

Wirtschaftliche Energieanwendung am Beispiel des VEB Kombinat Industrielle Mast Königs Wusterhausen

Dipl.-Ing. H. Hettwer, KDT/Dipl.-Phys. H.-H. Bath, KDT
Bauakademie der DDR, Institut für Heizung, Lüftung und Grundlagen der Bautechnik

1. Einleitung

Die Wärmerückgewinnung ist grundsätzlich bei allen Gebäuden mit einer zentralen Lüftungsanlage möglich, wie z. B. in Hotels, Kaufhallen, Wohnbauten, Schulen sowie industriellen und landwirtschaftlichen Produktionseinrichtungen. Ein ökonomisch günstiges Anwendungsgebiet liegt besonders im letztgenannten Fall bei Großstallanlagen der Broilermast vor. Bei den o.g. Anwendungsgebieten wird für die Wärmerückgewinnung mit Hilfe von Wärmeröhren das wegen seiner thermodynamischen Eigenschaften besonders vorteilhafte Ammoniak als Arbeitsmedium verwendet. Da in der DDR bei den vorgenannten Einsatzgebieten nur geheizt und nicht gekühlt wird, werden die einfacher und billiger herstellbaren reinen Schwerkraft-Wärmeröhre verwendet. In die Lüftungszentrale eines Broilermaststalls des VEB Kombinat Industrielle Mast (KIM) Königs Wusterhausen, Bezirk Potsdam, wurde ein aus Schwerkraft-Wärmeröhren bestehender Wärmeübertrager (Funktionsmuster) zur Wärmerückgewinnung eingebaut und ist seit Mai 1980 in Betrieb. Im folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen dargelegt.

2. Leistungsverhalten des Einzelrohres

Die Entwicklung und der Einsatz von Wärmeröhren in Großstallanlagen wurde mit Untersuchungen am Einzelrohr begonnen. Vor allem wurden verschiedene Einflüsse auf die axiale Wärmetransportfähigkeit geklärt, wie z. B. die Menge des eingefüllten Arbeitsmittels, der Rohrinne Durchmesser, die Rohrwandtemperaturdifferenz zwischen Heiz- und Kühlzone. Hierbei zeigt sich, daß die axiale Wärmetransportfähigkeit bei einer bestimmten (optimalen) Arbeitsmittelmenge ein Maximum erreicht und vom Innendurchmesser des Rohres abhängt. Die optimalen Füllmengen des Arbeitsmittels betragen bei Rohrinne durchmessern von 12 bis 16 mm rd. 15% und bei 20 bis 29 mm rd. 25%. Diese Angaben beziehen sich auf Rohre mit glatter Innenwand. Die Füllmengen verringern sich, wenn die Rohrinnefläche nicht glatt, sondern z. B. gewellt ist, wie

das bei den für das untersuchte Funktionsmuster verwendeten quergewalzten Al-Rippenrohren der Fall ist. Hierfür wurde bei einem Innendurchmesser von 15 mm eine optimale Füllmenge von rd. 10% ermittelt. Den Verlauf der axialen Wärmetransportfähigkeit κ für dieses Rohr zeigt Bild 1. Für die untersuchten Einzelrohre konnte zwischen dem axialen Wärmestrom \dot{Q} und der Rohrwandtemperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ zwischen Heiz- und Kühlzone folgende Gleichung ermittelt werden:

$$\kappa = \frac{\dot{Q}}{\Delta\vartheta^{1,10}} \quad (1)$$

3. Beschreibung der Wärmerückgewinnungsanlage

Das Funktionsmuster des Wärmerohr-Wärmeübertragers besteht aus quergewalzten Al-Rippenrohren mit den Abmessungen: Kernrohr 18 mm x 1,5 mm, Rippenrohrdurchmesser 38 mm, Rippendicke außen 0,5 mm und am Kernrohr 1,2 mm, Rippenabstand 3,5 mm, Länge der Rohre rd. 2 m, äußere Oberfläche 0,54 m² je m Rohrlänge. Das Funktionsmuster besteht aus 8 hintereinander angeordneten Rohrreihen mit einem Rohrabstand von 45 mm. Die Rohre sind in einem gleichseitigen Dreieck angeordnet. Die Gesamtzahl der Rohre beträgt 264.

Bild 2
Prinzipschaltung der Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung:
a Filter, b Wärmerohr-Wärmeübertrager, c Axiallüfter, d Radiallüfter, e Heizwärmeübertrager, f Befeuchtungseinrichtung

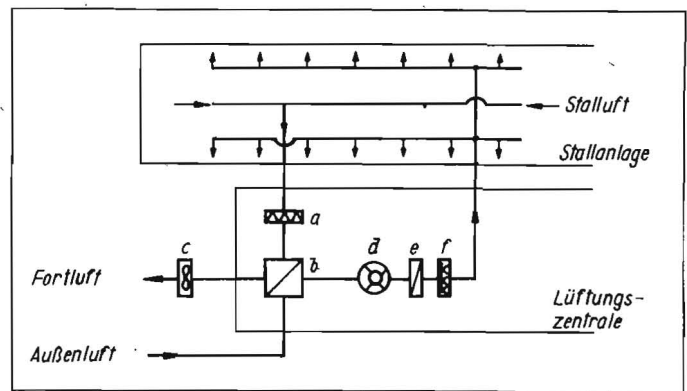


Bild 3. Verlauf des Wärmerückgewinnungsgrades η_{ϑ}

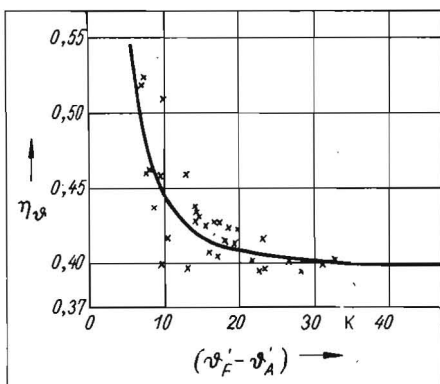


Bild 4. Temperaturerhöhung der Außenluft $\Delta\vartheta_A$

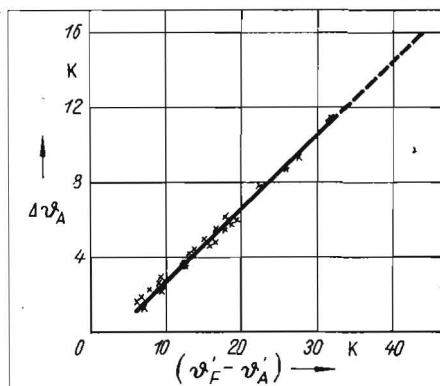


Bild 5. Übertragener Wärmestrom \dot{Q}_U

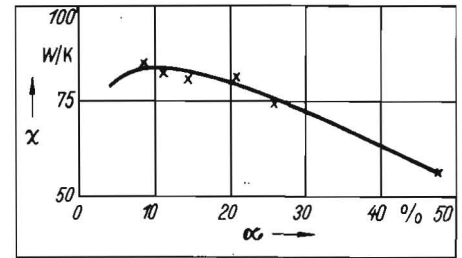
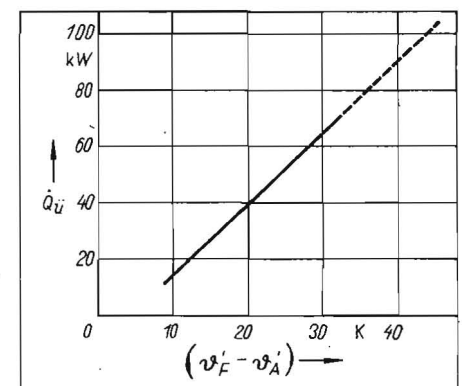


Bild 1. Axiale Wärmetransportfähigkeit κ in Abhängigkeit vom Füllungsgrad α des Rohres mit dem Arbeitsmedium Ammoniak

Die Al-Rippenrohre sind je Rohrreihe in einem Sammelrohr eingeschweißt. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, genügt für das Einbringen der optimalen Ammoniakmenge ein Vakuum von rd. 1,3 Pa. Höhere Vakua haben keinen Einfluß auf das Leistungsverhalten. Verwendet wird technisch reines Ammoniak aus Stahlflaschen mit einem Reinheitsgrad von 99,9%. Die Einordnung des Wärmerohrübertragers in die Lüftungsanlage ist im Bild 2 dargestellt.

4. Wärmeübertragung

Die Wärmerückgewinnungsgrade sind nach der folgenden Gleichung ermittelt werden:

$$\eta_{\vartheta} = \frac{\dot{Q}_U}{\dot{Q}_F' - \dot{Q}_A'} = \frac{\vartheta_A'' - \vartheta_A'}{\frac{\dot{m}_F}{\dot{m}_A} \vartheta_F' - \vartheta_A'} \quad (2)$$

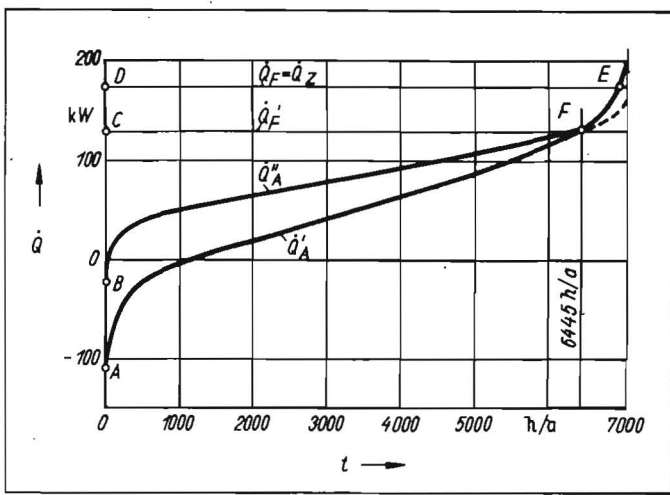


Bild 6
Jährliche Wärmeanteile
für den untersuchten
Broilermaststall

Fläche BDEB

jährliche aufzubringende Heizwärme Q_H .
Für die untersuchte Großstallanlage wurden
folgende vorgenannte Wärmeanteile ermittelt:

- $Q_F = Q_Z \approx 3050 \text{ GJ/a}$
- $Q_{F'} \approx 1964,4 \text{ GJ/a}$
- $Q_{\ddot{u}} \approx 838 \text{ GJ/a}$
- $Q_H \approx 2212 \text{ GJ/a}$.

Damit beträgt der Wärmerückgewinnungsgrad
im Jahresmittel

$$\bar{\eta} = \frac{Q_{\ddot{u}}}{Q_F} = 0,426. \quad (4)$$

Eine Zusammenfassung der erzielten Ergeb-
nisse ist in Tafel 1 enthalten.

Die bei optimaler Auslegung des Wärmerohr-
Wärmeübertragers erreichbaren Ergebnisse
und der Vergleich der verschiedenen Wärmerück-
gewinnungssysteme untereinander, bezo-
gen auf den Anwendungsfall Broilermast-
stall, sind in den Tafeln 2 und 3 zusam-
gestellt. Für den Vergleich ist zunächst vor-
ausgesetzt, daß alle untersuchten Wärmerück-
gewinnungssysteme für den vorliegenden An-
wendungsfall eingesetzt werden können.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, daß der
Regenerativ-Wärmeübertrager RW 2500 die
größte Kostensparung und den größten
volkswirtschaftlichen Nutzen aufweist. Die
kleinsten Nutzeffekte weist das rekuperative
Zirkulationssystem (RZ-System) mit Oratin-
Wasserfüllung (Wärmeübertrager nach Stan-
dard TGL 280-1202) auf. Der Wärmerohr-
Wärmeübertrager liegt hinsichtlich der öko-
nomischen Effekte nach dem Regenerativ-
Wärmeübertrager an zweiter Stelle der un-
tersuchten Wärmerückgewinnungssysteme. Der
Platten-Wärmeübertrager zeigt im Vergleich
zum Wärmerohr-Wärmeübertrager etwa den
gleichen volkswirtschaftlichen Nutzen, obwohl
die jährlich eingesparte Stadtgasmenge mit rd.
81 100 m³ wesentlich kleiner ist. Der Grund
dafür ist, daß der Platten-Wärmeübertrager
einen erheblich geringeren Druckverlust und
damit einen entsprechend kleineren zusätz-
lichen Elektroenergiebedarf gegenüber dem
Rippenrohrbündel des Wärmerohr-Wärme-
übertragers aufweist.

6. Einsatzmöglichkeit des Wärmerück- gewinnungssysteme bei der industriellen Tierproduktion

Der Einsatz von Regenerativ-Wärmeübertra-
gern ist an relativ staubfreie Luftströme ge-
bunden. Bei normaler Staubbilastung der Fort-
luft tritt ein Selbstreinigungseffekt dadurch
auf, daß die Kanäle der Speichermasse von der
Außenluft in entgegengesetzter Richtung zur
Fortluft durchströmt werden.

Aufgrund der überaus starken Staubbilastung
der Stallluft durch organische Staubpartikel,
der ungelösten Filterungsprobleme sowie der Haft-
eigenschaften des Staubs ist die Funktions-
fähigkeit des Regenerativ-Wärmeübertragers
nicht gegeben. Sein Einsatz in Großstallanlagen
scheidet deshalb aus.

Beim Einsatz von Platten-Wärmeübertragern
tritt bei der o. g. Staubbilastung der Stallluft ein
Zusetzen der engen Plattenzwischenräume ein.
Außerdem müssen bei den hier auftretenden
großen Luftvolumenströmen mehrere Wärme-
übertrager parallel angeordnet werden. Für die
Reinigung ist ein Ein- und Ausbau der Platten-
Wärmeübertrager notwendig. Der damit erfor-
derlich zusätzliche Montageaufwand ist bei der
Vielzahl von Platten-Wärmeübertragern bei der
Ausrüstung aller Stallanlagen und der relativ
kurzen Reinigungsintervalle infolge der starken
Verschmutzung trotz Filterung nicht tragbar.

Hierin sind $Q_{\ddot{u}}$ der von der Fortluft an die dem
Stall zugeführte Außenluft übertragene Wär-
mestrom, $Q_{F'}$ der Fortluft- und Q_A' der Außen-
luft-Wärmestrom jeweils am Eintritt des Wär-
meübertragers, $\vartheta_{A'}$, $\vartheta_{A''}$ die Außenlufttempe-
raturen am Ein- und Austritt des Wärmeüber-
tragers und $\vartheta_{F'}$ die Eintrittstemperatur der
Fortluft sowie \dot{m}_F und \dot{m}_A die Massenströme
der Fort- und Außenluft.

Für den untersuchten Fall der Großstallanlage
beträgt das Massenstromverhältnis
 $\dot{m}_F/\dot{m}_A \approx 0,85$. Der übertragene Wärmestrom
 $Q_{\ddot{u}}$ wird aus der gemessenen Temperaturerhö-
hung $\vartheta_{A''} - \vartheta_{A'}$ des Außenluftstroms bzw. mit
Hilfe des Wärmerückgewinnungsgrades nach
der folgenden Gleichung bestimmt:

$$Q_{\ddot{u}} = \dot{m}_A c_p (\vartheta_{A''} - \vartheta_{A'}) \\ = \eta_D c_p (\dot{m}_F \vartheta_{F'} - \dot{m}_A \vartheta_{A'}); \quad (3)$$

c_p spezifische Wärmekapazität der Luft.

Der Verlauf des Wärmerückgewinnungsgrades
in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz
zwischen Stallluft (Fortluft) $\vartheta_{F'}$ und Außenluft
 $\vartheta_{A'}$ ist im Bild 3 dargestellt. Hierbei zeigt sich
im Bereich bis $(\vartheta_{F'} - \vartheta_{A'}) \approx 15 \text{ K}$ ein starker
Abfall des Wärmerückgewinnungsgrades, der
dann in einen nur noch gering abfallenden
Kurvenverlauf übergeht.

Die im Wärmerohr-Wärmeübertrager erzielte
Temperaturerhöhung des Außenluftstroms
 $\Delta\vartheta_A$ von 18 300 m³/h und den übertragenen
Wärmestrom $Q_{\ddot{u}}$ in Abhängigkeit von der
Temperaturerhöhung zwischen Stallluft und
Außenluft zeigen die Bilder 4 und 5.

5. Jährliche Wärmerückgewinnung und Vergleich mit anderen Wärmerückgewinnungssystemen

Für die zurückgewonnene Wärme und die
Wirtschaftlichkeit der Anlage ist besonders die
jährliche Betriebsdauer ausschlaggebend. Für
den untersuchten Broilermaststall beträgt die
jährliche Betriebsdauer 7056 h. Hiervon könn-
en für die Wärmerückgewinnung 6445 h ge-
nutzt werden, da darüber hinaus die Stallluft-
temperaturen gleich den Außenlufttemperatu-
ren sind. Die mittlere Temperatur der Stallluft
beträgt 27°C, wobei infolge von Wärmever-
lusten am Eintritt des Wärmeübertragers auf
der Fortluftseite durchschnittlich 24°C anlie-
gen.

Die jährlichen Wärmeanteile für die o. g. Be-
triebsdauer sind im Bild 6 dargestellt. Hierin ist
 $Q_{A''}$ der Außenluftwärmestrom am Austritt des
Wärmeübertragers, während $Q_F = Q_Z$ der Fort-
luft- bzw. der für die Beheizung erforderliche
Zuluft-Wärmestrom ist.

Die jährlichen Wärmeanteile entsprechen fol-
genden Flächen:

Fläche ADEA

jährliche Heizwärme (Zuluftwärme) Q_Z der
Stallanlage

Fläche ACFA

für die Wärmerückgewinnung jährlich zur Ver-
fügung stehende Fortluftwärme $Q_{F'}$ (am Ein-
tritt des Wärmeübertragers)

Fläche ABFA

jährliche Wärmerückgewinnung $Q_{\ddot{u}}$

Tafel 1. Ergebnisse der Funktionsmustererprobung des Wärmerohr-Wärmeübertragers zur Wärmerückge-
winnung im Broilermaststall des VEB KIM Königs Wusterhausen

Ergebnisse	je Stallanlage
für die Wärmerückgewinnung zur Verfügung stehende Fortluftwärme am Eintritt des Funktionsmusters $Q_{F'}$	1964,4 GJ/a
davon zurückgewonnene Wärme $Q_{\ddot{u}}$	837,8 GJ/a ¹⁾
Wärmerückgewinnungsgrad $\bar{\eta} = Q_{\ddot{u}}/Q_{F'}$	0,426
eingesparte Stadtgasmenge $E_{\text{Stadtgas}} = Q_{\ddot{u}}/(\eta_{\text{Heizanlage}} H_u)$ ($\eta_{\text{Heizanlage}} = 0,85$, spezifischer Heizwert $H_u = 14246 \text{ kJ/m}^3$ Stadtgas)	69 192 m ³ /a ¹⁾
zusätzlicher Elektroenergiebedarf W_{El}	17 500 kWh/a
volkswirtschaftlicher Nutzen $\left(\frac{Q_{\ddot{u}}}{\eta_{\text{Heizanlage}}} - \frac{W_{\text{El}}}{\eta_{\text{El}}} \right)$	795 GJ/a ¹⁾ 55 800 m ³ /a Stadtgas
Nutzen des Anwenders (bei Abzug aller jährlichen Kostenaufwendungen)	8 145 M/a

1) Vergrößerung der Nutzeffekte bei optimaler Auslegung der Wärmerückgewinnungsanlage möglich

Tafel 2. Wirtschaftlichkeitsvergleich der Wärmerückgewinnungssysteme, bezogen auf den Anwendungsfall Broilermaststall (optimale Auslegung)

		Wärmerohr- Wärmeübertrager	rekuperatives Zirkulationssystem	Platten- Wärmeübertrager	Regenerativ-Wärmeübertrager RW 2000	Regenerativ-Wärmeübertrager RW 2500
Wärmerückgewinnungsgrad		0,67	0,39	0,50	0,67	0,78
Anlagekosten	M	39 640	27 040	39 000	45 090	50 140
Heizkosten-Einsparung	M/a	19 538	11 505	14 600	19 538	22 777
zusätzliche Elektroenergie	M/a	2 974	2 450	638	1 690	1 226
Wartung	M/a	615	600	700	850	850
Abschreibung	M/a	4 433	2 795	4 350	5 142	5 798
Summe der Aufwendungen	M/a	8 022	5 845	5 688	7 682	7 874
Kosteneinsparung (Nutzen des Anwenders)	M/a	11 516	5 660	8 912	11 856	14 903
Amortisationszeit (Anlagekosten/Nutzen)	a	3,4	4,8	4,4	3,8	3,4

Die Platten-Wärmeübertrager sind deshalb für den Einsatz in Großstallanlagen ungeeignet. Damit verbleiben für den Einsatz in der industriemäßigen Tierproduktion nur noch das rekuperative Zirkulationssystem und der Wärmerohr-Wärmeübertrager.

Das entwickelte Schwerkraft-Wärmerohr aus quergewalztem Al-Rippenrohr mit Ammoniak als Arbeitsmedium hat einen prinzipiell besseren Wirkungsgrad gegenüber dem RZ-System mit handelsüblichen Wärmeübertragern nach Standard TGL 180-1202 und einer Oratin-Wasserfüllung. Dadurch wird mit dem Wärmerohr-Wärmeübertrager eine entsprechend höhere Wärmerückgewinnung erreicht, wie aus den Ergebnissen bei optimaler Auslegung der beiden Systeme, bezogen auf den vorliegenden Anwendungsfall (Tafeln 2 und 3), ersichtlich ist.

Bei entsprechender konstruktiver Gestaltung des Wärmerohr-Wärmeübertragers ist eine im Vergleich zu den anderen Wärmerückgewinnungsgeräten leichte Zugänglichkeit der Rippenrohrfläche zur Reinigung möglich. Das kann z. B. durch ausziehbare Rohrreihen (einzeln oder mehrere zugleich) oder durch die Anordnung von jeweils mehreren Rohrreihen zu einer Wärmeübertragereinheit und eines Zwischenraums mit entsprechender Reinigungsöffnung in der Kanalwand erreicht werden. Die Reinigung selbst erfolgt mit einem kräftigen Druckwasserstrahl. Diese Art der Reinigung wurde bei der Funktionsmuster-Erprobung mit gutem Erfolg angewendet.

7. Praxiseinführung

Aufgrund der erzielten Ergebnisse wird derzeit die Produktionsüberleitung von Schwerkraft-Wärmerohren vorbereitet. Mit der Produktionsüberleitung ist eine Umstellung von Al-Rippenrohren auf Stahl-Rippenrohre vorgesehen. Die bei der Funktionsmustererprobung erreichten Ergebnisse müssen im Zusammenhang mit der Entwicklung der Serienproduktion und der vorgenannten Umstellung auf Stahl-Rippenrohre weiter verfolgt werden.

Tafel 3. Vergleich des volkswirtschaftlichen Nutzens der Wärmerückgewinnungssysteme, bezogen auf den Anwendungsfall Broilermaststall (optimale Auslegung)

		Wärmerohr- Wärme- übertrager	rekuperatives Zirkulations- system	Platten- Wärme- übertrager	Regenerativ-Wärmeübertrager RW 2000	Regenerativ-Wärmeübertrager RW 2500
Wärmerückgewinnungs- grad		0,67	0,39	0,50	0,67	0,78
Fortluftwärme am Eintritt Wärmeüber- trager Q_F	GJ/a	1 964,4	1 964,4	1 964,4	1 964,4	1 964,4
davon zurückgewon- nene Wärme Q_u	GJ/a	1 314,4	770	982,2	1 314,4	1 532,3
eingesparte Stadt- gasmenge ¹⁾ $E_G = \frac{Q_u}{\eta_{Heizanlage} H_u}$	m ³ /a	108 546	63 600	81 112	108 546	126 538
zusätzliche Energie W_{EI}	kWh/a	43 741	36 056	9 379	24 859	18 031
volkswirtschaft- licher Nutzen ²⁾ $\frac{Q_u}{\eta_{Heizanlage}} - \frac{W_{EI}}{\eta_{EI}}$	GJ/a	1 069,2	512,5	1 053,2	1 275,2	1 606,0
umgerechnet in Stadtgas	m ³ /a	75 053	35 975	73 930	89 513	112 733

1) $\eta_{Heizanlage} = 0,85$, $H_u = 14 246 \text{ kJ/m}^3$ Stadtgas
2) $\eta_{EI} = 0,33$

8. Zusammenfassung

Der aus Schwerkraft-Wärmerohren mit 8 hintereinander angeordneten Rohrreihen und Ammoniak als Arbeitsmedium bestehende Wärmeübertrager (Funktionsmuster) ergab bei der Erprobung in einem Broilermaststall einen jährlichen Mittelwert des Wärmerückgewinnungsgrads von rd. 42 %. Das entspricht einer Energieeinsparung von rd. 838 GJ/a bzw. rd. 69 190 m³/a Stadtgas unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades der Heizanlage. Die ermittelten technisch-ökonomischen Ergebnisse der verschiedenen Wärmerückgewinnungseinrichtungen zeigen, daß bei optimaler Auslegung das entwickelte Schwerkraft-Wärmerohr hin-

sichtlich der Wärmerückgewinnung nach dem Regenerativ-Wärmeübertrager an zweiter Stelle liegt. Wegen seiner spezifischen Eigenschaften ist der Wärmerohr-Wärmeübertrager von den für den Einsatz in industriemäßigen Tierproduktionsanlagen in Frage kommenden Wärmerückgewinnungsgeräten am besten geeignet, wobei der Regenerativ-Wärmeübertrager für dieses Einsatzgebiet ausscheidet und der Platten-Wärmeübertrager ungeeignet ist. Gegenüber dem RZ-System mit handelsüblichen Wärmeübertragern weist das Schwerkraft-Wärmerohr ungefähr einen doppelt so hohen Nutzeffekt aus.

A 3407