contact areas (Schätzung der Kontakfläche eines liegenden Tieres zum Fußboden). J. Animal. Sci., Albany 30 (1970) 4, S. 552-555.
- [5] Sach, W.: Die Größe der Körperauflagefläche von Ferkeln in Abhängigkeit von Lage, Gewicht und Konstitution. Tierärztliche Hochschule Hannover, Dissertation A 1975.
- [6] Gonzales, R. R.: Infrared radiation and human thermal comfort (Infrarotstrahlung und thermischer Komfort des Menschen). In: Microwaves and Thermoregulation. New York, London: Academic Press 1983, S. 109-137.
- [7] Böer, W.: Technische Meteorologie. Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1964.
- [8] Büttner, K.: Physikalische Bioklimatologie. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1938.
- [9] Mount, L. E.: The use of heat transfer coefficients in estimating sensible heat loss from the pig (Die Anwendung der Wärmeübergangskoeffizienten zur Schätzung des sensiblen Wärmeverlustes beim Schwein). Anim. Prod., London 25 (1977) S. 271-279.
- [10] Mount, L. E.: The Climatic Physiology of the Pig (Klimaphysiologie der Schweine). London: Edward Arnold 1968.
- [11] Brody, S. R.: Bioenergetics and Growth (Biologische Energie und Wachstum). New York: Reinhold 1945. A 5344

## Wärmerückgewinnung aus der Stallabluft mit Glasrohrwärmeübertrager

Dr. med. vet. G. Paar/Ing. R. Reinz/Ing. J. Blankenburg, Bezirksinstitut für Veterinärwesen Bad Langensalza, Bezirk Erfurt  
Staatl. gepr. Landw. W. Kahl, VEG(B) Mühlhausen, Bezirk Erfurt

### Verwendete Formelzeichen

$\Phi_{ZU}$	Temperaturübertragungsgrad
$\Phi_{AB}$	Wärmerückgewinnungsgrad
$t_{ZU}$	°C Zulufttemperatur
$t_{AU}$	°C Außenlufttemperatur
$t_{AB}$	°C Ablufttemperatur
$C$	W/K Wärmekapazitätsstrom

### 1. Einleitung

Der Einsatz von Geräten zur Nutzung von Sekundärenergie stellt eine nicht zu unterschätzende Möglichkeit zur weiteren Optimierung des Heizenergiebedarfs in der Tierproduktion dar. Im Rahmen der Feldprüfung zur Wärmerückgewinnung aus der Abluft von Tierställen sind weitere Rückgewinnungseinrichtungen hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit und Wirkung auf das Stallklima zu untersuchen. Dazu gehören auch die den rekupe-rativen Systemen zugeordneten Glattrohrwärmeübertrager.

Sie zeichnen sich dadurch aus, daß die Luftströme durch Rohre voneinander getrennt sind, wobei i. allg. kein Stoffaustausch, wie Staub, Luftfeuchtigkeit und Schadgase, erfolgen kann [1, 2]. Somit wird nur Wärmeenergie übertragen. Bei Unterschreitung der Taupunkttemperatur kondensiert ein Teil des in der Abluft enthaltenen Wasserdampfes, wodurch auch Kondensationswärme übertragen wird und sich so der Wirkungsgrad verbessert [3]. Als Material für die Rohre kann Glas, Aluminium [4] sowie Polyester bzw. Polyäthylen [5] eingesetzt werden, wobei Glas hinsichtlich Korrosionsbeständigkeit, geringer Schmutzablagerung und Reinigungsfähigkeit die besten Voraussetzungen bietet [6].

Zweckmäßig ist die Fertigung der Glattrohrwärmeübertrager in Form von Bausteinen (Module), da hierdurch eine bessere Anpas-

sung an unterschiedliche Luftdurchsätze möglich ist.

Die Führung der Luftströme (Fortluftstrom, Zuluftstrom) kann nach dem Gleichstrom-, Gegenstrom- oder Kreuzstromprinzip erfolgen.

Bei der Entwicklung und Gestaltung von Rekuperatoren sind grundsätzlich eine hohe Korrosionsbeständigkeit, eine gute Reinigungsfähigkeit sowie eine Frostunempfindlichkeit zu fordern. Als bedeutendes Problem wird häufig der hohe Staubgehalt der Stallluft, der eine starke Verschmutzung der Glasrohre auf der Abluftseite verursachen kann, herausgestellt. So traten in Broilerställen sogar Schmutzbrücken zwischen den Röhren auf, die meist nur manuell und unter Verwendung von Hochdruckreinigern entfernt werden konnten [7]. Verschiedentlich wird die Installation einer Sprüheinrichtung im Stall empfohlen, die mit Hilfe einer Schaltuhr oder manuell in Betrieb gesetzt wird [8, 9].

### 2. Untersuchungsobjekt

Die Prüfung des Glasrohrwärmeübertragers erfolgte in einem Stall für güste und niedertragende Sauen, der zu einer 1000er-Sauen-zuchtanlage gehört.

Die Sauen stehen in vierreihig angeordneten Kastenständen mit Teilspaltenboden. Zur Entmistung sind Schlepsschaukeln eingesetzt. Der Stall hat eine Kapazität von 264 Tierplätzen. Die Lüftungsanlage des Saueinstalls besteht aus einer zentralen Zuluftanlage mit vorgeschaltetem Glasrohrwärmeübertrager sowie dezentralen Zuluftgeräten. Während die zentrale Zuluftanlage für die Winterluftanlage ausgelegt ist, kann über die

dezentralen Zuluftgeräte eine stufenweise Anpassung der Förderstrommenge an die Sommerluftanlage vorgenommen werden (Bild 1).

Bei der ersten Einbauvariante bestand der Glasrohrwärmeübertrager aus drei Modulen, die übereinander in der ehemaligen Lüfterzentrale angeordnet waren. Die Abluftführung erfolgte horizontal. Aufgrund ungünstiger Druckverhältnisse auf der Außenluftseite des Wärmeübertragers sowie einer relativ schnell eintretenden Verschmutzung der Wärmeübertragerrohre wurde der Glasrohrwärmeübertrager auf vier Module (je 400 mm x 400 mm x 1250 mm) erweitert und der Abluftstrom vertikal von unten nach oben durch die Wärmeübertragereinheit geführt (Bilder 2 und 3).

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Wärmeübertragungsgrad

Die Berechnung des Wärmeübertragungsgrades erfolgte auf der Basis der ermittelten Temperaturwerte des Außen-, Zuluft- und Abluftstroms sowie der Größe des Zuluft- und Abluftvolumenstroms:

$$\Phi_{ZU} = \frac{t_{ZU} - t_{AU}}{t_{AB} - t_{AU}}, \quad \Phi_{AB} = \Phi_{ZU} \frac{C_{AU}}{C_{AB}}$$

In Tafel 1 sind die vor und nach der Passage des Glasrohrwärmeübertragers bei gleichzeitiger Erfassung des Luftdurchsatzes der Zuluft- und Abluftventilatoren registrierten Lufttemperaturen zu verschiedenen Meßzeitpunkten zusammengestellt. Daraus ist ersichtlich, daß die Temperaturerhöhung der Außenluft nach Durchströmung des Glasrohrwärmeübertragers zwischen 4,3 K und 11 K betrug, wobei