

# Grundlagen der Landtechnik

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

Herausgegeben mit Unterstützung durch die  
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft  
Braunschweig-Völkenrode (FAL)

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Institut  
für landtechnische Grundlagenforschung

Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 4, S. 109 bis 144

## Wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Ställen

Von Gerhard Englert, Freising-Weihenstephan\*)

*Aus den Arbeiten des Sonderforschungsbereiches 141 "Produktionstechniken der Rinderhaltung"*

DK 631.22:699.86

Für den Ausgleich von Defiziten im Wärmehaushalt eines Stalles bietet sich eine Reihe von technischen Maßnahmen an, die mit unterschiedlichen Investitions- und Betriebskosten verbunden sind. Die wirtschaftlichste Kombination dieser Maßnahmen ergibt sich aus einer Optimierung, z.B. durch Minimierung der durchschnittlichen jährlichen Gesamtkosten für den Ausgleich des Wärmehaushalts. Für diese Optimierungsrechnung wird ein allgemeiner Lösungsansatz formuliert, der hier zugeschnitten wird für den Ausgleich des Wärmehaushalts über eine Heizung und die unterschiedliche Wärmedämmung verschiedener Teile der Stallhülle.

Mit Hilfe einer Rechnung für unterschiedliche Wärmedämmmaßnahmen bei zwei Elementen der Stallhülle wird gezeigt, wie stark sich Änderungen einzelner Einflußgrößen auf die Jahreskosten auswirken.

### 1. Einleitung

Mit den Energiepreissteigerungen der letzten Jahre hat auch das Interesse an den Problemen des Wärmehaushaltes von Ställen wieder stärker zugenommen, vor allem weil es immer teurer wurde, Defizite des Wärmehaushalts im Winter über die Heizung auszugleichen. Die weiteren technischen Möglichkeiten für den Ausgleich des Wärmehaushalts fanden eine entsprechend verstärkte Aufmerksamkeit: die Wärmedämmung der Stallhülle sowie die Rückgewinnung von Lüftungs- und Transmissionswärme. Da für diese technischen Einrichtungen Investitionskosten und jährliche Betriebskosten (für die Instandhaltung und für die Betriebsstoffe) anfallen, wobei natürlich besonders die ständig steigenden Kosten für die Brennstoffe der Heizung ins Gewicht fallen, kommt es bei den Überlegungen, wie der Wärmehaushalt des Stalles im Gleichgewicht gehalten werden kann, nicht nur auf die Wirksamkeit,

sondern auch auf die Wirtschaftlichkeit der möglichen technischen Maßnahmen an. Man kommt so zu der Aufgabe, die wirtschaftlichste Kombination der sich anbietenden Maßnahmen ermitteln zu müssen, was gleichbedeutend ist mit der Problemstellung einer wirtschaftlichen Optimierung für den Ausgleich des Wärmehaushalts.

Für die Lösung dieses Problems ist die Methode der minimalen jährlichen Gesamtkosten am geeignetsten, da sie den Bedürfnissen der Praxis am besten entspricht. Die Zusammenfassung der mit den einzelnen technischen Einrichtungen verknüpften jährlichen Kosten in einer Gleichung formuliert dann den Lösungsansatz für die Optimierung des Wärmehaushalt-Ausgleiches. Daraus wird ein Rechenverfahren für den Spezialfall entwickelt, daß die Wärmebilanz nur über die Wärmedämmung und die Heizung ausgeglichen werden soll. Bei dieser wirtschaftlichen Optimierung der Wärmedämmung ist zu berücksichtigen, daß sich der in die Rechnung eingehende mittlere k-Wert der Stallhülle mit vielen Kombinationen von Bauelementen (z.B. Decke, Wand) mit unterschiedlichem k-Wert erreichen läßt. Diese unterscheiden sich in ihren Investitionskosten, und das auch dadurch, daß es für die Bauelemente mehrere Ausführungsmöglichkeiten gibt. Die Bestimmung der Bauelement-Kombination mit minimaler Gesamtinvestition bei gleichem k-Wert ist dementsprechend Bestandteil des dargestellten Rechenverfahrens zur Ermittlung minimaler jährlicher Kosten und der zugehörigen wirtschaftlich optimalen k-Werte bzw. Dämmschichtdicken.

Ein EDV-Rechenprogramm für den Fall, daß für nur zwei Bauelemente Wärmedämmmaßnahmen durchgeführt werden, wird schließlich dazu genutzt, die Auswirkung einzelner Einflußgrößen auf die minimalen jährlichen Kosten zu untersuchen.

### 2. Stand der Forschung

Die meisten Veröffentlichungen zur Wirtschaftlichkeit von Wärmedämmmaßnahmen bei Ställen befassen sich mit Einzelobjekten. Eine Schrifttumsdurchsicht führte zu nur zwei Arbeiten, in denen ein allgemeingültiges Rechenverfahren angestrebt wird. So stellten Nilsson u. Sällvik [1] in einer umfangreichen Arbeit u.a. ein Verfahren vor, mit dem sich Dämmschichtdicken so auswählen lassen,

\*) Dipl.-Phys. Dr. G. Englert ist Akademischer Oberrat an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik, Freising-Weihenstephan.

daß unter gegebenen Bedingungen ein Maximum an Energie eingespart wird. Als Wirtschaftlichkeitsmaßstab dient der interne Zinsfuß (s. Abschn. 3.1). Über ihn werden verschiedene Wand- und Deckenkonstruktionen mit einer Null-Alternative verglichen. Die Möglichkeit von Energiepreissteigerungen ist im Rechenverfahren berücksichtigt, eine analytische Darstellung des Problems und der Rechenmethode fehlt.

Das von *Christianson u. Hellickson* [2] entwickelte Rechenverfahren und EDV-Programm ist konsequenter, erfaßt allerdings ebenfalls nicht alle Einflußgrößen in analytischer Darstellung. Es beruht auf einer stündlichen Energiebilanzierung und berücksichtigt dabei den Wärme- und Wasserdampfanfall der Tiere, den Wärmegewinn durch die Sonneneinstrahlung, den Austausch von Transmissions- und Lüftungswärme sowie die in den Baustoffen der Stallhülle gespeicherte Wärme. In einem besonderen Rechenverfahren wird die wirtschaftlich optimale Dämmschichtdicken-Verteilung der Stallhüllen-Bauelemente iterativ ermittelt. Die analytische Darstellung dieses Optimierungsverfahrens und auch der wirtschaftlichen Optimierung der Wärmedämmung fehlt. Energiepreissteigerungen sind nicht berücksichtigt. Aus einem Rechenbeispiel wird deutlich, daß die Heizung und Wärmedämmung bei den Überlegungen zur optimalen Kontrolle des Stallklimas vorrangig zu beachten sind. Die Einsparung an Heizkosten durch den Wärmegewinn infolge der Sonneneinstrahlung liegt bei etwa 1,5 % der Gesamtkosten.

### 3. Rechenmodell für die wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Ställen

#### 3.1 Methoden der Wirtschaftlichkeitsprüfung

Die für die Wirtschaftlichkeitsprüfung energiesparender Maßnahmen im Wohnungs- und Industriebau in Frage kommenden Rechenmethoden werden von *Werner u. Gertis* [3] systematisch gesichtet. Als Wirtschaftlichkeits-Kenngrößen behandeln die Autoren die Amortisationszeit und den internen Zinsfuß. Die Amortisationszeit gibt die Zeitspanne an, in der ein Investitionsbetrag durch die mit ihm bewirkten Einsparungen wieder zurückgeflossen ist. Der interne Zinsfuß mißt die effektive Verzinsung einer Investition. Diese ist vorteilhaft, wenn der interne Zinsfuß den Kalkulationszinsfuß übersteigt. Als Rechenmethoden werden vorgestellt und miteinander verglichen: die einfache Tilgung ( Vernachlässigung von Zinsen) als statisches Kalkül sowie die Kapitalwert-Methode, die Annuitätenrechnung und die Methode des internen Zinsfußes als dynamische Rechenverfahren. *Werner* [4] vergleicht als Methoden zur wirtschaftlichen Optimierung von Wärmedämmmaßnahmen die Minimierung der jährlichen Gesamtkosten sowie die Bestimmung der maximalen Rentabilität des investierten Kapitals und untersucht, ob nicht der Energieverbrauch für die Herstellung des Dämmmaterials die Verringerung des Heizenergieverbrauches aufwiegt.

Es zeigt sich damit, daß in der Wirtschaftlichkeitsprüfung unterschiedliche Bestimmungsgrößen und Rechenmethoden verwendet werden, letztlich, um den verschiedenartigen Motivationen für Investitionen gerecht werden zu können. *Schneider* [5] weist darauf hin, daß alle vorgestellten Methoden identisch sind und daß die Annuitätensmethode den Bedürfnissen der Praxis am besten entspricht.

Bei dieser Methode werden die durchschnittlichen jährlichen Ausgaben für die Investition mit ihren durchschnittlichen jährlichen Einnahmen verglichen. Bei einer vorteilhaften Investition dürfen die Einnahmen nicht kleiner als die Ausgaben sein. Bei mehreren Investitions-Alternativen ist diejenige Investition am vorteilhaftesten, bei der die Differenz zwischen den durchschnittlichen jährlichen Einnahmen und Ausgaben am größten ist. Da sich bei Investitionen zum Ausgleich des Wärmehaushalts von Ställen die jährlichen Einnahmen in Form eingesparter Energiekosten ergeben, die sich aus den entsprechend geringeren verbleibenden jährlichen Ausgaben für die Heizung errechnen lassen, erhält man für diesen Fall die wirtschaftlichste Investition durch Minimierung der durchschnittlichen jährlichen Ausgaben, also der jährlichen Gesamtko-

sten für den Ausgleich des Wärmehaushalts. Dieses Rechenverfahren entspricht dem Problem des Wärmehaushaltsausgleiches eines Stalles am besten, da hier ein Landwirt in den meisten Fällen nicht investiert, um einen möglichst großen Gewinn zu erzielen oder gar um eine maximale Energieausnutzung zu erreichen, sondern vielmehr um angesichts der ständig steigenden Energiepreise die anfallenden jährlichen Kosten möglichst gering zu halten. Die Minimierung der jährlichen Gesamtkosten ist damit die für die wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Ställen am besten geeignete Rechenmethode.

Es kommt dann darauf an, die jährlichen Kosten für die Investition und die laufenden Betriebskosten zu jährlichen Gesamtkosten zusammenzufassen. Die durchschnittlichen jährlichen Kosten für die Investition errechnen sich dabei nach folgender Gleichung [3]:

$$\dot{K}_I = K_I a_N \quad (1.)$$

Mit  $\gamma = 1 + j$  und  $q = 1 + i$  wird

$$a_N = \frac{\gamma(q/\gamma)^N [(q/\gamma) - 1]}{(q/\gamma)^N - 1} \quad \text{für } i \neq j$$

und

$$a_N = q/N \quad \text{für } i = j$$

$\dot{K}_I$	durchschnittliche jährliche Kosten (DM/Jahr)
$K_I$	Kosten der Investition (DM)
$a_N$	Annuitätenfaktor (1/Jahr)
$\gamma$	Energiepreissteigerungsfaktor (1/Jahr)
$j$	jährliche Energiepreissteigerung (1/Jahr)
$q$	Zinsfaktor (1/Jahr)
$i$	Zinssatz (1/Jahr)
$N$	Betrachtungszeitraum, Nutzungsdauer (Jahre).

#### 3.2 Wirtschaftliche Optimierung des Wärmehaushaltsausgleiches

Wenn als technische Möglichkeiten für den Ausgleich des Wärmehaushalts

- die Wärmedämmung der Stallhülle (Index WD),
- die Rückgewinnung von Lüftungswärme (Index LR),
- die Rückgewinnung von Transmissionswärme (Index TR) und
- die Heizung (Index H)

in Frage kommen, so setzen sich die jährlichen Gesamtkosten folgendermaßen aus Kosten für die Investition (Index I), für Wartung und Instandhaltung (Index W) und für die Betriebsmittel (Index B) zusammen:

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\text{ges}}(k_m, L, T) = & K_{I,WD}(k_m)a_N + K_{I,LR}(L)a_N + \quad (2.) \\ & + K_{I,TR}(T)a_N + K_{I,H}a_N + \dot{K}_{W,WD} + \\ & + \dot{K}_{W,LR} + \dot{K}_{W,TR} + \dot{K}_{W,H} + \dot{K}_{B,H}(k_m, L, T) \end{aligned}$$

Darin sind für Wärmedämmung, Rückgewinnung von Lüftungswärme und Rückgewinnung von Transmissionswärme die jährlichen Kosten für Wartung, Instandhaltung und Betriebsmittel (z.B. Strom für die Gebläse von Lüftungswärmetauschern) jeweils in einer Größe zusammengefaßt. Nur für die Heizung werden die jährlichen Kosten für Betriebsmittel (Brennstoffe) getrennt aufgeführt.

Die in die Gl. (2) eingehende Variable  $k_m$  ist der mittlere k-Wert der Stallhülle [6]. Der Lüftungswärmefaktor L erfaßt die Rückgewinnung von Lüftungswärme und Veränderungen der Abluftstraten [6]. Der Transmissionswärmefaktor T soll die Auswirkung einer Rückgewinnung von Transmissionswärme auf die Wärmebilanz in folgender Weise erfassen:

$$T \dot{Q}_B = T (\vartheta_i - \vartheta_a) \sum_1 k_l A_l = (\vartheta_i - \vartheta_a) \sum_1 T_l k_l A_l \quad (3)$$

$$T = \frac{\sum_1 T_l k_l A_l}{\sum_1 k_l A_l} \quad (4)$$

T ist damit ein mittlerer Transmissionswärmefaktor, wenn in mehreren Bauelementen Transmissionswärmetauscher eingebaut sind ( $A_l$  Fläche des Bauelements,  $\vartheta_i$  Innen-,  $\vartheta_a$  Außentemperatur). Der Transmissionswärmefaktor  $T_l$  steht mit dem Wirkungsgrad  $\eta_l$  des Wärmetauschers im Bauelement l in folgender Beziehung:

$$T_l = 1 - \eta_l = 1 - \dot{Q}_{BR,l} / \dot{Q}_{B,l} \quad (5)$$

$\dot{Q}_{BR,l}$  durch den Wärmetauscher im Bauelement l zurückgewonnene Transmissions-Wärmeleistung

$\dot{Q}_{B,l}$  Transmissionswärme-Verlust beim Bauelement l.

Die Optimierungsrechnung besteht nun darin, durch Variation von  $k_m$ , L und T diejenige Kombination von  $k_m$ , L, T zu finden, die mit minimalen jährlichen Kosten verbunden ist. Voraussetzung dazu ist, daß für die Zusammenhänge zwischen den Investitionskosten und den Kenngrößen der technischen Einrichtungen bzw. den die Auswirkung der technischen Maßnahmen kennzeichnenden Wärmebilanzgrößen  $k_m$ , L, T Datenmaterial vorliegt, am besten in Form von analytischen Beziehungen. Zur Berechnung der durchschnittlichen Heizkosten kann das früher formulierte Rechenmodell [6] für die Wärmeenergiebilanz von Ställen verwendet werden, wobei in der Gleichung für die Wärmeleistungsdifferenz der Transmissionswärmefaktor zu berücksichtigen ist. Es gilt dann

$$\dot{K}_{B,H}(k_m, L, T) = \Delta E(k_m, L, T) K'_E \quad (6)$$

mit

$\Delta E$  Wärmeleistungsdifferenz (Wh/Jahr)

$K'_E$  Energiepreis (DM/Wh).

Der Energiepreis errechnet sich aus dem Brennstoffpreis nach folgender Gleichung [7]:

$$K'_E = 3,6 \frac{K'_B}{\eta H_U} \quad (7)$$

mit

$K'_B$  Preis für eine Brennstoffeinheit (z.B. DM/l)

$H_U$  Heizwert der Brennstoffeinheit (z.B. kJ/l)

$\eta$  Wirkungsgrad der Heizungsanlage.

Da zum Wirkungsgrad und Investitionsbedarf der Wärmetauscher in der Landwirtschaft derzeit nur wenige Daten vorliegen, ist es vorerst wenig sinnvoll, die gesamten technischen Möglichkeiten für den Ausgleich des Wärmehaushalts in die Optimierungsrechnung einzubeziehen. Es wird daher im folgenden nur der Spezialfall behandelt, daß der Wärmehaushalt über die Wärmedämmung und die Heizung ausgeglichen werden soll.

### 3.3 k-Wert-Kombination mit minimaler Gesamtinvestition

Die in die Optimierungsgleichung (2) eingehende Beziehung zwischen den Investitionskosten für die Wärmedämmung und dem mittleren k-Wert läßt sich, wie früher [8] gezeigt, in analytischer Form angeben:

$$K_{I,WD}(k_m) = \sum_1 A_l K_{I,WD,l}^* + \sum_1 A_l A_{ges} K_{I,WD,l}^{**} \lambda_l \cdot \frac{x_l(k_{m,o} - k_m)}{A_l k_{l,o}^2 - A_{ges} k_{l,o} x_l(k_{m,o} - k_m)} \quad (8)$$

$l = 1, \dots, m$

mit

$A_l$  Fläche des Bauelementes l ( $m^2$ )

$A_{ges}$  Gesamtfläche der Stallhülle;  $A_{ges} = \sum_1 A_l$

$K_{I,WD,l}^*$  flächenbezogene Kosten für die Wärmedämmmaßnahme im Bauelement l (DM/ $m^2$ )

$K_{I,WD,l}^{**}$  volumenbezogene Kosten für den Wärmedämmstoff im Bauelement l (DM/ $m^3$ )

$\lambda_l$  Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffes im Bauelement l (W/mK)

$k_{m,o}$  Ausgangswert von  $k_m$  für die Stallhülle (W/ $m^2K$ )

$k_{l,o}$  Ausgangswert von k für das Bauelement l (W/ $m^2K$ )

$x_l$  Anteil der k-Wert-Änderung im Element l an der Änderung des Wertes von  $k_m$

$$x_l = \frac{A_l (k_{l,o} - k_l)}{A_{ges} (k_{m,o} - k_m)} ; \sum_1 x_l = 1.$$

In Gl. (8) ist berücksichtigt, daß sich eine Änderung des mittleren k-Wertes aus Änderungen der k-Werte der einzelnen Bauelemente in sehr unterschiedlicher Weise zusammensetzen läßt und daß die Investitionskosten entsprechend unterschiedlich sind. Durch Variation der  $x_l$  in Gl. (8) läßt sich dann die k-Wert-Kombination mit minimalen Gesamtinvestitionskosten iterativ ermitteln.

Da bei Ställen der k-Wert nur in den Decken- und Wandelementen in größeren Bereichen zu verändern ist – für die Fenster gibt es nur wenige k-Wert-Alternativen, der k-Wert von Türen läßt sich ohne Problem an den der Wand anpassen – reicht die in [8] abgeleitete geschlossene Lösung des Optimierungsansatzes für Wärmedämmmaßnahmen in nur zwei Bauelementen bei Ställen im allgemeinen aus. Es gilt dann für die minimalen Gesamtinvestitionskosten der beiden Dämmmaßnahmen:

$$K_{I,WD,min,1+2}(k_m) = A_1 K_{I,1}^* + A_2 K_{I,2}^* + \frac{c_1 x_{min}}{1 - c_3 x_{min}} + \frac{c_2 (1 - x_{min})}{1 - c_4 (1 - x_{min})} \quad (9)$$

mit

$$c_1 = \lambda_1 K_{I,1}^{**} A_{ges} \frac{k_{m,o} - k_m}{k_{1,0}^2}; \quad c_3 = \frac{A_{ges} (k_{m,o} - k_m)}{A_1 k_{1,0}}$$

$$c_2 = \lambda_2 K_{I,2}^{**} A_{ges} \frac{k_{m,o} - k_m}{k_{2,0}^2}; \quad c_4 = \frac{A_{ges} (k_{m,o} - k_m)}{A_2 k_{2,0}}$$

$$x_{min} = \frac{\sqrt{c_2/c_1} + c_4 - 1}{c_4 + c_3 \sqrt{c_2/c_1}} \quad (10)$$

Der  $k_m$ -Wert läßt sich nur in einem bestimmten Wertebereich durch Kombination von Wärmedämmmaßnahmen bei beiden Bauelementen erreichen [7].  $k_m$ -Werte oberhalb dieses Bereiches sind über nur eines der Bauelemente zu realisieren, so daß die minimalen Investitionskosten für diese  $k_m$ -Werte aus einem Vergleich der für beide Bauelemente einzeln berechneten Investitionskosten zu ermitteln ist. Es kann darüber hinaus vorkommen, daß für einen bestimmten  $k_m$ -Wert im Wertebereich mit möglicher Kombination von Wärmedämmmaßnahmen die minimalen Gesamtinvestitionskosten für beide Bauelemente größer sind als die zum gleichen  $k_m$ -Wert führenden Investitionskosten für nur ein Bauelement. Die minimalen Gesamtinvestitionskosten  $K_{I,WD,min}(k_m)$ , mit denen in die Optimierungsrechnung eingegangen wird, ergeben sich danach aus dem Vergleich folgender drei Investitionskosten für jeden  $k_m$ -Wert:

$$K_{I,WD,min,1+2}(k_m), K_{I,WD,1}(k_m), K_{I,WD,2}(k_m).$$

Da es im allgemeinen für jedes der beiden Bauelemente mehrere Ausführungsöglichkeiten mit entsprechend unterschiedlichen Investitionskosten gibt, können in diesem Fall die minimalen Gesamtinvestitionskosten  $K_{I,WD,min}(k_m)$  durch Vergleich folgender Investitionskosten ermittelt werden:

$$K_{I,WD,min,1+2,1,m}(k_m) \quad l = 1, \dots, n_1; m = 1, \dots, n_2$$

$$K_{I,WD,1,1}(k_m)$$

$$K_{I,WD,2,2,m}(k_m)$$

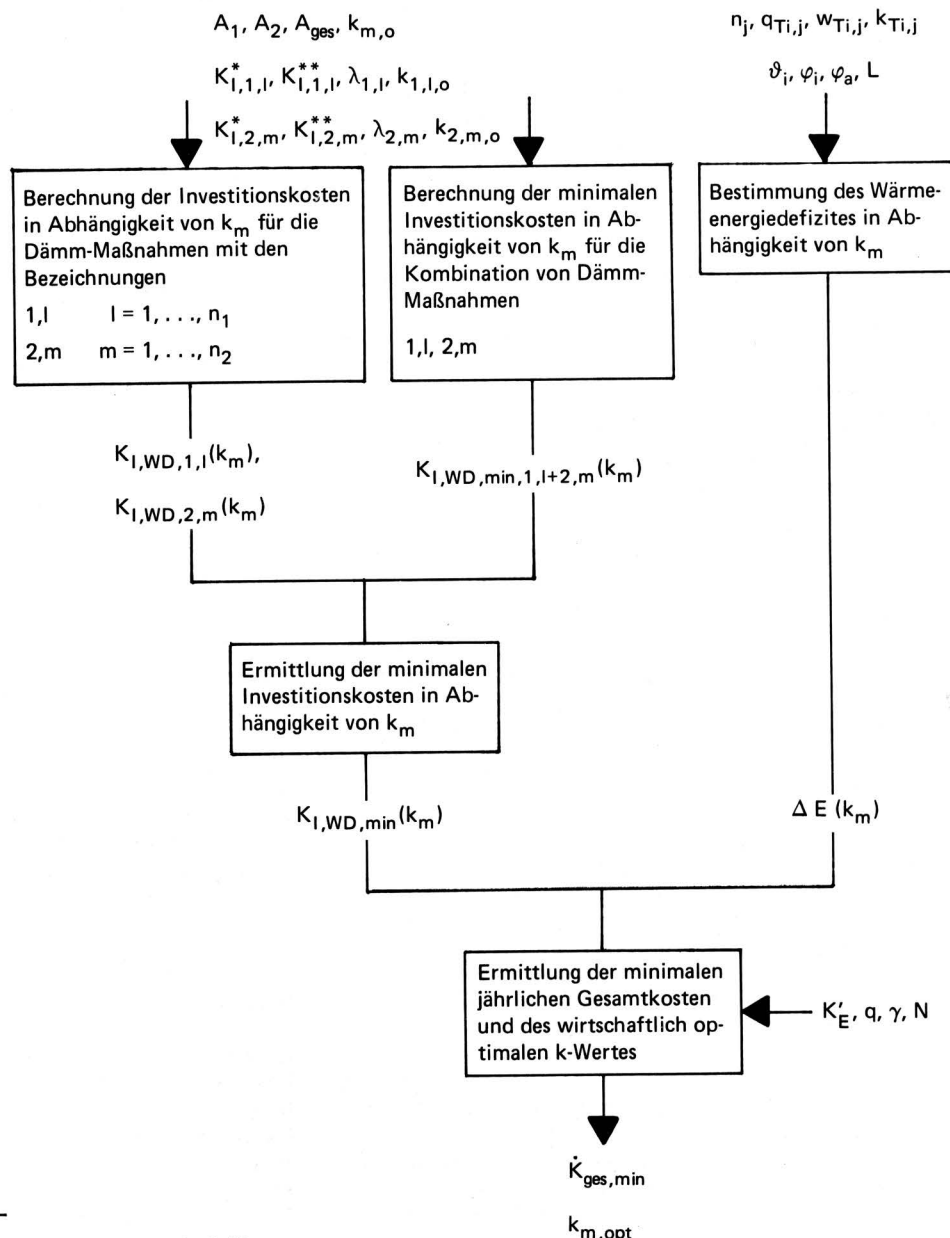
### 3.4 Wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung

Mit den minimalen Gesamtinvestitionskosten nach 3.3 und Gl. (6) ergibt sich aus Gl. (2) für die jährlichen Gesamtkosten beim Ausgleich des Wärmehaushalts über die Wärmedämmung und Heizung (mit  $T, L = \text{konst.}$ ):

$$\dot{K}_{I,ges}(k_m) = K_{I,WD,min}(k_m)a_N + K_{I,H}a_N + \dot{K}_{W,WD} + \dot{K}_{W,H} + \Delta E(k_m)K'_E \quad (11)$$

Die minimalen jährlichen Kosten und damit der wirtschaftlich optimale k-Wert lassen sich über Gl. (11) iterativ ermitteln, indem  $k_m$ , von einem bestimmten Wert ausgehend, stufenweise verkleinert wird. Die dem optimalen  $k_m$ -Wert zugeordneten Bauelementausführungen und die wirtschaftlich optimale k-Wert Kombination bzw. Verteilung von Dämmschichtdicken können über die minimalen Gesamtinvestitionskosten bestimmt werden.

**Bild 1.** Struktur des EDV-Rechenprogrammes für die wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Ställen.



### 3.5 EDV-Rechenprogramm

Für das gesamte Rechenverfahren zur wirtschaftlichen Optimierung der Wärmedämmung von Ställen wurde ein EDV-Programm erstellt<sup>1)</sup>, das zwei Bauelemente einbezieht und dessen Struktur aus Bild 1 zu ersehen ist. Der  $k_m$ -Wert wird bei diesem Programm in folgenden Stufen verändert:

$2 \geq k_m > 1$	$\Delta k_m = 0,0200$
$1 \geq k_m > 0,5$	$\Delta k_m = 0,0100$
$0,5 \geq k_m > 0,35$	$\Delta k_m = 0,0020$
$0,35 \geq k_m > 0,25$	$\Delta k_m = 0,0010$
$0,25 \geq k_m > 0,20$	$\Delta k_m = 0,0005$

Es lassen sich bis zu 5 Bauelement-Kombinationen und bis zu 5 verschiedene Stallbelegungen in einem Programmablauf verarbeiten, und zwar unter Einbeziehung der in [6] vorgestellten Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur für die Standorte Oberstdorf, München und Hamburg.

<sup>1)</sup> Für die Erstellung des EDV-Programmes sei auch an dieser Stelle Herrn Wendl (Landtechnik Weihenstephan) gedankt.

#### 4. Rechenbeispiel: Untersuchung der Auswirkung verschiedener Einflußgrößen auf die minimalen jährlichen Kosten

##### 4.1 Berechnungsannahmen, untersuchte Einflußgrößen

Um das Rechenverfahren zur wirtschaftlichen Optimierung der Wärmedämmung zu veranschaulichen, aber auch um für weitergehende Untersuchungen Informationen darüber zu haben, welche Einflußgrößen sich besonders stark auf die minimalen Jahreskosten auswirken, wurde mit Hilfe des in 3.5 vorgestellten EDV-Programmes untersucht, wie sich die minimalen jährlichen Kosten mit Variation verschiedener Einflußgrößen verändern.

Die Berechnungen erfolgten für ein Stallgebäude mit den Außenabmessungen 30 x 12,5 x 3,5 m, bei dem zunächst im Deckenbereich eine Holzbalkendecke und im Wandbereich 24 cm Mauerwerk aus Lochziegeln der Rohdichteklasse 1200 kg/m<sup>3</sup> vorhanden waren. Der weitere Aufbau und die Werte der Flächen und Wärmedurchgangskoeffizienten dieses Modellstalles gehen aus **Tafel 1** hervor.

Den Aufbau und die entsprechenden Rechenwerte der verschiedenen, zunächst bei der Berechnung der minimalen Gesamtinvestitionskosten berücksichtigten Wärmedämmmaßnahmen enthält die **Tafel 2**. Die in Abhängigkeit vom mittleren k-Wert für die insgesamt 4 möglichen Maßnahmen-Kombinationen berechneten minimalen Investitionskosten sind in **Bild 2** dargestellt. Es zeigt sich, daß die Investitionskosten mit abnehmendem k<sub>m</sub>-Wert ansteigen, und zwar besonders stark bei k<sub>m</sub>-Werten unterhalb 0,4–0,5 W/m<sup>2</sup>K. Bis zu einem k<sub>m</sub>-Wert von 1,0 W/m<sup>2</sup>K (Dämmmaßnahme D2) bzw. 0,9 W/m<sup>2</sup>K (D1) erfordert die Wärmedämmung allein im Deckenbereich die geringsten Investitionskosten. Bei kleineren k<sub>m</sub>-Werten sind Wärmedämmmaßnahmen sowohl im Decken- wie im Wandbereich kostengünstiger.

Bei den weiteren Untersuchungen war nur noch die Kombination D1/W1 in die Berechnungen einbezogen. Untersucht wurde die Auswirkung der

- technischen Einflußgröße L,
- betrieblichen Einflußgrößen n, φ<sub>i</sub>, θ<sub>i</sub>,
- tierspezifischen Einflußgrößen q<sub>Ti</sub>, w<sub>Ti</sub> und
- wirtschaftlichen Einflußgrößen γ, N.

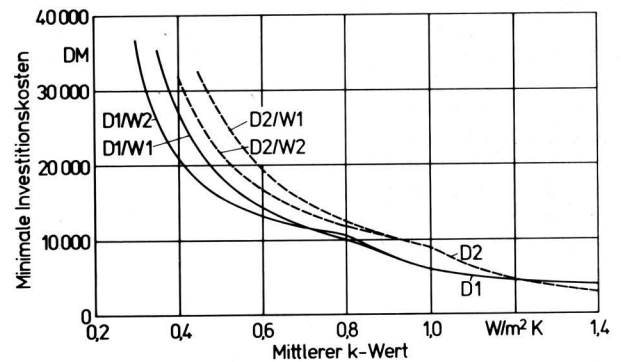
Bei konstant gehaltenen übrigen Größen wurden die genannten Einflußgrößen variiert und die minimalen jährlichen Kosten für den Standort München bei Belegung des Stalles mit Milchkühen, Mastbullen und Mastkälbern mit den Werten der **Tafel 3** berechnet.

Bauelement	Aufbau	Fläche A m <sup>2</sup>	Wärmedurchgangskoeffizient k W/m <sup>2</sup> K
Decke	Holzbalkendecke mit Bretterboden im Dachraum	355	4,00
Wand	24 cm Mauerwerk aus Lochziegeln der Rohdichteklasse 1200 kg/m <sup>3</sup> (λ <sub>R</sub> = 0,52 W/mK); 1,5 cm Innenputz (λ <sub>R</sub> = 0,87 W/mK)	230	1,45
Fenster	16 mm dicke Plexiglas-Stegdoppelplatten (k = 3,2 W/m <sup>2</sup> K)	35	3,2
Tore	4 cm Polystyrol-Partikelschaum (λ <sub>R</sub> = 0,04 W/mK) 2 x 1,2 cm Sperrholz (λ <sub>R</sub> = 0,14 W/mK)	25	0,72
	Werte für die Gesamtfläche	645	2,92

Werte für λ<sub>R</sub> nach DIN 4108

α<sub>i</sub> = 6 W/m<sup>2</sup>K; α<sub>a</sub> = 23 W/m<sup>2</sup>K bei Wand und Toren; α<sub>a</sub> = 12 W/m<sup>2</sup>K bei der Decke

**Tafel 1.** Aufbau und Rechenwerte des Modellstalles mit den Außenabmessungen: 30 m x 12,5 m x 3,5 m.



**Bild 2.** Minimale Investitionskosten bei Durchführung verschiedener Dämmmaßnahmen in Abhängigkeit vom mittleren k-Wert der Stallhülle; Daten der Dämmmaßnahmen D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub> nach **Tafel 2**.

Wärmedämmmaßnahme	Aufbau		Wärmeleitfähigkeit λ W/mK	Investitionskosten	
	Verkleidung	Wärmedämmstoff		flächenbezogen (Verkleidung) DM/m <sup>2</sup>	volumenbezogen (Wärmedämmstoff) DM/m <sup>3</sup>
D1	Holzverschalung als Innenverkleidung (auf Schattenfuge verlegt), Polyäthylen-Folie als Dampfbremse	Blähperlit (Superlite)	0,052	8	100
D2	—	Platten aus Polystyrol-Extruderschaum	0,035	—	420
W1	Holzverschalung als Außenverkleidung (überluchte Schalung)	Mineralfaserplatten	0,040	10	460
W2	11,5 cm Ziegel als Vorsatzmauer	Blähperlit (Hyperlite)	0,052	18	130

**Tafel 2.** Aufbau und Rechenwerte der untersuchten Wärmedämmmaßnahmen (Preisangaben nach Stand: 1.10.1980).

Art der Stallnutzung	Anzahl der Tiere n	Tiermasse kg	Rechenwerte der DIN 18910					rel. Feuchte der Stallluft $\varphi_i$ %
			Wärmeleistung je Tier $q_{Ti}$ W	Wasserdampfanfall je Tier $w_{Ti}$ g/h	Kohlendioxidanfall je Tier $k_{Ti}$ l/h	Stalltemperatur $\vartheta_i$ °C		
Milchkühe (ohne Nachzucht)	48	600	986	356	146	10	80	
Mastbullen	100	400	766	314	116	16	80	
Mastkälber	160	100	261	159	41	18	70	

Tafel 3. Rechenwerte bei unterschiedlicher Nutzung des Modellstalles.

Die in Bild 3 bis 6 und in Tafel 4 bis 6 zusammengefaßten Ergebnisse gelten für folgende weitere Rechenwerte:

Energiepreis:  $K'_E = 72 \text{ DM/MWh}$  (entspricht etwa dem jetzigen Energiepreis auf Heizölbasis)

Zinssatz:  $i = 8 \%$

rel. Feuchte des Außenraumes:  $\varphi_a = 100 \%$  (entspricht DIN 18910 [9]).

Die Bilder 3 und 4 dienen zur Illustration der auch in den Tafeln 4 bis 6 enthaltenen Ergebnisse für die Belegung des Stalles mit Mastkälbern.

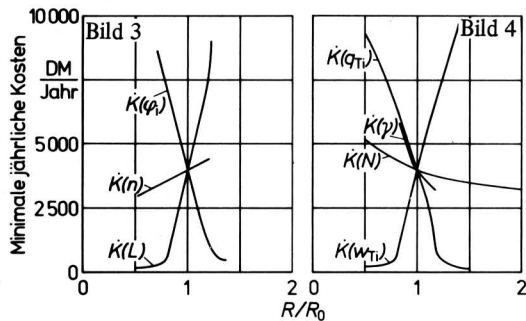


Bild 3 und 4. Minimale jährliche Kosten bei Änderung verschiedener Einflußgrößen entsprechend dem Faktor  $R/R_0$ ; Standort München, Mastkälber.

Bild 3. Änderung der Lüftungsrate  $L$ , der rel. Feuchte der Stallluft  $\varphi_i$  und der Tierzahl  $n$ . Ausgangswert  $R_0$ :  $L = 1$ ;  $\varphi_i = 70 \%$ ;  $n = 160$

Bild 4. Änderung der Nutzungsdauer  $N$ , des Energiepreiszufuhrfaktors  $\gamma$ , des Wärmeanfalls  $q_{Ti}$  und des Wasserdampfanfalls  $w_{Ti}$ . Ausgangswert  $R_0$ :  $N = 20$  Jahre  $q_{Ti} = 261 \text{ W}$   $w_{Ti} = 159 \text{ g/h}$   $\gamma = 1,2$

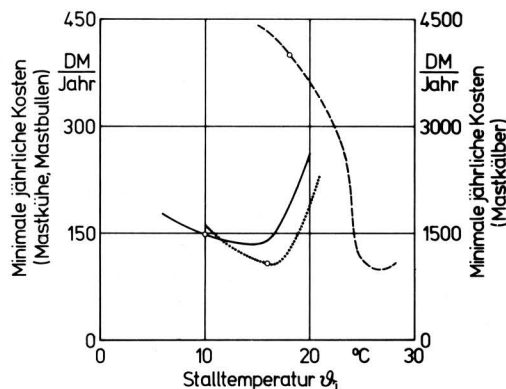


Bild 5. Minimale jährliche Kosten in Abhängigkeit von der Stalltemperatur; Standort München, Pfeile kennzeichnen Rechenwerte nach DIN 18910.

— Milchkühe    ... Mastbullen    -- Mastkälber

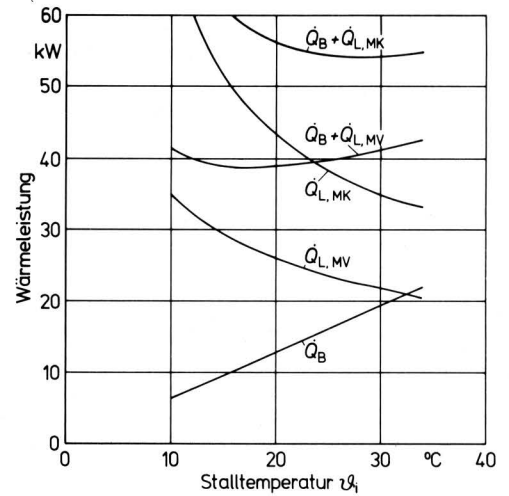


Bild 6. Abgeführte Wärmeleistungen infolge von Transmission  $\dot{Q}_B$  und infolge der Lüftung  $\dot{Q}_L$  als Funktion der Stalltemperatur für Mastkälber (MK) und Milchkühe (MV);  $\vartheta_a = 0 \text{ °C}$ ,  $k = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

R/R <sub>0</sub>	Minimale jährliche Kosten (DM/Jahr) bei Änderung von								
	Lüftungswärmefakt. L			Wärmeanf. d. Tiere $q_{Ti}$			Wasserdampfanf. $w_{Ti}$		
	Kühe	Bullen	Kälber	Kühe	Bullen	Kälber	Kühe	Bullen	Kälber
0,5	62	54	132	2739	6384	9142	75*	94*	212
0,6	67	57	210	2137	4109	8486	75*	94*	224
0,7	76	62	298	1389	1682	7557	76	94*	296
0,8	89	70	529	444	356	6472	89	94*	524
0,9	110	83	2329	248	192	5299	110	94*	2474
1,0	148	109	4007	148	109	4007	148	109	4007
1,1	216	161	5815	103	78	2695	217	160	5529
1,2	306	259	7515	81	65	644	306	259	6937
1,3	587	398	9401	70	58	348	592	396	8342
1,4	1777	817	11287	63	55	248	1328	828	9649
1,5	2635	3560	13173	58	53	174	1933	2873	10937

R: Rechenwert

$R_0$ : Ausgangs-Rechenwert ( $L = 1$ ,  $q_{Ti}$  und  $w_{Ti}$  nach Tafel 3)

\* Berechnung der Abluftrate nach dem Kohlendioxidhaushalt

Tafel 4. Auswirkung von Veränderungen (entsprechend Faktor  $R/R_0$ ) des Lüftungswärmefaktors, des Wärme- und des Wasserdampfanfalls der Tiere auf die minimalen jährlichen Kosten; Standort München.

#### 4.2 Veränderungen technischer und betrieblicher Einflußgrößen

Die Ergebnisse der Tafel 4 machen deutlich, daß sich eine überdimensionierte oder auf zu hohe Abluftraten falsch eingestellte Lüftung (Lüftungswärmefaktor  $L > 1$ ) in allen Fällen sehr stark auf die minimalen Jahreskosten auswirkt. Die Rückgewinnung von Lüftungswärme ( $L < 1$ ) führt dagegen nur im Mastkälber-Stall zu einer, dann allerdings deutlichen Kostensenkung.

Die sich in Tafel 5 zeigende Auswirkung niedriger relativer Stallfeuchten  $\varphi_i$  hat für die Praxis bei der Belegung des Stalles mit Milchkühen und Mastbullen keine große Bedeutung, da die DIN 18910 einen Rechenwert von 80 % vorgibt. Bemerkenswert ist aber, daß bei Nutzung des Stalles für Mastkälber ein  $\varphi_i$ -Rechenwert von 80 % statt des DIN-Wertes von 70 % zu einer Kostensenkung von etwa 43 % führen würde.

$\varphi_i$ %	minimale jährl. Kosten DM/Jahr			$\gamma$	minimale jährl. Kosten DM/Jahr			N Jahre	minimale jährl. Kosten DM/Jahr		
	Kühe	Bullen	Kälber		Kühe	Bullen	Kälber		Kühe	Bullen	Kälber
50	2102	6791	8580	1,00	552	480	5828	10	386	326	5185
60	1719	356	6298	1,08	338	282	4982	20	148	109	4007
70	248	165	4007	1,16	195	152	4284	30	71	46	3496
80	148	109	1739	1,20	148	109	4007	40	30	22	3222
90	113	107	639	1,24	112	78	3777	50	13	9	3067
96	102	115*	506	1,32	61	40	3438				
				1,40	30	21	3221				

\* Berechnung mit der Sommerablufrate

Tafel 5. Minimale jährliche Kosten bei Ansatz verschiedener Werte für die rel. Luftfeuchte im Stall  $\varphi_i$ , für den Energiepreisstörungs-faktor  $\gamma$  und Nutzungsdauer N; Standort München.

n	Milchkühe	n	Mastbullen	n	Mastkälber
	minimale jährl. Kosten DM/Jahr		minimale jährl. Kosten DM/Jahr		minimale jährl. Kosten DM/Jahr
23	289	50	240	80	2972
28	253	60	203	96	3179
33	225	70	165	112	3386
38	190	80	140	128	3593
43	166	90	122	144	3800
48	148	100	109	160	4007
53	134	110	99	176	4214
58	123	120	92	192	4421

Tafel 6. Minimale jährliche Kosten bei Veränderung der Belegungs-dichte; Standort München.

Auf den ersten Blick überraschend sind die aus Bild 5 zu ersehen- den Minimalwerte der jährlichen Kosten bei Veränderung der Stalltemperatur  $\varphi_i$ . Bei Milchkühen liegt der Minimalwert bei 15 °C (Rechenwert nach DIN 18910: 10 °C), bei Mastbullen bei 16 °C (Rechenwert: 16 °C) und bei Mastkälbern bei 27 °C (Re- chenwert: 18 °C). Eine Temperaturerhöhung über die DIN-Re- chenwerte hinaus führt also bei Belegung des Stalles mit Milchkü- hen und Mastkälbern nicht zu höheren Jahreskosten, es wird viel- mehr erst bei höheren Temperaturen ein Minimalwert erreicht. Die Erklärung dafür ist, daß mit zunehmender Stalltemperatur zwar die Transmissionswärmeverluste linear ansteigen, daß aber die Lüftungswärmeverluste kleiner werden, da die Stall-Luft, bei gleichbleibender relativer Feuchte, immer mehr Wasserdampf auf- nehmen kann, so daß entsprechend weniger Wasserdampf über die Lüftung abgeführt werden muß. Das Bild 6 zeigt diese Abhängig- keiten von der Stalltemperatur für den Fall der Belegung mit Milchkühen und Mastkälbern.

Während bei Milchkühen und Mastbullen die minimalen jährlichen Kosten mit zunehmender Tierzahl n kleiner werden (Tafel 6), stei- gen sie bei Mastkälbern an, da diese Tiere weniger Wärme erzeugen als bei niedrigen Temperaturen über die Lüftung abgeführt werden muß, um den Wasserdampfgehalt unter dem vorgegebenen Grenz- wert zu halten [6].

#### 4.3 Veränderungen tierspezifischer und wirtschaftlicher Einflußgrößen

Der aus den Werten der Tafel 4 zu ersehende starke Einfluß der tierspezifischen Größen für den Wärme- und Wasserdampfanfall der Tiere erhält seine besondere Bedeutung da- durch, daß die in der DIN 18910 festgelegten Werte in letzter Zeit kontrovers diskutiert werden [6]. Die vorliegende Untersuchung un- terstreicht die Notwendigkeit weiterer Arbei- ten zur Festlegung geeigneter tierspezifischer Werte.

Bemerkenswert ist der nach Tafel 5 doch relativ geringe Einfluß von Veränderungen der wirtschaftlichen Größen Energiepreis- steigerungsrate  $\gamma$  und Nutzungsdauer N.

#### 5. Zusammenfassung

Die für den Ausgleich des Wärmehaushalts von Ställen sich anbie- tenden technischen Maßnahmen Wärmedämmung der Stallhülle sowie Rückgewinnung von Lüftungs- und Transmissionswärme er- fordern Investitionen und verursachen jährliche Betriebskosten. Der Ausgleich des Wärmehaushalts muß daher auch auf seine Wirt- schaftlichkeit hin untersucht werden und es gilt, die wirtschaft- lichste Kombination der technischen Maßnahmen zu finden.

Für diese Aufgabe einer wirtschaftlichen Optimierung ist die Mi- nimierung der jährlichen Gesamtkosten für den Ausgleich des Wär- mehaushalts als Rechenmethode am besten geeignet. Aus einem zunächst alle technischen Maßnahmen erfassenden Optimierungs- ansatz wird für den Spezialfall, daß der Bilanzausgleich nur über die Wärmedämmung und die Heizung erfolgt, ein Rechenverfah- ren abgeleitet und ein entsprechendes EDV-Programm vorgestellt. Es ist dabei berücksichtigt, daß die Stallhülle aus mehreren Bau- elementen besteht, für die es im allgemeinen verschiedene Aus- führungsmöglichkeiten mit entsprechend unterschiedlichen Inve- stitionskosten gibt.

Eine mit dem EDV-Programm durchgeführte Untersuchung der Auswirkung technischer und betrieblicher Einflußgrößen sowie von Veränderungen in den tierspezifischen und wirtschaftlichen Rechenwerten auf die minimalen jährlichen Kosten unterstreicht die Bedeutung weiterer Untersuchungen über die Größe des Was- serdampf- und Wärmefalls der Tiere.

#### Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [ 1 ] Nilsson, Chr. u. Kr. Sällvik: Beräkning av energieförbruk- ning för uppvärmning och ekonomiskt val av värmeisolering in svinstallar. Lund: Sveriges Lantbruksuniversitet, Specialmeddelande 66, Institutionen för Lantbrukets Byggnadsteknik (LBT) 1977.
- [ 2 ] Christianson, L.L. u. M.A. Hellickson: Simulation and optimization of energy requirements for livestock housing. Transactions ASAE Bd. 20 (1977) Nr. 2, S. 327/35.
- [ 3 ] Werner, H. u. K. Gertis: Zur Wahl von Kalkulationsmetho- den bei der Ermittlung der Wirtschaftlichkeit von Energie- sparmaßnahmen. Baumasch. u. Bautechnik (BMT) Bd. 26 (1979) Nr. 2, S. 65/66, 69/72.
- [ 4 ] Werner, H.: Methoden zur wirtschaftlichen Optimierung von Wärmedämm-Maßnahmen. Bauphysik Bd. 2 (1980) Nr. 5, S. 167/69.
- [ 5 ] ●Schneider, E.: Wirtschaftlichkeitsrechnung-Theorie der Investition. Tübingen: J.C.B. Mohr 1968.

[ 6 ] Englert, G.: Ein Rechenmodell für die Wärmeenergiebilanz von Ställen.  
Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 5, S. 170/74.

[ 7 ] Englert, G.: Wirtschaftlich optimale Wärmedämmung von Biogasanlagen.  
Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 3, S. 77/80.

[ 8 ] Englert, G.: Zur Berechnung minimaler Investitionen für die Wärmedämmung.  
Bauphysik Bd. 2 (1980) Nr. 6, S. 213/17.

[ 9 ] DIN 18910 "Klima in geschlossenen Ställen: Wasserdampf- und Wärmehaushalt im Winter, Lüftung, Beleuchtung".  
Berlin: Beuth-Verlag 1974.

## Schutz von Großraumviehställen gegen Sonneneinstrahlung im Sommer

Von Karol Janáč, Bratislava\*)

DK 631.22:536.24:536.3

Bei den Bemühungen um ein tiergerechtes Stallklima kommt der Wärmedämmung der Stallhülle und der Wärmereflexion und -absorption der Wand- und Dachflächen eine wichtige Rolle zu.

Die Arbeit behandelt eine Methode zur Messung der Reflexion von Wärmestrahlung an Baustoffen und gibt das Ergebnis zahlreicher Messungen zum Reflexionsgrad verschiedener Baustoffe wieder. Temperaturmessungen an ausgeführten Stallbauten belegen, daß mit der Auswahl geeigneter Materialien auch in Großraumviehställen mit leichter Stallhülle tiergerechte Klimaverhältnisse geschaffen werden können.

### 1. Einleitung

Die Einführung industriemäßig organisierter Arbeitsformen in die tierische Produktion erfordert die Errichtung von Großraumviehställen. Im Interesse einer rationellen Nutzung der einheimischen Rohstoffquellen wird das Spektrum der eingesetzten Baustoffe zielgerecht durch Baukonstruktionen unter Verwendung von Matten und Platten auf Holz-, Metall- und Mineralbasis erweitert. Je nach der Art der verwendeten Baustoffe unterscheidet man Bauweisen mit mittelschweren und leichten Außenwandkonstruktionen.

Bauten mit einem leichten Außenmantel stellen hohe Ansprüche an die wärmetechnische Auslegung nicht nur im Hinblick auf winterliche Verhältnisse, sondern vor allem im Hinblick auf den Schutz des Innenraumes vor sommerlicher Überhitzung als Folge der Sonneneinstrahlung (Insolation). Eine Möglichkeit des Sonnenschutzes bietet sich mit der Ausnutzung der optischen Eigenschaften der Baustoffe an. Um diese jedoch in geeigneter Weise praktisch nutzen zu können, muß für jeden Baustoff der Wärmeabsorptions-, -reflexions- und -emissionsgrad bestimmt werden. Da man dieser Problematik in der ČSSR bisher kaum Aufmerksamkeit gewidmet hat, werden in dem vorliegenden Beitrag einige neue Erkenntnisse dargestellt [1].

\*) Dr. sc. Ing. K. Janáč ist Dozent am Institut für Bauwesen und Architektur der Slowakischen Akademie der Wissenschaften in Bratislava.

### 2. Einfluß optischer Eigenschaften von Baustoffen auf den Wärmedurchgang durch die Außenwandkonstruktion von Ställen

Bei der Berechnung des Wärmehaushalts von Gebäuden für die tierische Produktion muß man eine größere Genauigkeit anstreben, als es durch Ansetzen von einigen empirischen durchschnittlichen Koeffizienten möglich ist, die sich häufig auf die Bedingungen von Wohngebäuden beziehen. Beispielsweise muß der als stationär geltende Wärmeübergangskoeffizient für die innere Oberfläche der Außenwand für Wohngebäude mit einem Wert  $a_i = 8,14 \text{ W/m}^2\text{K}$  und für Ställe mit  $8,72 \text{ W/m}^2\text{K}$  angesetzt werden.

Bei dieser Bestimmung des Wertes  $a_i$  für Ställe wird angenommen, daß zwischen der inneren Oberfläche einer Außenwand (Temperatur  $\vartheta_{wi}$ ) und den ihr zugewandten Gegenständen, die die gleiche Temperatur  $\vartheta_i$  wie die Luft im Raum besitzen, ein Wärmeaustausch durch Strahlung eintritt. Dabei setzt man voraus, daß die Oberflächen, zwischen denen der Wärmeaustausch stattfindet, gewissermaßen zwei parallele Flächen gleicher Größe bilden [2]. Man erhält dann für den Wärmeübergangskoeffizienten:

$$a_i = a_{ik} + a_{is} \quad (1),$$

mit

$a_{ik}$  Koeffizient für den Wärmeübergang durch Konvektion  
 $a_{is}$  Koeffizient für den Wärmeübergang durch Strahlung.

Unter den Bedingungen des Wärmeaustausches im Innenraum von Ställen gelten jedoch die angeführten Voraussetzungen nur annähernd, vor allem dann, wenn der Raum nur durch die Körperwärme der Tiere geheizt wird. Das Wärmegefälle von der Oberfläche der Hauptstrahlungsquelle, d.h. den Oberflächen der eingestellten Tiere, zur Innenfläche der Wand kann in Wirklichkeit eine Höhe von 30–35 °C erreichen, und die Oberflächen, zwischen denen der Wärmeaustausch vor sich geht, sind weder gleich groß noch parallel. Deshalb kann bei den gegebenen Bedingungen besser ausgegangen werden von der Beziehung:

$$\dot{Q}_{iw} = \dot{Q}_{ik} + \dot{Q}_{is} \quad (2),$$

darin ist

$\dot{Q}_{iw}$  Gesamtwärmestrom auf die Innenfläche der Wand  
 $\dot{Q}_{ik}$  Wärmestrom auf die Innenfläche der Wand infolge Konvektion  
 $\dot{Q}_{is}$  Wärmestrom auf die Innenfläche der Wand infolge Strahlung.