

Ludo Van Caenegem, Markus Sax und Matthias Schick

# Wärmerückgewinnungsanlagen – auch zum Kühlen

Konventionelle Wärmerückgewinnungsanlagen (WRG) in Stallgebäuden sind nur während der Heizperiode nützlich, wenn die fühlbare Wärmeabgabe der Tiere nicht ausreicht, um die gewünschte Stalltemperatur zu erreichen. Wird dieser Sollwert überschritten, leiten Regelklappen den Zu- oder Abluftstrom über einen Bypass am Wärmetauscher vorbei und verhindern einen weiteren Wärmetausch zwischen Zu- und Abluftstrom.

Durch Befeuchtung der Abluft vor dem Eintritt in den Wärmetauscher, wird diese kühler und kann der Zuluft Wärme entziehen. Aufgrund der getrennten Luftströme (Zu-/Abluft) ändert sich dadurch der Wassergehalt der Stallluft nicht. Mit einem dynamischen Berechnungsmodell lässt sich die Stalltemperatursenkung in Abhängigkeit vom thermischen Wirkungsgrad des Wärmetauschers, der Luftrate und der zerstäubten Wassermenge voraussagen.

## Schlüsselwörter

Wärmerückgewinnung, adiabatische und diabatische Kühlung, Stallklima

## Keywords

Heat recovery, adiabatic and diabatic cooling, climatization of animal houses

## Abstract

Van Caenegem, Ludo; Sax, Markus and Schick, Matthias

## Heat exchanger – also for cooling

Landtechnik 67 (2012), no. 3, pp. 216–220, 5 figures

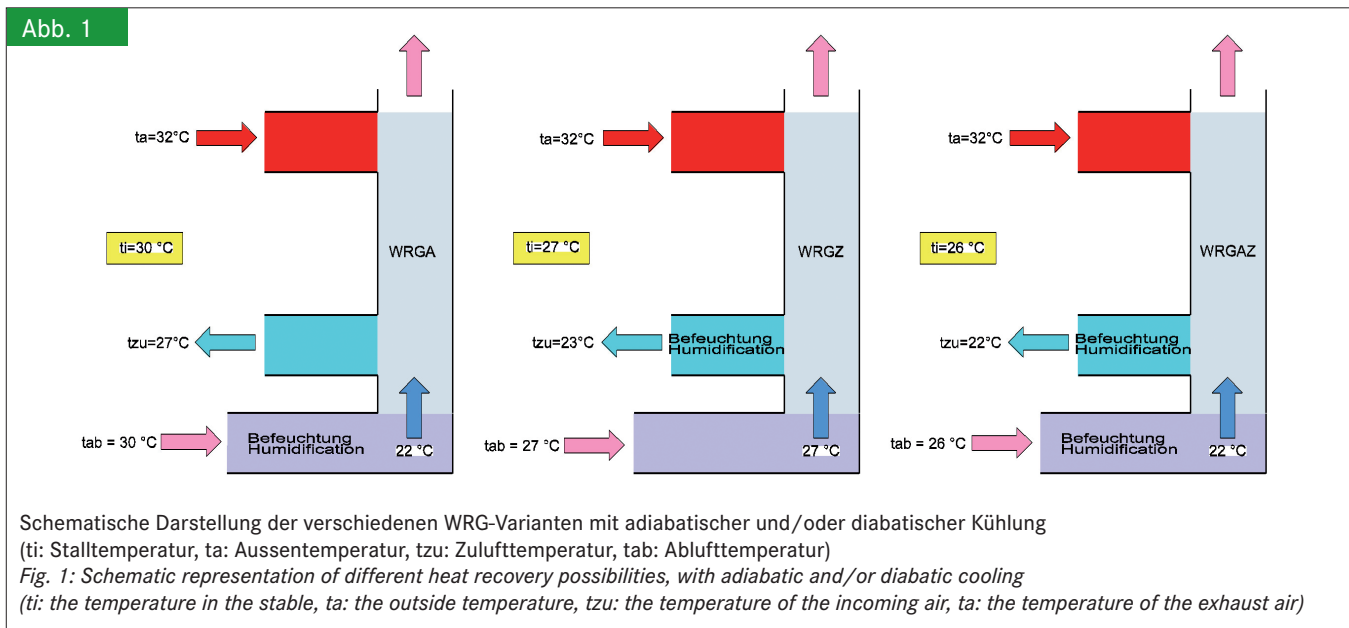
The usefulness of conventional heat recovery systems in animal houses during heating periods tends to be restricted to times when the perceptible heat given off by the animals is not sufficient to generate a heat output that is desirable for the pens. Once the temperature in the animal house exceeds this setpoint temperature, control valves are deployed to channel the incoming / outgoing air flow past the heat exchanger via a bypass valve, thus preventing any further exchange of heat between the incoming and outgoing air. By humidifying the outgoing air prior to entry into the heat exchanger, this is cool and can escape the fresh air heat. Because of the separate streams of air (Supply and exhaust air) it affects the water content is not the stable air. Using a dynamic calculation model, the fall in temperature inside the stable can be predicted depending on the thermal efficiency of the heat exchanger, the air flow and ventilation rate and the

amount of water vaporised. The report deals with the theoretical principles and the effect of heat exchangers featuring adiabatic cooling of the incoming and/or outgoing air on the climate in animal houses. On the basis of an example, the cooling effect of different variants is compared and assessed. The results presented are based on a dynamic calculation model. The technical and economic feasibility of heat recovery systems of this kind will be examined later in a pilot plant.

■ Der vorliegende Beitrag behandelt die theoretischen Grundlagen und die Auswirkungen von Wärmetauschern mit adiabatischer Kühlung der Ab- und/oder Zuluft auf das Stallklima. Anhand eines Beispiels wird die Kühlwirkung verschiedener Varianten verglichen und beurteilt. Die vorgestellten Ergebnisse beruhen auf einem dynamischen Berechnungsmodell. Die technische und wirtschaftliche Machbarkeit solcher Wärmerückgewinnungsanlagen soll in einer Pilotanlage geprüft werden.

## Wirkungsprinzip

Je nachdem ob die Befeuchtung der Luft stattfindet - in der Abluft oder in der Zuluft - kann zwischen drei Varianten unterschieden werden. Bei der Befeuchtung der Abluft (Variante WRGA, **Abbildung 1**, links) erfolgt die Zuluftkühlung vollständig diabatisch durch Wärmeaustausch im Wärmetauscher. Dies hat den Vorteil, dass der Wassergehalt der Stallluft nicht erhöht wird. Die Abluft kann folglich bis zu ihrem Sättigungspunkt (100 % relative Feuchtigkeit) mit Wasser angereichert werden. Wie stark die Abluft abkühlt, hängt von der relativen Feuchtigkeit der Stallluft ab. Diese ist vom Außenklima, Tierbestand und der Luftrate abhängig. Eine Temperatursenkung von bis zu 10 °C ist möglich.



Anstelle der Abluft kann auch die Zuluft befeuchtet werden (Variante WRGZ, **Abbildung 1**, Mitte). Die Befeuchtung der Zuluft erhöht im Gegensatz zur Variante WRGA den Wassergehalt der Stallluft. Damit die relative Feuchtigkeit der Stallluft nicht über den Grenzwert (z. B. 70 %) ansteigt, ist die zerstäubte Wassermenge in der Zuluft zu beschränken. Anstatt das Wasser in der Zuluft zu zerstäuben, kann es auch breitflächig mittels Hochdruckdüsen im Stall vernebelt werden. Die Variante WRGZ unterscheidet sich von der üblichen Hochdruckvernebelung in der Stallluft dadurch, dass die Zuluft im Wärmetauscher diabatisch vorgekühlt wird – vorausgesetzt die Stalltemperatur liegt unter der Außentemperatur.

In einer Anlage mit Befeuchtung der Ab- und Zuluft (WRGAZ, **Abbildung 1**, rechts) wird die relative Feuchtigkeit der Abluft bis auf 100 % erhöht. Die relative Feuchtigkeit der Zuluft kann meistens nicht bis auf 100 % erhöht werden, da sonst die relative Feuchtigkeit der Stallluft zu stark ansteigen würde. Mit dieser Variante kann das maximale adiabatische und diabatische Kühlpotential der WRG ausgeschöpft werden.

### Berechnungsgrundlagen

Mithilfe eines Simulationsmodells, in welchem alle Regelgrößen – fühlbare und latente Wärmeabgabe der Tiere, Außen- und Innenklima, Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung, thermischer Wirkungsgrad der WRG – dynamisch verknüpft sind, kann der Einfluss der Befeuchtung der Ab- und Zuluft in der WRG auf das Stallklima untersucht werden. Die Abkühlung lässt sich mit anderen Kühlverfahren wie Erdwärmetauscher (EWT) und Hochdruckvernebelung (HDV) im Stall vergleichen.

Da die Stalltemperatur sowohl Zielgröße wie auch Einflussgröße ist, kommt bei der Berechnung ein Iterationsverfahren zur Anwendung. Als Rahmenbedingungen für die Kühlung gelten die maximal zulässige relative Feuchtigkeit im Stall, der Sättigungspunkt der Luft und der thermische Wirkungsgrad

der Wärmerückgewinnungsanlage. Die Temperatur des zerstäubten Wassers hat im Bereich von 10 bis 20 °C nur einen sehr geringen Einfluss auf die Stalltemperatur (< 0,1 °C).

### Berechnungsbeispiel

Das Berechnungsbeispiel bezieht sich auf einen Stall mit 600 Mastschweinen mit 100 kg Lebendgewicht. Die Außentemperatur beträgt 32 °C, die relative Feuchtigkeit außen 40 %. Die maximal zulässige relative Feuchtigkeit in der Stallluft ist auf 70 % begrenzt. Die Transmissionsverluste betragen 257 W/°C. Die Temperatur des zerstäubten Wassers beträgt 20 °C. Bei den Berechnungen wird die thermische Trägheit des Gebäudes nicht berücksichtigt (stationäre Wärmeströmung).

$t_{i, \text{referenz}}$ :	Temperatur im Referenzstall (ohne Aufbereitung der Zuluft) °C
$t_{i, \text{WRGA}}$ :	Temperatur im Stall mit WRGA (adiabatische Kühlung der Abluft) °C
$t_{i, \text{WRGZ}}$ :	Temperatur im Stall mit WRGZ (adiabatische Kühlung der Zuluft) °C
$t_{i, \text{WRGAZ}}$ :	Temperatur im Stall mit WRGAZ (adiabatische Kühlung der Ab- und Zuluft) °C
$t_{i, \text{HDV}}$ :	Temperatur im Stall mit HDV (Hochdruckvernebelung) °C
$t_{i, \text{EWT}}$ :	Temperatur im Stall mit EWT (Erdwärmetauscher) °C
$H_S$ :	fühlbare Wärmeabgabe der Tiere (abhängig von $t_i$ ) W
$t_a$ :	Außentemperatur °C
$t_b$ :	Temperatur im Erdmantel um die Rippenrohre °C
$t_w$ :	Wassertemperatur der Befeuchtungsanlage °C
$q_T$ :	Transmissionsverluste W/°C
$V$ :	Luftrate m <sup>3</sup> /h
$r$ :	Luftdichte kg/m <sup>3</sup>
$W_{\text{ab}}$ :	zerstäubte Wassermenge in der Abluft kg/h
$W_{\text{zu}}$ :	zerstäubte Wassermenge in der Zuluft kg/h
$W_{\text{HDV}}$ :	Zerstäubte Wassermenge in der Stallluft kg/h
$\eta_{\text{WRG}}$ :	thermischer Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnungsanlage %
$\eta_{\text{EWT}}$ :	thermischer Wirkungsgrad des Erdwärmetauschers %

$$t_{i, \text{referenz}} = \frac{H_s + q_T \cdot t_a + V \cdot 0.28 \cdot \rho \cdot t_a}{q_T + V \cdot 0.28 \cdot \rho} \tag{Gl. 1}$$

$$t_{i, \text{WRGA}} = \frac{H_s + q_T \cdot t_a + V \cdot 0.28 \cdot \rho \cdot [t_a - \eta_{\text{WRG}} \cdot (t_a - (t_i - \frac{W_{ab} \cdot 680}{V \cdot 0.28 \cdot \rho}))] - \eta_{\text{WRG}} \cdot W_{ab} \cdot 1.16 \cdot (t_i - t_w)}{q_T + V \cdot 0.28 \cdot \rho} \tag{Gl. 2}$$

$$t_{i, \text{WRGZ}} = \frac{H_s + q_T \cdot t_a + V \cdot 0.28 \cdot \rho \cdot [t_a - \eta_{\text{WRG}} \cdot (t_a - t_i) - \frac{W_{zu} \cdot 680}{V \cdot 0.28 \cdot \rho}] - W_{zu} \cdot 1.16 \cdot (t_i - t_w)}{q_T + V \cdot 0.28 \cdot \rho} \tag{Gl. 3}$$

$$t_{i, \text{WRGAZ}} = \frac{H_s + q_T \cdot t_a + V \cdot 0.28 \cdot \rho \cdot [t_a - \eta_{\text{WRG}} \cdot (t_a - (t_i - \frac{W_{ab} \cdot 680}{V \cdot 0.28 \cdot \rho}))] - \frac{W_{zu} \cdot 680}{V \cdot 0.28 \cdot \rho} - (\eta_{\text{WRG}} \cdot W_{ab} + W_{zu}) \cdot 1.16 \cdot (t_i - t_w)}{q_T + V \cdot 0.28 \cdot \rho} \tag{Gl. 4}$$

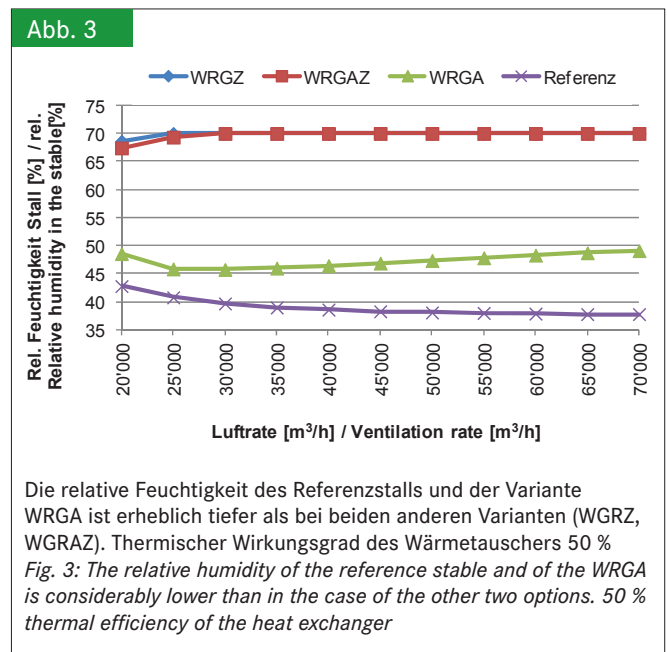
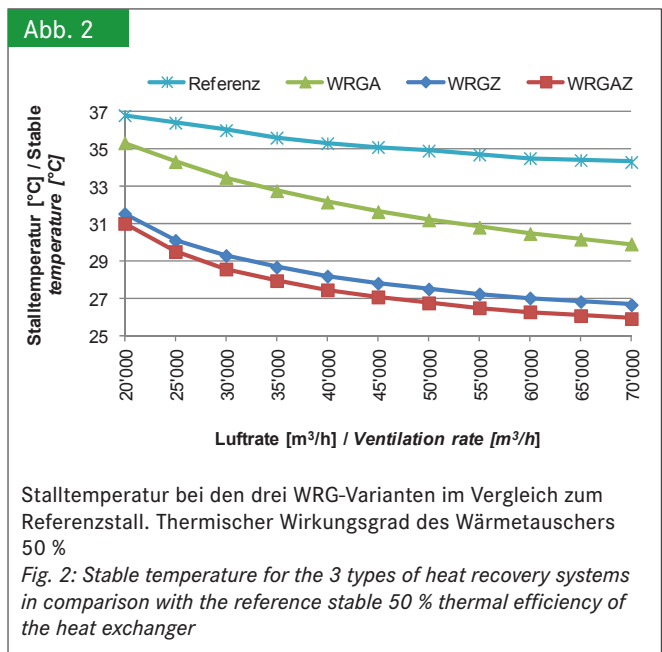
$$t_{i, \text{HDV}} = \frac{H_s + q_T \cdot t_a + V \cdot 0.28 \cdot \rho \cdot t_a - W_{\text{HDV}} \cdot 680 - W_{\text{HDV}} \cdot 1.16 \cdot (t_i - t_w)}{q_T + V \cdot 0.28 \cdot \rho} \tag{Gl. 5}$$

$$t_{i, \text{EWT}} = \frac{H_s + q_T \cdot t_a + V \cdot 0.28 \cdot \rho \cdot (t_a - \eta_{\text{EWT}} \cdot (t_a - t_b))}{q_T + V \cdot 0.28 \cdot \rho} \tag{Gl. 6}$$

**Befeuchtung der Ab- und Zuluft im Vergleich**

Bei der Variante WRGA lässt sich die Ablufttemperatur bei einer Luftrate von 60 000 m<sup>3</sup>/h auf 21,8 °C senken; vorausgesetzt, die relative Feuchtigkeit der Abluft wird auf 100 % erhöht. Die Zulufttemperatur sinkt von 32 °C (Außentemperatur) auf 26,9 °C, wenn der Wirkungsgrad des Wärmetauschers 50 % beträgt. Dank dieser Abkühlung liegt die Stalltemperatur (30,5 °C) etwa 1,5 °C unter der Außentemperatur (**Abbildung 2**). Ohne WRGA würde die Stalltemperatur 34,5 °C betragen. Die relative Feuchtigkeit der Stallluft beträgt bei 60 000 m<sup>3</sup>/h 48,3 % (**Abbildung 3**).

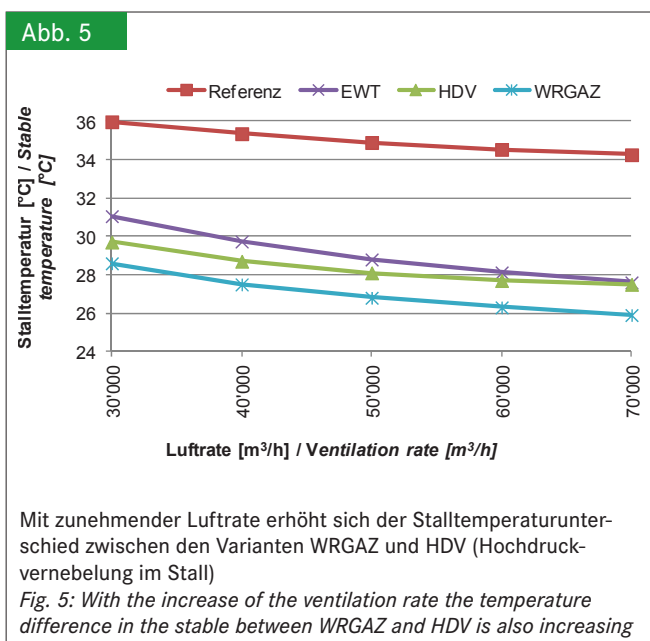
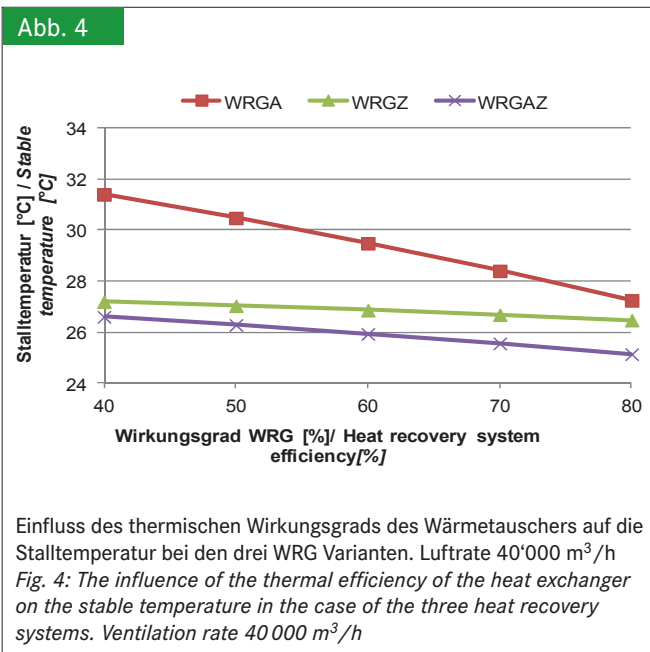
Die Befeuchtung der Zuluft (WRGZ) ist einerseits durch die maximale Wasseraufnahmefähigkeit der Zuluft, andererseits durch die maximal zulässige relative Feuchtigkeit im Stall (70 %) begrenzt. Bei einer Luftrate von 60 000 m<sup>3</sup>/h beträgt die Zulufttemperatur 22,8 °C, die Stalltemperatur 27,0 °C (**Abbildung 2**). Die Stalltemperatur ist im Vergleich zur WRGA 3,5 °C geringer, die relative Feuchtigkeit jedoch 21,7 % höher (**Abbildung 3**). Damit die relative Feuchtigkeit der Stallluft nicht über den Grenzwert (70 %) steigt, darf die relative Feuchtigkeit der Zuluft bei 60 000 m<sup>3</sup>/h maximal 83,5 % betragen.



Wird sowohl die Abluft wie auch die Zuluft adiabatisch gekühlt (WRGAZ), sinkt die Stalltemperatur bei einer Lüftrate von 60 000 m<sup>3</sup>/h auf 26,2 °C (**Abbildung 2**). Auch bei dieser Variante muss mit zunehmender Lüftrate die relative Feuchtigkeit in der Zuluft begrenzt werden, damit die Feuchtigkeit der Stallluft nicht zu hoch wird.

#### Einfluss des thermischen Wirkungsgrads des Wärmetauschers

Der thermische Wirkungsgrad wirkt sich am stärksten bei der Variante WRGA auf die Stalltemperatur aus (**Abbildung 4**). Bei der Variante WRGZ beträgt der Temperaturunterschied zwischen einem Wirkungsgrad von 40 % und 80 % nur etwa 0,7 °C (Lüftrate 40 000 m<sup>3</sup>/h), bei der Variante WRGA dagegen 4,2 °C und bei der Variante WRGAZ 1,5 °C.



#### Vergleich zur Hochdruckvernebelung im Stall und zum Erdwärmetauscher

Für den Vergleich werden folgende Annahmen getroffen: die relative Feuchtigkeit (70 %) der Stallluft wirkt begrenzend auf die HDV im Stall sowie auch auf die Befeuchtung der Zuluft in der WRGAZ. Der thermische Wirkungsgrad des Wärmetauschers ist 50 %. Die Zulufttemperatur bei der Variante EWT beträgt 24 °C bei einer Außentemperatur von 32 °C.

Bei der HDV im Stall erfolgt die gesamte Zuluftkühlung adiabatisch. Im Falle einer WRGAZ wird ein Teil der Temperatursenkung diabatisch durch den Wärmeaustausch zwischen Abluft und Zuluft erzielt. Hierdurch ist eine 1 bis 1,5 °C tiefere Stalltemperatur möglich (**Abbildung 5**). Der Kühleffekt des EWT ist bei einer Lüftrate von 70 000 m<sup>3</sup>/h etwa gleich groß wie bei der HDV im Stall, allerdings ist die relative Feuchtigkeit um 15 % geringer.

#### Wirtschaftliche Aspekte

Bei den WRG-Varianten mit adiabatischer Kühlung entstehen gegenüber herkömmlichen WRGs fixe Mehrkosten wegen der Befeuchtungsanlage und des größeren Wärmetauschers, der auch für die Sommerlüftrate ausreichen muss. Bei den Betriebskosten sind zusätzliche Kosten für den Wasser- und den Strombedarf der Pumpen zu berücksichtigen.

Dafür sind gegenüber herkömmlichen WRGs auch Kosteneinsparungen möglich. Der Bypass auf der Zu- und Abluftseite (Klappen, Kamine) ist nicht nötig und die Steuerung wird einfacher. Eine zusätzliche Kostenreduktion ist möglich, wenn man die Kühlung der WRG nutzt und die Lüftrate im Sommer reduziert. Im Beispiel beträgt die Stalltemperatur im Falle einer WRGAZ 28,6 °C bei einer Lüftrate von 30 000 m<sup>3</sup>/h gegenüber 34,5 °C bei einer Lüftrate von 60 000 m<sup>3</sup>/h im Referenzstall.

Fließt die Zuluft das ganze Jahr durch den Wärmetauscher, ist wegen des zusätzlichen Luftwiderstandes mit höheren Stromkosten für die Lüfter zu rechnen. Allerdings verringert sich der Strombedarf, wenn bei hohen Außentemperaturen dank der Kühlung mit der WRG die Lüftrate reduziert werden kann. Je größer die WRG dimensioniert wird, desto geringer ist bei gleicher Lüftrate der Luftwiderstand und desto größer der thermische Wirkungsgrad – sowohl im Winter wie auch im Sommer. Andererseits steigen die Investitionskosten mit zunehmender Größe der Anlage. Weitere Forschung und praktische Versuche sind notwendig, um das wirtschaftliche Optimum zu finden.

#### Schlussfolgerungen

Durch Integration einer adiabatischen Kühlung auf der Ab- und/oder Zuluftseite trägt die WRG das ganze Jahr zur Stallklimaregelung bei. Die Sättigung der Abluft mit Wasserdampf vor dem Wärmetauscher kühlt diese stark ab. Die Abkühlung der Zuluft erfolgt diabatisch und hat deswegen keinen Einfluss auf den Wassergehalt der Stallluft. Je besser der thermische Wirkungsgrad des Wärmetauschers, desto mehr Wärme wird der Zuluft entzogen. Die Befeuchtung der Zuluft erzielt im Vergleich

zur Abluft eine größere Kühlwirkung. Allerdings ist sie durch die relative Feuchtigkeit der Stallluft begrenzt. Im Gegensatz zur HDV im Stall erfolgt beim Einsatz einer WRG mit Zuluftbefeuchtung nicht die gesamte Kühlung adiabatisch, sondern auch teilweise diabatisch durch Wärmeaustausch zwischen Abluft und Zuluft.

Der ganzjährige Einsatz von WRG verursacht einerseits wegen des Luftwiderstandes im Wärmetauscher einen höheren spezifischen Strombedarf der Lüfter, andererseits lässt sich der Energiebedarf dank der geringeren erforderlichen Luftrate im Sommer auch senken.

Bei zunehmender Klimaerwärmung nimmt der Bedarf der Kühlung in Schweine- und Geflügelställen zu. Wärmetauscher mit integrierter adiabatischer Kühlung der Ab- und Zuluft bieten sich als energetisch vertretbare Lösung sowohl zur Senkung als auch zur Anhebung der Stalltemperatur an.

## Autoren

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

**Markus Sax, dipl. Bauing. FH, MAS Energieing. Gebäude**, wissenschaftl. Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Bau, Tier und Arbeit der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Ettenhausen, E-Mail: markus.sax@art.admin.ch

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

## Professor Dr. Karl Rabold mit 85 Jahren verstorben

Am 17.5.2012 verstarb Prof. Dr. Karl Rabold. Professor Rabold, geboren am 27.2.1927 in Karlsruhe studierte von 1949 bis 1952 Landwirtschaft an der Universität Hohenheim. Nach seinem Diplom legte er 1955 in Wangen die Prüfung als Molkereimeister ab. Es folgte ein Jahr Tätigkeit in der Molkerei Ettlingen. Seit 1956 war er an der Universität Hohenheim wissenschaftlich tätig, hier wurde er 1957 promoviert und habilitierte 1967 mit einer Arbeit zur Wirkung technischer Faktoren der Melkmaschine auf die Milchabgabe von Kühen. Auf dem alten Unteren Lindenhof plante er bereits 1957 Versuche und war dort ab 1958 mit der wissenschaftlichen Planung der neuen Einrichtungen zur Tierhaltung befasst. 1961 wurde Professor Rabold zum Leiter des Unteren Lindenhofs bestellt. Seinem weitsichtigen Wirken verdanken wir das uns allen bekannte heutige Erscheinungsbild der Milchvieh- und Schweinehaltung des Unteren Lindenhofs. 1971 wurde er als Professor für das Fach Allgemeine Tierhaltung berufen, das spätere Fachgebiet Milcherzeugung. Er war 1968 Gastdozent an der landwirtschaftlichen Universität Uppsala, von 1970 bis 1974 Gastdozent an der Universität Kiel und von 1976 bis 1978 jeweils mehrere Monate in einem GTZ-Projekt in Malaysia tätig.

Professor Rabold hat seit 1960 die Entwicklung der Melkmaschine entscheidend mitgestaltet und die Entwicklung der ersten Melkmaschine mit Doppelvakuum initiiert. Unter seiner Leitung wurden mehrere Dissertationen zur Physiologie des Milchentzugs verfasst, die zu neuen Erkenntnissen über die Reaktion der laktierenden Milchdrüse auf häufigen Milchentzug führten. Auf dem Gebiet der Ethologie entstanden seit 1978 wichtige Arbeiten zum Verhalten der Milchkuh. Diese Arbeiten führten ihn ab 1979 zu ersten Untersuchungen zum Konzept eines integrierten Hal-



Prof. Dr. Karl Rabold Bild: privat

tungs- und Melksystems (Melkroboter). Dazu hielt er auch eines der ersten Patente zu einer technischen Lösung für dieses neue Verfahren. Bereits 1987 meldete er dann zusammen mit anderen ein Patent zum Erkennen der Zitzenposition mit zwei Kameras an, das deutliche Vorteile gegenüber der Ortung mit Ultraschall oder Laserschnittbildern bot.

Professor Rabold war seit 1974 Mitglied der Arbeitsgruppe für Mastitisbekämpfung der Alpenländer, die in der heutigen AFEMA (Arbeitsgruppe zur Förderung von Eutergesundheit und Milchhygiene in den Alpenländern) aufging. So entstanden mehrere Dissertationen, die in Zusammenarbeit mit den Eutergesund-

heitsdiensten produktionstechnisch wichtige Zusammenhänge zwischen Haltungssystemen, Melkverfahren, Milchleistung und Mastitishäufigkeit aufdeckten. Diese Untersuchungen eröffneten ein weites Arbeitsgebiet, die Erzeugung von Milch in höchster hygienischer Wertigkeit. Hier arbeitete er auch nach der Pensionierung engagiert weiter und hielt viele Vorträge vor Landwirten und Tierärzten. Auch im KTBL war Professor Rabold schon seit 1969 Mitglied.

Seine Mitarbeiter schätzten an ihm, neben seiner Herzenswärme und seiner Zeit, die er sich für sie nahm, besonders die Offenheit gegenüber neuen Ideen, auch wenn sie nicht seiner Meinung entsprachen. Immer in Erinnerung wird seine Folgerung nach kontroverser Diskussion bleiben: „... dann machen wir eben einen Versuch.“ Und dieser Versuch führte oft zu neuen Erkenntnissen und war Anlass für weiterführende Diplom- oder Doktorarbeiten. Auch im privaten Bereich schätzte man Professor Rabold aufgrund seines offenen Ohres für Probleme seiner Mitmenschen und seinen engagierten Ratschlägen oder Hilfestellungen.