

Bild 11. Anteile der Teilzeiten bei verschiedenen Schlepperarbeiten.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] • Gindele, E.H.: Die Bedeutung agrarstruktureller Elemente für eine rationelle Arbeitserledigung in der Feldwirtschaft. KTBL-Schrift 156. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1972.
- [2] Söhne, W.: Allrad- oder Hinterradantrieb bei Ackerschleppern. Grndl. Landtechnik (1964) H. 20, S. 44/52.
- [3] Steinkamp, H.: Ermittlung von Reifenkennlinien und Gerätezugleistungen für Ackerschlepper. Landbauforschung Völkenrode, Sh. 27 (1975); Diss. TU Braunschweig 1974.
- [4] Jahns, G. u. H. Steinkamp: Einflußgrößen auf Flächenleistung und Energieaufwand beim Schleppereinsatz. Grndl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 1, S. 20/27.
- [5] Stoppel, A. u. W. Schäfer: Maximierung der Schlagkraft beim Pflügen durch stufenlose Arbeitsbreitenverstellung. Grndl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 6, S. 205/210.

Zur Wirtschaftlichkeitsprüfung des Einsatzes von Luft/Luft-Wärmetauschern in Ställen

Von Gerhard Englert, Freising-Weißenstephan*)

Aus den Arbeiten des Sonderforschungsbereiches 141 "Produktionstechniken der Rinderhaltung"

DK 699.86.003.1

Für den Ausgleich von Defiziten in der Wärmeenergiebilanz von Ställen hat in den letzten Jahren als Alternative zur Heizung neben der Wärmedämmung der Stallhülle auch die Rückgewinnung von Abwärme in Luft/Luft-Wärmetauschern großes Interesse gefunden. Obwohl etwa 2/3 des Gesamtwärmeverlustes eines Stalles als Abwärme über die Lüftung verlorengeht, fand diese Energiequelle erst verstärkte Aufmerksamkeit, als sie durch steigende Energiepreise wirtschaftlich interessant wurde.

Die Wirtschaftlichkeitsprüfung von Luft/Luft-Wärmetauschern für Ställe beschränkte sich bisher auf die Kostenanalyse einzelner Anlagen. Diese Arbeit stellt nun rechnerische Grundlagen für die Wirtschaftlichkeitsprüfung des Einsatzes von Luft/Luft-Wärmetauschern in Ställen als Alternative zur Heizung und Wärmedämmung zusammen und veranschaulicht die damit gegebenen Möglichkeiten anhand von Beispielen.

*) Dipl.-Phys. Dr. G. Englert ist akademischer Oberrat an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik, Freising-Weißenstephan.

1. Einleitung

Noch vor einem Jahrzehnt wurden die im Winter unterhalb bestimmter Außentemperaturen in Ställen entstehenden Defizite in der Wärmeenergiebilanz ($\Delta\dot{Q}$) im Normalfall mit einer Heizung, also durch von einer Heizung erzeugte Wärmeenergie, ausgeglichen, um die Stalltemperatur konstant zu halten. In der gebräuchlichen Bilanzgleichung für die Wärmeleistungsbilanz eines Stalles:

$$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{Ti} - \dot{Q}_B - \dot{Q}_L \quad (1)$$

blieben also die Größen

- \dot{Q}_{Ti} von den Tieren erzeugte Wärmeleistung
- \dot{Q}_B über die Bauteile der Stallhülle abfließende Transmissions-Wärmeleistung
- \dot{Q}_L durch den Luftwechsel abgeführte Lüftungs-Wärmeleistung

zunächst unverändert. Als Folge der steigenden Energiepreise fanden dann in den letzten Jahren die Maßnahmen zur Wärmedämmung der Stallhülle (Veränderung von \dot{Q}_B) und die Rückgewinnung von Abwärme in Luft/Luft-Wärmetauschern (Veränderung von \dot{Q}_L) als Möglichkeiten zur Einsparung von Heizenergie großes Interesse.

Die für diese Einsparungen maßgebenden Kenngrößen sind bei der Wärmedämmung der mittlere k-Wert der Stallhülle k_m und bei den Wärmetauschern die Rückwärmzahl Φ_2 . Entsprechend der Gleichung für den Wärmeabfluß durch die Bauteile:

$$\dot{Q}_B = k_m A_{ges} (\vartheta_i - \vartheta_a) \quad (2)$$

mit
 \dot{Q}_B Wärmestrom durch die Bauteile (W)
 k_m Wärmedurchgangskoeffizient, Mittelwert (W/K m²)
 A_{ges} Gesamtfläche der Bauteile (m²)
 ϑ_i Innentemperatur (°C)
 ϑ_a Außentemperatur (°C)

gibt der mittlere k-Wert an, welcher mittlere Wärmestrom durch 1 m² der Stallhülle abfließt, wenn zwischen Stall und Außenraum ein Temperaturunterschied von 1 K besteht. Durch Wärmedämmmaßnahmen in den Bauteilen der Stallhülle wird der Wärmestrom und damit der k-Wert verringert, die Wärmeenergiebilanz des Stalles verbessert und so der Heizenergiebedarf reduziert. Zu dem gleichen Ziel führt die Erwärmung der Zuluft in einem Luft/Luft-Wärmetauscher. Die Rückwärmzahl

$$\Phi_2 = \frac{\vartheta_{22} - \vartheta_{21}}{\vartheta_{11} - \vartheta_{21}} \quad (3)$$

mit
 Φ_2 Rückwärmzahl, definiert für die wärmeaufnehmende Seite (Außenluft)
 ϑ_{22} Temperatur der Außenluft beim Austritt aus dem Wärmetauscher
 ϑ_{21} Temperatur der Außenluft beim Eintritt in den Wärmetauscher (entspricht Außenlufttemperatur ϑ_a)
 ϑ_{11} Temperatur der Fortluft (Stallabluft) beim Eintritt in den Wärmetauscher (entspricht Stalltemperatur ϑ_i)

ist abhängig von der Bauart des Wärmetauschers und ist außerdem abhängig vom Volumenstrom der Lüftung ($\Phi_2 = f(\dot{V}_L)$). Φ_2 gibt der Definition entsprechend an, welcher Teil der Temperaturdifferenz zwischen Stallluft und Außenluft für die Aufwärmung der dem Stall zugeführten Außenluft im Wärmetauscher genutzt wird. Durch verschiedene Möglichkeiten der Wärmedämmung (verschiedene mittlere k-Werte) und der Wärmerückgewinnung (verschiedenartige Wärmetauscher) bzw. durch Kombinationen dieser Möglichkeiten läßt sich dann praktisch ein ganzes Spektrum der Heizkosteneinsparung erreichen, und es stellt sich die Frage, ob überhaupt eine dieser Einsparmöglichkeiten – und, wenn ja, welche – im Einzelfall sinnvoll ist. Eine Antwort darauf ist nur über eine Wirtschaftlichkeitsrechnung zu finden, da bei Durchführung der Wärmedämmmaßnahmen und beim Einsatz der Wärmetauscher Investitionen und laufende Betriebskosten anfallen. Außerdem sind bestimmte Nutzungszeiträume (Haltbarkeiten) für diese technischen Einrichtungen zu beachten. Die Maßnahmen zur Einsparung von Heizenergie werden nur dann sinnvoll sein, wenn sie dazu beitragen, daß ein gegebener Wärmeenergiebedarf, wie hier zum Ausgleich der Wärmeenergiebilanz von Ställen, in wirtschaftlicherer Weise abgedeckt werden kann, als dies allein mit Heizenergie möglich ist. Die sinnvollste Investition wird sich entsprechend durch größtmögliche Wirtschaftlichkeit beim Ausgleich des Wärmeenergiebedarfs auszeichnen.

Daß nun zunächst nur Wärmedämmmaßnahmen verstärkt durchgeführt wurden, erklärt sich außer mit deren Wirtschaftlichkeit auch daraus, daß dafür seit vielen Jahren eingeführte Baustoffe und Konstruktionen zur Verfügung standen. Zudem waren deren k-Werte bekannt, und für ihre Haltbarkeit lagen durch Praxiserfahrungen einigermaßen abgesicherte Daten vor. Für viele Luft/Luft-Wärmetauscher dagegen mußte dieses grundlegende Datenmaterial für die Dimensionierung und Wirtschaftlichkeitsprüfung noch erarbeitet werden. Dies gilt besonders für die auch zum Selbstbau geeigneten Einfach-Wärmetauscher [1], die gerade für den Einsatz in Ställen entwickelt wurden. Weiterhin war und ist zu überprüfen, wie sich stallspezifische Einflußfaktoren (z.B. der Staub- und Schadgasgehalt sowie die hohe Feuchte der Stallluft) auf die technischen Kenngrößen der Wärmetauscher auswirken.

Dieser unterschiedliche Kenntnisstand war der Grund, warum zunächst nur für die Heizeregieeinsparung durch Wärmedämmmaßnahmen ein universell anwendbares Rechenverfahren der Wirtschaftlichkeitsprüfung ausgearbeitet wurde [2]. Die Wirtschaftlichkeitsprüfung der Rückgewinnung von Abwärme ist dagegen bis jetzt über Kostenanalysen einzelner Einsatzfälle von Luft/Luft-Wärmetauschern [3, 4] nicht hinausgekommen. Da nun aber zumindest die technischen Kennwerte der wichtigsten, für den Einsatz im Stall in Frage kommenden Luft/Luft-Wärmetauscher vorliegen [5] – über die Haltbarkeit können auch weiterhin nur Annahmen gemacht werden –, ist es angebracht, jetzt die Rückgewinnung von Abwärme in dem Rechenverfahren der Wirtschaftlichkeitsprüfung von Maßnahmen zur Heizkosteneinsparung mit zu berücksichtigen. Die in der vorliegenden Arbeit zu entwickelnden Rechenverfahren sollen es nun ermöglichen, aus den verschiedenen Möglichkeiten der Wärmedämmung und Rückgewinnung von Abwärme diejenige Maßnahmen-Kombination zu ermitteln, mit der sich die Wärmeenergiebilanz eines Stalles mit größtmöglicher Wirtschaftlichkeit ausgleichen läßt. Der Ausgleich der Wärmeenergiebilanz soll also wirtschaftlich optimiert werden.

Auch wenn die Aussagefähigkeit bei der Wirtschaftlichkeitsprüfung einzelner Investitionen kritischer zu sehen ist als bei der Ermittlung der wirtschaftlichsten Investition aus mehreren Alternativen [6], soll weiterhin für die Wirtschaftlichkeitsprüfung einzelner Luft/Luft-Wärmetauscher ein Rechenverfahren angegeben werden, mit dem sich der Bereich wirtschaftlicher Investitionen in diese Wärmetauscher durch Angabe maximaler Investitionsbeträge abgrenzen läßt. Die Wirtschaftlichkeitsprüfung besteht dann im Vergleich mit dem tatsächlichen Investitionsbedarf.

2. Berechnungsgrundlagen

2.1 Optimierung des Ausgleiches der Wärmeenergiebilanz von Ställen in bezug auf die Wirtschaftlichkeit

Von den verschiedenen Verfahren der Wirtschaftlichkeitsprüfung, mit denen sich bei einer Vielzahl von Möglichkeiten der Energieeinsparung die wirtschaftlichste Lösung für den Ausgleich eines Energiebedarfs ermitteln läßt, soll die Methode der Minimierung der jährlichen Gesamtkosten [7] auch auf das Problem des Wärmeenergiebedarfs von Ställen angewandt werden. Dabei ist diejenige Kombination aus Wärmedämmung, Rückgewinnung von Abwärme und Heizung wirtschaftlich optimal, mit der sich die Wärmeenergiebilanz eines Stalles mit den geringsten jährlichen Gesamtkosten ausgleichen läßt. Diese Methode der Wirtschaftlichkeitsprüfung anhand von jährlichen Kosten entspricht auch den Investitionsmotiven der Landwirte am besten, da sich diese praktisch immer nur dann zu Energiesparmaßnahmen entschließen, wenn ihnen die jährlichen Kosten für die Heizung zu hoch sind.

Die jährlichen Gesamtkosten setzen sich bei dem hier zu betrachtenden Fall von Energiesparmaßnahmen zusammen aus:

- \dot{K}_I Investitionskosten (Kapitalkosten) für die Wärmedämmung, den Luft/Luft-Wärmetauscher und die Heizanlage
- \dot{K}_B Betriebskosten für Instandhaltung, Betriebsstoffe, Unterbringung und Versicherung (Kosten für Betriebsstoffe der Heizung werden als Heizenergiekosten \dot{K}_Q ausgewiesen), die sich aus den Maßnahmen zur Einsparung von Heizenergie und mit der Heizung ergeben.
- \dot{K}_Q Heizenergiekosten, die nach Durchführung der Energiesparmaßnahmen verbleiben: $\dot{K}_Q = \dot{K}_{Q,o} - \dot{K}_{Q,g}$

mit
 $\dot{K}_{Q,o}$ Heizenergiekosten vor Durchführung der Sparmaßnahmen
 $\dot{K}_{Q,g}$ durch die Sparmaßnahmen eingesparte (gewonnene) Heizenergiekosten.

Die jährlichen Heizenergiekosten errechnen sich aus dem Heizenergiepreis K'_Q (DM/kWh) und der jährlich von der Heizung zu erzeugenden Wärmeenergie Q (kWh/Jahr)

$$\dot{K}_Q = K'_Q Q \quad (4)$$

Für den Fall, daß der Zinssatz i im Betrachtungszeitraum von N Jahren konstant bleibt, ergibt sich weiterhin folgender Zusammenhang zwischen den jährlichen Investitionskosten und deren Kapitalwert, dem Investitionsbetrag K_I (DM):

$$\dot{K}_I = a_N K_I \quad (5)$$

mit

$$a_N = \frac{q^N (q - 1)}{q^N - 1} \quad \text{Annuitätenfaktor (1/Jahr)}$$

$$q = 1 + i \quad \text{Zinsfaktor (1/Jahr).}$$

Das Rechenverfahren der wirtschaftlichen Optimierung besteht nun darin, für die verschiedenen möglichen Maßnahmen des Wärmebilanzausgleiches jeweils die jährlichen Gesamtkosten zu bestimmen. Die durch Vergleich ermittelten minimalen jährlichen Gesamtkosten kennzeichnen dann den wirtschaftlich optimalen Ausgleich.

2.2 Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen in Luft/Luft-Wärmetauschern

Für die Fragestellung, ob sich ein bestimmter Luft/Luft-Wärmetauscher in einem Stall wirtschaftlich einsetzen läßt, sind folgende jährliche Kosten zum Ausgleich der Wärmeenergiebilanz des Stalles in die Rechnung einzubeziehen:

$\dot{K}_{\text{ges,H+WD,min}}$ minimale Gesamtkosten beim Bilanzausgleich durch Heizung und Wärmedämmung

$\dot{K}_{\text{ges,H+WD+WR,min,o}}$ minimale Gesamtkosten beim Bilanzausgleich durch Heizung, Wärmedämmung und Rückgewinnung von Abwärme, ohne Investitionskosten für den Wärmetauscher

$\dot{K}_{I,WR}$ Investitionskosten für den Wärmetauscher.

Die genannten minimalen jährlichen Gesamtkosten errechnen sich für einen bestimmten mittleren k -Wert der Stallhülle [2]. Der Einsatz des Wärmetauschers führt zu geringeren Gesamtkosten und zu einem anderen wirtschaftlich optimalen k -Wert. Diese Kosteneinsparung ist aber nur dann wirtschaftlich, wenn sie mindestens gleich groß ist wie der Betrag der Investitionskosten für den Wärmetauscher. Es gilt also die Wirtschaftlichkeitsbedingung:

$$\dot{K}_{\text{ges,H+WD,min}} - \dot{K}_{\text{ges,H+WD+WR,min,o}} \geq \dot{K}_{I,WR} \quad (6)$$

Damit der Einsatz eines Luft/Luft-Wärmetauschers wirtschaftlich ist, dürfen also die Investitionskosten bestimmte Grenzbeträge nicht überschreiten. Entsprechend wird auch der Bereich wirtschaftlicher Investitionen durch maximale Investitionsbeträge abgegrenzt. Mit Gl. (5) erhält man für diese Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen aus der Gl. (6):

$$K_{I,WR,max} = \frac{1}{a_N} (\dot{K}_{\text{ges,H+WD,min}} - \dot{K}_{\text{ges,H+WD+WR,min,o}}) \quad (7)$$

2.3 Jahreskosten für die Wärmedämmung

Soll ein bestimmter mittlerer k -Wert der Stallhülle allein durch eine Wärmedämmmaßnahme im Bauelement l erreicht werden, so ist dazu eine Investition erforderlich, die sich in einen flächen- und einen volumenabhängigen Anteil zerlegen läßt [8]:

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

mit

A_l	Fläche des Bauelementes l (m^2)
A_{ges}	Gesamtfläche der Stallhülle; $A_{\text{ges}} = \sum_i A_i$
$K_{I,WD,l}^*$	flächenbezogene Investition für die Wärmedämmmaßnahme im Bauteil l (DM/ m^2)
$K_{I,WD,l}^{**}$	volumenbezogene Investition für den Wärmedämmstoff im Bauelement l (DM/ m^3)
λ_l	Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffes im Bauelement l (W/K m)
$k_{l,o}$	Ausgangswert von k für das Bauelement l (W/K m^2)
$k_{m,o}$	Ausgangswert von k_m (W/K m^2).

Bei Wärmedämmmaßnahmen in zwei oder mehreren Bauelementen führt eine Erweiterung der Gl. (8) zu einem Rechenverfahren, mit dem sich die minimale Gesamtinvestition $K_{I,WD,min}$ für einen bestimmten mittleren k -Wert der Stallhülle iterativ (bei zwei Bauelementen auch über eine Rechenformel) ermitteln läßt [2].

Die auf einen bestimmten Betrachtungszeitraum von N Jahren bezogenen Investitionskosten erhält man dann mit Gl. (5) zu

$$\dot{K}_{I,WD}(k_m) = a_N K_{I,WD}(k_m) \quad (9)$$

bzw. bei Wärmedämmmaßnahmen in mehreren Bauelementen

$$\dot{K}_{I,WD}(k_m) = a_N K_{I,WD,min}(k_m) \quad (10)$$

Als mit den Wärmedämmmaßnahmen verbundene Betriebskosten sind gegebenenfalls Instandhaltungskosten zu berücksichtigen. Kosten für Betriebsstoffe, Unterbringung und Versicherung fallen nicht an. Da bei den Wärmedämm-Bauelementen normalerweise auch die Instandhaltungskosten vernachlässigt werden können, wird bei den folgenden Berechnungen davon ausgegangen, daß für die Wärmedämmung keine Betriebskosten in Rechnung zu stellen sind.

2.4 Jahreskosten für die Rückgewinnung von Abwärme

Für den Fall, daß m verschiedenartige Luft/Luft-Wärmetauscher für die Rückgewinnung von Abwärme in Frage kommen, sind in die Wirtschaftlichkeitsprüfung die folgenden Investitionen bzw. Investitionskosten einzubeziehen:

$$K_{I,WR,h}(\Phi_{2,h}) \quad h = 1, \dots, m$$

$$\dot{K}_{I,WR,h}(\Phi_{2,h}) = a_N K_{I,WR,h}(\Phi_{2,h}) \quad (11)$$

Angaben zu den Instandhaltungs- und Unterbringungskosten liegen zur Zeit noch nicht vor. Diese beiden Kostenarten dürften auch nicht sehr ins Gewicht fallen, da die Landwirte den Einbau und notwendige Wartungsarbeiten im allgemeinen selbst durchführen. Versicherungskosten entstehen nicht, wohl aber Kosten für Betriebsstoffe, hier in Form von zusätzlichen Kosten für elektrischen Strom. Die in den Wärmetauschern entstehenden Druckverluste erfordern nämlich zum Ausgleich eine erhöhte Ventilatorleistung. Den Zusammenhang zwischen der zusätzlichen elektrischen Leistung P_E (kW) und den Druckverlusten gibt die folgende Gleichung [9]:

$$P_E = \frac{\dot{V}_{L,A} \Delta p_A + \dot{V}_{L,Z} \Delta p_Z}{3,6 \cdot 10^3 \eta_G \eta_M} \quad (12)$$

mit

$\dot{V}_{L,A(Z)}$	Volumenstrom der Abluft (A) bzw. Zuluft (Z) (m^3/h)
$\Delta p_{A(Z)}$	$f(\dot{V}_{L,A(Z)})$ Druckverlust auf der Abluft (A)- bzw. Zuluft (Z)-Seite des Wärmetauschers (kPa)
η_G	Wirkungsgrad des Gebläses
η_M	Wirkungsgrad des Motors.

Mit der Näherung $\dot{V}_{L,A} = \dot{V}_{L,Z} = \dot{V}_L$ folgt:

$$P_E = \frac{\dot{V}_L [\Delta p_A + \Delta p_Z]}{3,6 \cdot 10^3 \eta_G \eta_M} \quad (13)$$

Die Abhängigkeit der Druckverluste vom Volumen- bzw. Massenstrom der Lüftung muß für jeden Wärmetauscher experimentell bestimmt werden.

Bei der Berechnung der elektrischen Energie ist zu berücksichtigen, daß im Außentemperaturbereich zwischen den beiden Grenztemperaturen, bei denen die Wärmeleistungsbilanz mit bzw. ohne Wärmetauscher zum Ausgleich kommt, nicht mehr der gesamte Volumenstrom der Zuluft durch den Wärmetauscher geführt werden darf, da sonst ein Wärmeüberschuß entstehen würde. Bei dem Rechenmodell zur Ermittlung der elektrischen Energie $E_{E,h}$ (kWh pro Jahr) wird daher, wie in der Praxis, in diesem Temperaturbereich nur der Anteil des benötigten Außenluft-Volumenstromes durch den Wärmetauscher geführt, der für den Ausgleich der Wärmeenergiebilanz ausreicht.

Die zusätzlichen jährlichen Stromkosten für den Wärmetauscher mit der Kennzahl h ergeben sich dann aus folgender Gleichung:

$$\dot{K}_{BS,WR,h} = K'_E E_{E,h} \quad (14)$$

mit

K'_E Preis für eine Einheit elektrischer Energie (DM/kWh).

Soll eine jährliche (vorschüssige, d.h. zu Beginn des Jahres erfolgende) Steigerung des Preises für die elektrische Energie um den Faktor j berücksichtigt werden, dann ergibt sich (s. [7]) für den Kapitalwert der Stromkosten im Betrachtungszeitraum von N Jahren statt nach Gl. (5):

$$K_{BS,WR,h} = \frac{1}{a'_N} K'_E E_{E,h} \quad (15)$$

mit dem modifizierten Annuitätenfaktor a'_N :

$$a'_N = \frac{\gamma (q/\gamma)^N [(q/\gamma) - 1]}{(q/\gamma)^N - 1} \quad \text{für } i \neq j \quad (16)$$

$$a'_N = \frac{q}{N} \quad \text{für } i = j$$

$$\gamma = 1 + j \quad \text{Energiepreissteigerungsfaktor (1/Jahr).}$$

2.5 Jahreskosten für die Heizung

Der Investitionsbedarf für die Heizungsanlage wird im allgemeinen entsprechend der Größe des nach der Wärmedämmung und Rückgewinnung von Abwärme verbleibenden Wärmeenergie-defizits unterschiedlich hoch sein, also von den beiden Größen k_m und Φ_2 abhängen. Im folgenden wird jedoch davon ausgegangen, daß für die Heizung keine Investition notwendig ist. Damit wird der in der Praxis häufige Fall behandelt, daß Ställe nachträglich wärmege-dämmt werden bzw. einen Wärmetauscher erhalten, Heizungsanlagen also schon vorhanden sind. Die Kosten für die Instandhaltung, Unterbringung und Versicherung der Heizanlage werden vernach-lässigt.

Die Kosten für die Betriebsstoffe der Heizanlage errechnen sich nach Gl. (4) aus dem Heizenergiepreis K_Q und der zum Ausgleich der Wärmeenergiebilanzdefizite erforderlichen Wärmeenergie Q .

Für den Heizenergiepreis gilt:

$$K'_Q = 3,6 \frac{K'_B}{\eta H_u} \quad (17)$$

mit

K'_B Preis für eine Brennstoffeinheit (DM/l)
 H_u Heizwert einer Brennstoffeinheit (MJ/l)
 η Gesamtwirkungsgrad der Heizanlage.

Bei Heizöl folgt mit den Rechenwerten $H_u = 35,6$ MJ/l und $\eta = 0,75$:

$$K'_Q = 0,135 K'_B \quad (18)$$

Die Wärmeenergie Q läßt sich nach einem früher angegebenen Rechenverfahren aus der Wärmeenergiebilanz des Stalles unter Verwendung von Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur ϑ_a berechnen [10]. Q ist dabei eine Funktion des mittleren k -Wertes der Stallhülle. Weitere Bestimmungsgrößen der Wärmeenergiebilanz sind:

n Zahl der Tiere im Stall
 q_{Ti} Wärmeleistung je Tier (W)
 w_{Ti} von einem Tier ausgehender Wasserdampf-Volumenstrom (g/h)
 ϑ_i Stalltemperatur (°C)
 $\varphi_{i(a)}$ relative Feuchte (%) im Stall (i) bzw. Außenraum (a)

Die Beeinflussung der Wärmeenergiebilanz durch den Wärmetauscher kann über die Zulufttemperatur ϑ_z ausgedrückt werden. Ohne Wärmetauscher gilt:

$$\vartheta_z = \vartheta_a.$$

Der mit h gekennzeichnete Wärmetauscher führt zu einer höheren Zulufttemperatur, für die entsprechend der Definition der Rückwärmzahl Φ_2 in Gl. (3) gilt:

$$\vartheta_{z,h} = \vartheta_a + (\vartheta_i - \vartheta_a) \Phi_{2,h} (\dot{V}_L) \quad (19)$$

Der Volumenstrom der Lüftung \dot{V}_L (m³/h) soll dabei in Abhängigkeit von der Außentemperatur so gesteuert werden, daß der Wasserdampfhaushalt ausgeglichen bleibt. Dazu muß folgende Gleichung eingehalten werden:

$$\dot{V}_L(\vartheta_a) = \frac{\sum w_{Ti}}{x_i - \frac{\rho_i}{\rho_a(\vartheta_a)} x_a(\vartheta_a)} \quad (20)$$

mit

$x_{i(a)}$ Wassergehalt (g/m³) der Luft im Stall (i) bzw. Außenraum (a)
 $\rho_{i(a)}$ Dichte (kg/m³) der Luft im Stall (i) bzw. Außenraum (a).

Falls beim Heizenergiepreis ebenfalls eine jährliche, vorschüssige Steigerung um den Faktor j' zu berücksichtigen ist, ergibt sich der Kapitalwert der Heizenergiekosten im Betrachtungszeitraum von N Jahren zu:

$$K_Q = \frac{1}{a''_N} K'_Q Q(k_m, \Phi_{2,h}) \quad (21)$$

mit

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

$$a''_N = \frac{q}{N} \quad \text{für } i = j'$$

$$\gamma' = 1 + j'.$$

2.6 Rechenverfahren für die wirtschaftliche Optimierung des Ausgleiches der Wärmeenergiebilanz von Ställen und für die Ermittlung der Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen in Luft/Luft-Wärmetauscher

Sollen für den Ausgleich von Wärmebilanzdefiziten in Ställen Wärmedämmmaßnahmen in zwei oder mehr Bauelementen der Stallhülle und die Rückgewinnung von Abwärme mit jeweils einem von m verschiedenen Luft/Luft-Wärmetauschern betrachtet werden, so ergibt sich zunächst mit den Gleichungen und Festlegungen der Abschnitte 2.3 bis 2.5 für den Gesamt-Kapitalwert aller Maßnahmen zum Ausgleich der Wärmeenergiebilanz bei der Verwendung des Wärmetauschers mit der Kennzahl h :

$$K_{ges}(k_m, \Phi_{2,h}) = K_{I,WD,min}(k_m) + K_{I,WR,h}(\Phi_{2,h}) + \frac{1}{a_N} K'_E E_{E,h} + \frac{1}{a'_N} K'_Q Q(k_m, \Phi_{2,h}) \quad (22).$$

Mit Gl. (5) folgt für die jährlichen Gesamtkosten:

$$\dot{K}_{ges}(k_m, \Phi_{2,h}) = a_N K_{I,WD,min}(k_m) + a_N K_{I,WR,h}(\Phi_{2,h}) + \frac{a_N}{a'_N} K'_E E_{E,h} + \frac{a_N}{a'_N} K'_Q Q(k_m, \Phi_{2,h}) \quad (23).$$

Das Rechenverfahren der wirtschaftlichen Optimierung besteht nun darin, durch Variation des Wertes k_m für jeden zu betrachtenden Wärmetauscher die minimalen jährlichen Gesamtkosten zu ermitteln. Der Vergleich dieser Minimalkosten führt zu der Kombination Wärmedämmung (k_m)-Wärmetauscher ($\Phi_{2,h}$)-Heizung, mit der sich die Wärmeenergiebilanz in wirtschaftlich optimaler Weise ausgleichen läßt. Diese Kombination kennzeichnet dann gleichzeitig die wirtschaftlich optimalen Maßnahmen zur Heizkosteneinsparung.

Die für diese Optimierung erforderlichen Rechenarbeiten sind ohne die elektronische Datenverarbeitung nicht zu bewältigen. Für die Berechnungen anhand der Gl. (23) wurde daher das EDV-Programm WABILOP [12] entwickelt, das als Teilprogramm das in [11] beschriebene Programm WAEDOP enthält. Es ist dies eine Modifikation des in [2] vorgestellten Programmes, bei der die Veränderung des mittleren k -Wertes durch schrittweise Veränderung der Dämmschichtdicken in zwei Bauelementen bewirkt wird.

Das Programm WABILOP erlaubt es auch, die Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen in einem Luft/Luft-Wärmetauscher anhand der Gl. (7) zu berechnen. Ein erster Rechenschritt ergibt die minimalen Jahreskosten $K_{ges,H+WD,min}$ mit dem Unterprogramm WAEDOP. Beim zweiten Durchlauf des Programmes werden dann die durch den Wärmetauscher erhöhten Zulufttemperaturen (Abschn. 2.5) und die zusätzlichen Stromkosten (Abschn. 2.4) berücksichtigt und man erhält $K_{ges,H+WD+WR,min,o}$.

3. Berechnungsbeispiele

3.1 Überblick

Um die Möglichkeiten des EDV-Rechenprogrammes WABILOP veranschaulichen zu können, wird ein handelsüblicher Glas-Röhrenwärmetauscher mit einem in Selbstbau aus glasfaserverstärkten Polyester (GUP)-Platten herstellbaren Plattenwärmetauscher (Kreuz-Gegenstrom-Prinzip [1]), in bezug auf die Wirtschaftlichkeit beim Einsatz in einem Stall verglichen. Der Vergleich erfolgt für einen Modellstall, der am Standort München wahlweise mit Milchkühen, Mastbullen oder Mastkälbern belegt sein soll. Es werden weiterhin die Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen in diese Wärmetauscher ermittelt und auf ihre Abhängigkeiten von der Nutzungsdauer N hin untersucht.

3.2 Berechnungsannahmen

3.2.1 Kennwerte der ausgewählten Luft/Luft-Wärmetauscher

Die für die beiden ausgewählten Luft/Luft-Wärmetauscher von Vogt [5] gemessenen Abhängigkeiten $\Phi_2 = f(\dot{m}_L)$ und $\Delta p = f(\dot{V}_L)$ sind in Bild 1 und 2 dargestellt. Dabei bezeichnet \dot{m}_L den Massenstrom der Lüftung, der mit dem Volumenstrom über die Beziehung

$$\dot{m}_L = \rho_L \dot{V}_L$$

verknüpft ist. Die eingezeichneten Kurven entsprechen einer funktionalen Darstellung der Meßwerte, die mittels einer Regressionsanalyse erhalten und im Rechenprogramm verwendet wurde.

Die Φ_2 -Meßwerte gelten für eine relative Feuchte des Abluftstroms von etwa 50 %. Für die Abluft aus Ställen mit einer relativen Feuchte von 80 % und mehr wären an sich wegen der mit der relativen

Feuchte zunehmenden Kondensation von Wasserdampf und der damit verbundenen Nutzung latenter Wärme größere Werte von Φ_2 in Rechnung zu stellen. Es ist aber damit zu rechnen, daß sich diese höheren Werte für Φ_2 wegen der Verschmutzung des Wärmetauschers gerade in Ställen nicht nutzen lassen. Da z.Zt. keine Meßergebnisse zu den wegen der Verschmutzung notwendigen Korrekturen – auch bei den Druckverlusten – vorliegen, wurden die unkorrigierten Abhängigkeiten für Φ_2 und Δp in die Berechnungen einbezogen.

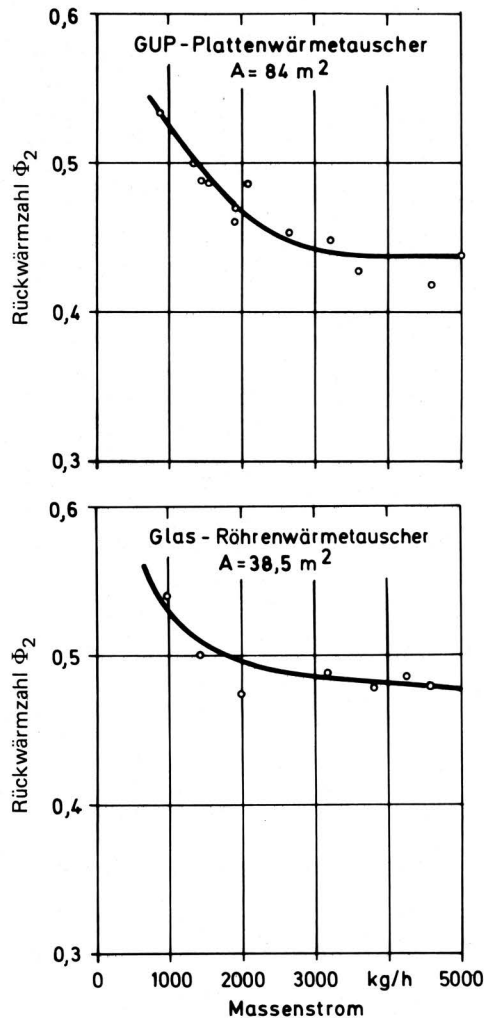


Bild 1. Rückwärmzahl Φ_2 eines GUP-Plattenwärmetauschers und eines Glas-Röhrenwärmetauschers in Abhängigkeit vom Massenstrom der Luft (nach Vogt [5]).

Für den Fall der Belegung des Modellstalles mit Milchkühen oder Mastbullen wird angenommen, daß zur Belüftung des Stalles im Winter ein Ventilator ausreicht und damit auch nur ein Wärmetauscher zum Einsatz kommt. Die bei dieser Belegung im Winter maximalen Volumenströme von bis zu 3000 (m^3/h) lassen sich ohne Probleme durch einen Wärmetauscher hindurchleiten. Bei der Belegung mit Mastkälbern treten dagegen im Außentemperaturbereich mit nicht ausgeglichener Wärmebilanz deutlich größere Volumenströme auf, so daß in diesem Fall zwei Ventilatoren und entsprechend zwei Wärmetauscher eingesetzt werden. Für die Wirkungsgrade in Gl. (13) wurden nach [9] folgende Rechenwerte angenommen:

$$\eta_G = 0,65 \text{ (Axialgebläse)}, \eta_M = 0,78 \text{ (1,2 kW-Motor)}$$

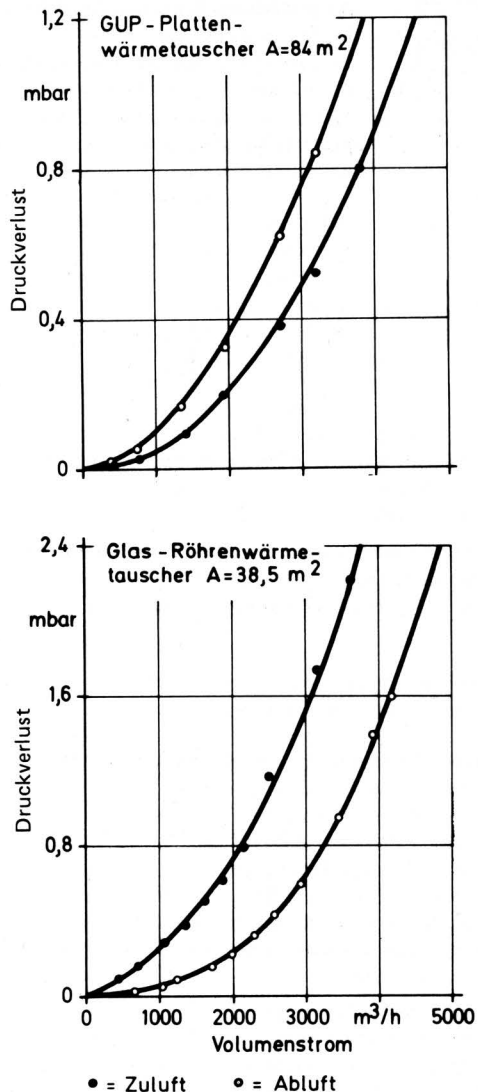


Bild 2. Druckverlust in einem GUP-Plattenwärmetauscher und in einem Glas-Röhrenwärmetauscher in Abhängigkeit vom Volumenstrom (nach Vogt [5]).

3.2.2 Rechenwerte für den Modellstall, die Wärmedämmung, den Standort und die Belegung

Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen erfolgten für einen Modellstall mit den Außenabmessungen 30 x 12,5 x 3 m. Ausgegangen wurde im Deckenbereich von einer Holzbalkendecke mit Bretterboden im Dachraum. Im Wandbereich soll ein 24 cm dickes Mauerwerk aus Lochziegeln der Rohdichteklasse 1 200 (kg/m³) vorhanden sein. Die weiteren Daten des Modellstalles enthält **Tafel 1**.

Als Wärmedämmkonstruktionen wurden in die Berechnungen eingesetzt:

Decke: Polystyrol-Extruderschäum als wärmedämmende Verkleidungsplatte
 $\lambda = 0,035 \text{ W/(K m)}$
 $K_{I,WD}^* = 2,00 \text{ DM/m}^2$ Befestigungsmaterial)
 $K_{I,WD}^{**} = 420,00 \text{ DM/m}^3$

Wand: Holzverschalung (überluchte Schalung) als Außenverkleidung, Mineralfaserplatten aus Wärmedämmstoff
 $\lambda = 0,040 \text{ W/(K m)}$
 $K_{I,WD}^* = 10,00 \text{ DM/m}^2$
 $K_{I,WD}^{**} = 460,00 \text{ DM/m}^3$

Bauelement	Aufbau	Fläche A m ²	Wärmedurchgangskoeffizient k_0 W/K m ²
Decke	Holzbalkendecke mit Bretterboden im Dachraum	375	2,2
Wand	Mauerwerk aus Lochziegeln Rohdichteklasse 1 200 kg/m ³ 24 cm; $\lambda_R = 0,52 \text{ W/(K m)}$ Innenputz 1,5 cm $\lambda_R = 0,87 \text{ W/(K m)}$	192,5	1,45
Fenster	Plexiglas-Stegdoppelplatten 16 mm; $k = 3,2 \text{ W/K m}^2$	37,5	3,2
Tore	Polystyrol-Partikelschaum 4 cm; $\lambda_R = 0,04 \text{ W/(K m)}$ Sperrholz 2 x 1,2 cm; $\lambda_R = 0,14 \text{ W/(K m)}$	25	0,72
Werte für die Gesamtfläche		630	1,97

Werte für λ_R nach DIN 4108; $a_i = 6 \text{ W/K m}^2$; $a_a = 23 \text{ W/K m}^2$ bei Wand und Toren; $a_a = 12 \text{ W/K m}^2$ bei der Decke

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

Der flächenabhängige Teilbetrag der Investition enthält nur die Materialpreise. Daten zum Arbeitsaufwand liegen z.Zt. nicht vor. Dies ist bei einer Interpretation der Rechenergebnisse unbedingt zu berücksichtigen.

Die Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur für den Standort München wurde in [10] vorgestellt, für die relative Feuchte der Außenluft wird $\varphi_a = 80 \%$ eingesetzt. Die Rechenwerte für die verschiedenen Belegarten enthält **Tafel 2**.

3.2.3 Rechenwerte für die wirtschaftlichen Einflußgrößen

Für die wirtschaftlichen Einflußgrößen wurden folgende Rechenwerte festgelegt:

$K_Q = 0,075 \text{ DM/kWh}$ (dieser Wert entspricht in etwa dem jetzigen Preis für Heizenergie)
 $i = 5 \text{ \%/Jahr}$
 $j = j' = 10 \text{ \%/Jahr}$
 $N = 20 \text{ Jahre.}$

Die Festlegung eines Betrachtungszeitraumes von 20 Jahren bedeutet in Zusammenhang mit der Optimierungsgleichung (23), daß sowohl für die Wärmedämm-Bauelemente als auch für die Wärmetauscher eine Nutzungsdauer von mindestens 20 Jahren vorausgesetzt wird, da sonst Neuinvestitionen in der Gl. (23) zu berücksichtigen wären [7]. Während eine Nutzungsdauer von 20 Jahren bei der Wärmedämmung aufgrund von Praxiserfahrungen realistisch ist, muß sie für den Einsatz von Wärmetauschern in Ställen vorerst als Rechenannahme betrachtet werden.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Wirtschaftlich optimaler Ausgleich der Wärmeenergiebilanz und Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen in die Wärmetauscher bei unterschiedlicher Belegung

Die mit dem EDV-Rechenprogramm WABILOP erhaltenen Gesamtbeträge und Aufteilungen der minimalen Jahreskosten, die zugeordneten wirtschaftlich optimalen mittleren k-Werte der Stallhülle

Art der Stallnutzung	Anzahl der Tiere	Tiermasse kg	Rechenwerte nach DIN 18910 [13]			
			Stalltemperatur ϑ_i °C	rel. Feuchte der Stallluft φ_i %	Wärmeleist. je Tier q_{Ti} W	Wasserdampf-anfall je Tier w_{Ti} g/h
Milchkühe (ohne Nachzucht)	48	600	10	80	986	356
Mastbullen	100	400	16	80	766	314
Mastkälber	160	100	18	70	261	159

Tafel 2. Rechenwerte bei unterschiedlicher Nutzung des Modellstalles.

sowie die Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen in den Wärmetauscher sind in **Tafel 3** für die Belegung des Modellstalles mit Milchkühen, Mastbullen bzw. Mastkälbern am Standort München zusammengefaßt. Für die beiden Wärmetauscher wurden dabei folgende ungefähre Investitionsbeträge in Rechnung gestellt:

Glas-Röhrenwärmetauscher:	6000 DM
GUP-Plattenwärmetauscher:	3550 DM
Materialaufwand:	2800 DM
Arbeitsaufwand:	750 DM (50 h a 15 DM).

Aus dem Vergleich der minimalen jährlichen Kosten (1. u. 2. Zeile in **Tafel 3**) zeigt sich, daß der Einsatz des Plattenwärmetauschers in allen Fällen zu einem wirtschaftlichen Ausgleich der Wärmeenergiebilanz führen könnte, während der Glas-Röhrenwärmetauscher nur in einem Mastkälberstall wirtschaftlich ist. Der Vergleich der obigen tatsächlichen Investitionsbeträge mit den Höchstbeträgen wirtschaftlicher Investitionen (letzte Zeile in **Tafel 3**) bestätigt dieses Ergebnis.

Belegung des Stalles	Milchkühe			Mastbullen			Mastkälber		
	H+WD	H+WD+WR	RWT PWT	H+WD	H+WD+WR	RWT PWT	H+WD	H+WD+WR	RWT PWT
Minimale jährliche Kosten (DM/Jahr)	513	229	205	459	115	87	4005	1511	1333
+ $K_{I,WR}$		710	490		596	372		2473	1903
Anteilige Jahreskosten (DM/Jahr) für									
Investition-Wärmedämmung	439	0	0	439	0	0	1921	1004	1004
Heizenergie	74	132	151	20	31	42	2084	130	119
Elektr. Energie	—	97	54	—	84	45	—	377	210
Wirtschaftl. optimaler mittlerer k-Wert (W/K m ²)	1,12	1,97	1,97	1,12	1,97	1,97	0,53	0,77	0,77
Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen in den Wärmetauscher (DM)	—	3531	3831	—	4292	4632	—	31080*	33289*

$K_{I,WR}$: Investitionskosten für den bzw. die Wärmetauscher
* für zwei Wärmetauscher

Maßnahmen zum Ausgleich der Wärmeenergiebilanz:

H+WD Heizung und Wärmedämmung

H+WD+WR Heizung, Wärmedämmung und Rückgewinnung von Abwärme mit

RWT Röhrenwärmetauscher oder

PWT GUP-Plattenwärmetauscher

An den beiden Beispielen der Belegung des Modellstalles mit Milchkühen und Mastbullen wird weiterhin deutlich, daß die Einbeziehung der Rückgewinnung von Abwärme zwar zu einem wirtschaftlicheren Ausgleich der Wärmeenergiebilanz führen kann, daß dabei aber nicht immer Heizkosten eingespart werden. Beim Einsatz des Wärmetauschers errechnen sich nämlich höhere Heizkosten, andererseits sind keine Investitionskosten für die Wärmedämmung erforderlich. Es ist allerdings anzumerken, daß die Wirtschaftlichkeit nicht das einzige Kriterium für Wärmedämmmaßnahmen ist. Bei einem k-Wert von 1,97 W/K m², dem wirtschaftlich optimalen k-Wert in **Tafel 3** für den Milchvieh- und Mastbullenstall bei Rück-

gewinnung von Abwärme, wird in der Praxis eine zusätzliche Wärmedämmung im Wand- und Deckenbereich unumgänglich, um den Mindestwärmeschutz zur Vermeidung von Oberflächenkondensation sicherzustellen.

Die höheren Gesamtkosten beim Einsatz des Glas-Röhrenwärmetauschers erklären sich aus den fast doppelt so hohen Stromkosten infolge des größeren Druckverlustes (**Bild 2**).

3.3.2 Veränderung der Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen in die Wärmetauscher mit der Nutzungsdauer N

Beim EDV-Rechenprogramm WABILOP können alle Einflußgrößen variiert werden. Es läßt sich so deren Auswirkung auf die beiden wirtschaftlichen Kenngrößen minimale jährliche Gesamtkosten und Höchstbetrag wirtschaftlicher Investitionen analysieren. Als ein Beispiel für die damit gegebenen, vielfältigen Berechnungsmöglichkeiten wurde für die Belegung des Modellstalles mit Mastkälbern am Standort München der Einfluß der Nutzungsdauer auf die Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen bei den Wärmetauschern untersucht.

Das Ergebnis der Berechnungen enthält **Bild 3**. Die Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen in jeweils 2 Wärmetauscher werden mit zunehmender Nutzungsdauer deutlich größer. **Bild 4** zeigt am Beispiel des Glas-Röhrenwärmetauschers, daß die Größe der Energiepreiserhöhung j diese Zunahme der maximalen wirtschaftlichen Investitionen stark beeinflußt.

Tafel 3. Gesamtbetrag und Aufteilung der minimalen jährlichen Kosten zum Ausgleich der Wärmeenergiebilanz, wirtschaftlich optimaler mittlerer k-Wert der Stallhülle und Maximalwerte wirtschaftlicher Investitionen in den Wärmetauscher bei unterschiedlicher Belegung des Modellstalles; Standort München.

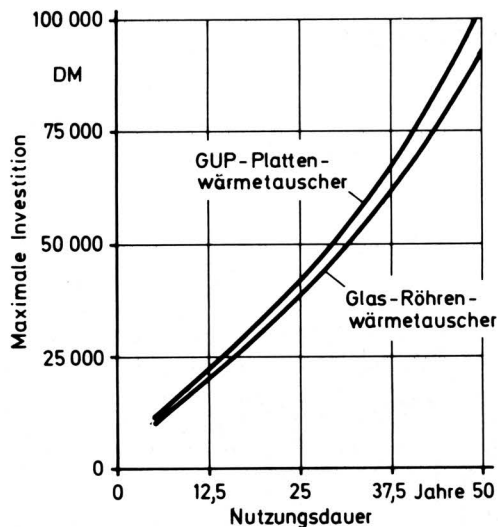


Bild 3. Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen für 2 Wärmetauscher in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer; Modellstall mit Mastkälbern; Standort: München.

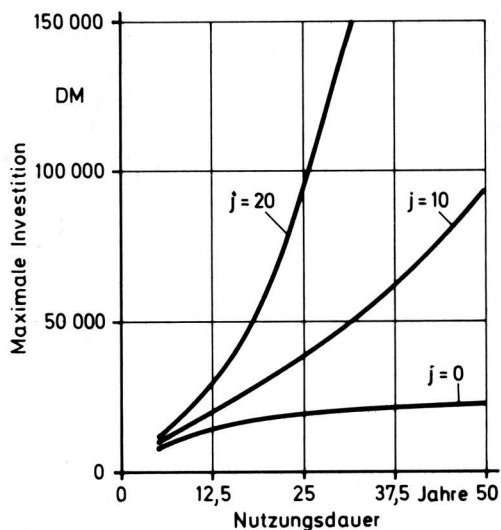


Bild 4. Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen für 2 Glas-Röhrenwärmetauscher in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer mit der Energiepreissteigerungsrate j (%/Jahr) als Parameter; Modellstall mit Mastkälbern; Standort: München.

4. Zusammenfassung

Ausgehend von dem Verfahren der wirtschaftlichen Optimierung durch Minimierung der jährlichen Gesamtkosten wurden für die Prüfung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Luft/Luft-Wärmetauschern in Ställen ein Rechenverfahren und das EDV-Rechenprogramm WABILOP entwickelt. Von verschiedenen im Einzelfall

in Betracht zu ziehenden Wärmetauschern ist dabei derjenige am wirtschaftlichsten, der zusammen mit der Heizung und mit Wärmedämmmaßnahmen die Wärmeenergiebilanz des Stalles mit den geringsten jährlichen Gesamtkosten ausgleicht. Eine Wirtschaftlichkeitsprüfung einzelner Wärmetauscher ermöglicht das Rechenprogramm WABILOP mit der Berechnung von Höchstbeträgen wirtschaftlicher Investitionen in diese Wärmetauscher.

Zur Veranschaulichung der entwickelten Rechenverfahren wurde der Einsatz eines Glas-Röhrenwärmetauschers und alternativ dazu der eines GUP-Plattenwärmetauschers in einem Modellstall bei unterschiedlicher Belegung auf Wirtschaftlichkeit hin überprüft. Die Untersuchung der Auswirkung von Veränderungen in den Rechenwerten für den Nutzungszeitraum N auf die Höchstbeträge wirtschaftlicher Investitionen in Glas-Röhrenwärmetauscher diente dazu, die Möglichkeiten des Rechenprogramms WABILOP zur Analyse von Einflußgrößen aufzuzeigen.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Schulz, H.: Versuchsergebnisse und Erfahrungen mit Stallluft-Wärmetauschern.
Freising: Referateband des Weihenstephaner Baugesprächs 1982, Landtechnik Weihenstephan 1982, S. 27/43.
- [2] Englert, G.: Wirtschaftliche Optimierung der Wärmedämmung von Ställen.
Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 4, S. 109/16.
- [3] Sailer, W.: Luft/Luft-Wärmetauscher in Viehställen – Bisherige Erfahrungen und Entwicklungen.
Landtechnik Bd. 36 (1981) Nr. 1, S. 11/14.
- [4] Zottmann, G.: Fast 60 % Heizöl eingespart.
DLG-Mitteilungen Bd. 95 (1980) Nr. 21, S. 1236/37.
- [5] Vogt, S.: Persönliche Mitteilung.
- [6] Kloss, R.: Strom oder Wärme aus Biogas?
Grundl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 2, S. 29/41.
- [7] Englert, G.: Die Annuitätenrechnung – eine praxismethodische Methode der Wirtschaftlichkeitsprüfung von Energiesparmaßnahmen.
Grundl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 3, S. 61/64.
- [8] Englert, G.: Zur Berechnung minimaler Investitionen für die Wärmedämmung.
Bauphysik Bd. 2 (1980) Nr. 6, S. 213/17.
- [9] ● Jüttemann, H.: Wärmerückgewinnung in raumlufttechnischen Anlagen.
Karlsruhe: C.F. Müller 1980.
- [10] Englert, G.: Ein Rechenmodell für die Wärmeenergiebilanz von Ställen.
Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 3, S. 77/80.
- [11] Englert, G.: Ausführung und Wirtschaftlichkeit der Wärmedämmung von Ställen.
Freising: Referateband des Weihenstephaner Baugesprächs 1982, Landtechnik Weihenstephan 1982, S. 13/25.
- [12] Englert, G.: WABILOP – Wirtschaftliche Optimierung des Ausgleiches der Wärmeenergiebilanz von Ställen. – EDV-Programm.
Freising: Programmbibliothek der Landtechnik Weihenstephan 1982.
- [13] DIN 18910: Klima in geschlossenen Ställen: Wasserdampf- und Wärmehaushalt im Winter, Lüftung, Beleuchtung.
Berlin: Beuth-Verlag 1974.