

Hybride Hochleistungs-WRG

auf Basis des Kreislaufverbundsystems

Dr.-Ing. Christoph Kaup, Geschäftsführer u. Entwicklungsleiter

Hochleistungs-WRG auf Basis der KV-Systeme können neben der primären Funktion der Wärmerückgewinnung auch weitere Funktionen direkt übernehmen. Nachfolgend werden die Möglichkeiten der hybriden Verdunstungskühlung aufgezeigt, die auch mehrfach verwendet werden kann, um den Wirkungsgrad der indirekten Befeuchtungskühlung erheblich zu steigern. Insbesondere integrierte Systeme müssen ganzheitlich betrachtet werden. Die mehrfach funktionale Nutzung des Kreislaufverbundsystems durch die Einspeisung von Energien in den Zwischenkreis zeigt den wesentlichen Unterschied zu allen anderen WRG-Systemen auf.

Dass die Gesamtfunktion nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch gegeben ist, zeigen die dargestellten Messergebnisse durch unabhängige Institute. Neben den wärmetechnischen Betrachtungen sind auch die Konstruktionsmerkmale der Wärmerückgewinnung im Hinblick auf die VDI 6022 und VDI 3803 zu berücksichtigen.

Ein Kreislaufverbundsystem besteht aus zwei Wärmeübertragern, die im Fortluftstrom und im Außenluftstrom installiert sind. Zwischen den beiden Wärmeübertragern wird ein Wärmeträgermedium (Zwischenmedium) im Kreislauf gefördert, das die Wärme

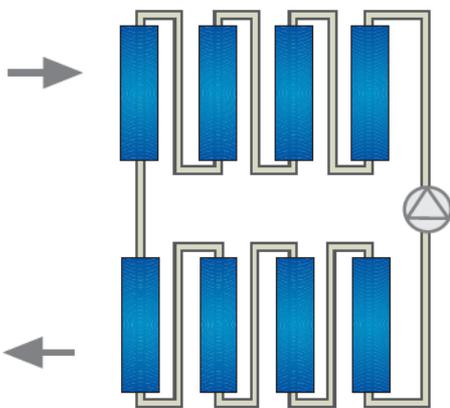


Abb. 1 Reihenschaltung der Wärmeübertragerstufen

von einem Register zum anderen Register überträgt. Der Wirkungsgrad üblicher KV-Systeme liegt meist bei etwa 40 bis 50%. Durch eine konstruktive Optimierung erreichen Hochleistungs-KV-Systeme jedoch Wirkungsgrade von 70 bis 80%. Hierzu werden Wärmeübertrager benötigt, die eine entsprechende Baulänge von 600 mm bis 1200 mm aufweisen. Diese Baulänge entspricht

einer Anzahl von ca. 16 bis 32 Rohrreihen in Luftrichtung bzw. NTUs ($k \times A / W_1$) von ca. 4 bis 8. Um den Druckverlust gering zu halten, sollte die Anströmgeschwindigkeit der Luft bei max. 2.5m/s liegen. Die Schaltung des Zwischenmediums der Wärmeübertrager ist ebenfalls von großer Bedeutung. So muss die Führung des Mediums im Wärmeübertrager mit möglichst hohem Gegenstromanteil erfolgen. Kreuzstromanteile sind zu minimieren und Gleichstromanteile absolut zu vermeiden, da gerade im Gleichstrom der Austauschgrad des Wärmeübertragers wesentlich niedriger ist als im Gegenstrom. Somit ergibt sich eine Reihenschaltung der einzelnen Wärmeübertragungsstufen, die streng einzuhalten ist, s. Abb. 1 [1]. Ein weiteres entscheidendes Kriterium ist die Abstimmung zwischen dem Luftmassenstrom und dem Wasser- bzw. Solemassenstrom. Der höchste Wärmerückgewinn kann dann erzielt werden, wenn die Wärmestromkapazitäten der beiden Medien gleich sind, also:

$$W_L = W_Z$$

$$\dot{m}_L \times c_{pL} = \dot{m}_Z \times c_{pZ} \quad [2]$$

L = Luftseite
Z = Zwischenmedium (Sole).

Da die beiden spezifischen Wärmekapazitäten c_{pL} und c_{pZ} bei definierten Zustandsbedingungen mit genügender Genauigkeit als konstant angesehen werden können, ergibt sich:

$$\dot{m}_L / \dot{m}_Z = c_{pZ} / c_{pL}$$

mit $c_{pZ} = 3.8 \text{ kJ/kg K}$ (Sole) und
 $c_{pL} = 1.01 \text{ kJ/kg K}$ folgt:
 $\dot{m}_L / \dot{m}_Z = 3.8 / 1.01 = 3.7$

Dies bedeutet, dass der Luftmassenstrom ca. 4-mal so groß sein muss wie der Solemassenstrom, um eine maximale Wärmeübertragung sicherstellen zu können (Abb. 2) [3]. Arbeitet die Anlage luftseitig mit kon-

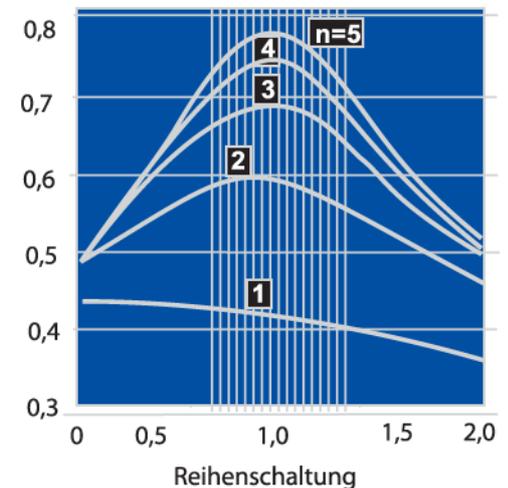


Abb. 2 Temperaturaustauschgrad als Funktion des Wärmestromkapazitätsverhältnisses bei $k \times A / W_W = \text{const.}$ [4]

stanten Volumenströmen, kann der Massenstrom auf der Wasserseite ebenfalls konstant einreguliert werden. Heute werden aber vielfach Anlagen mit variablen Luftvolumenströmen bedarfsgerecht betrieben [5] [6]. In diesem Fall muss auch das Trägermedium entsprechend dem Wärmestromkapazitätsverhältnis geregelt



Abb. 3 Hybride indirekte Verdunstungskühlung

werden, um auch im Teillastbereich eine maximale Wärmeübertragungsleistung sicherstellen zu können. Dies erfolgt sinnvollerweise über eine Drehzahlanpassung der Förderpumpe mittels Frequenzregulierung. Das Istwertsignal wird dabei von einem Durchflussmessinstrument im Trägerstrom erfasst. Das Sollwertsignal liefern zwei Volumenstrom-Messeinrichtungen auf den beiden Luftseiten.

Feuchte Bedingungen bei der indirekten hybriden Befeuchtungskühlung

Die beschriebenen Grundlagen gelten für trockene Bedingungen. Bei feuchten Bedingungen muss jedoch die effektive Wärmekapazität korrigiert werden. Feuchte Bedingungen bestehen insbesondere dann, wenn der Abluftwärmeaustauscher zur indirekten Verdunstungskühlung mit Wasser direkt besprüht wird (Hybride Kühlung, siehe Abb. 3 [7]). In diesem Fall errechnet sich die theoretisch maximal erreichbare Wärmekapazität cp_L der Luft aus der Änderung der spezifischen Enthalpie h_L mit der Temperatur t_L .

$$cp_L = dh / dT$$

Der idealisierte Prozessverlauf führt entlang der Dampfdruckkurve von Wasser bzw. entlang der 100% relativen Feuchte, siehe Abb. 4. Der Wert von cp_{Lx} , der effektiven Wärmekapazität der sich befeuchtenden Luft, kann als dH/dT entlang dieser Kurve berechnet werden.

$$cp_{Lx} = dH_{100\%} / dT$$

Die spezifische Wärmekapazität für trockene Luft beträgt 1.01 kJ/kg K. Die effektive Wärmekapazität der befeuchteten Luft nimmt im Temperaturbereich zwischen 17 und 27 °C Werte von 3 bis 4.4 kJ/kg K an. Damit ändert sich das Wärmestromkapa-

zitätsverhältnis im Befeuchtungsfall deutlich, da auf der Zuluftseite die spezifische Wärmekapazität bei 1.01 kJ/kg K bleibt, während sich auf der Abluftseite durch die hybride Befeuchtung die spezifische Wärmekapazität auf z. B. 3 erhöht [8].

Dies bedeutet, dass bei gleicher installierter Wärmeübertragerfläche ein deutlich höherer Wirkungsgrad erzielt werden kann.

Das Maximum wird in diesem Fall nicht bei $W1 / W2 = 1$, sondern bei $W1 / W2 = 1.5$ liegen. Das Maximum verschiebt sich damit in Richtung höherer Zwischenmedienmassenströme.

Rohrschaltung im Wärmeübertrager

Neben der Bedingung des optimalen Wärmestromkapazitätsverhältnisses muss bei der Konstruktion der Wärmeübertrager darauf geachtet werden, dass die Wassergeschwindigkeit in den Rohren der einzelnen Register

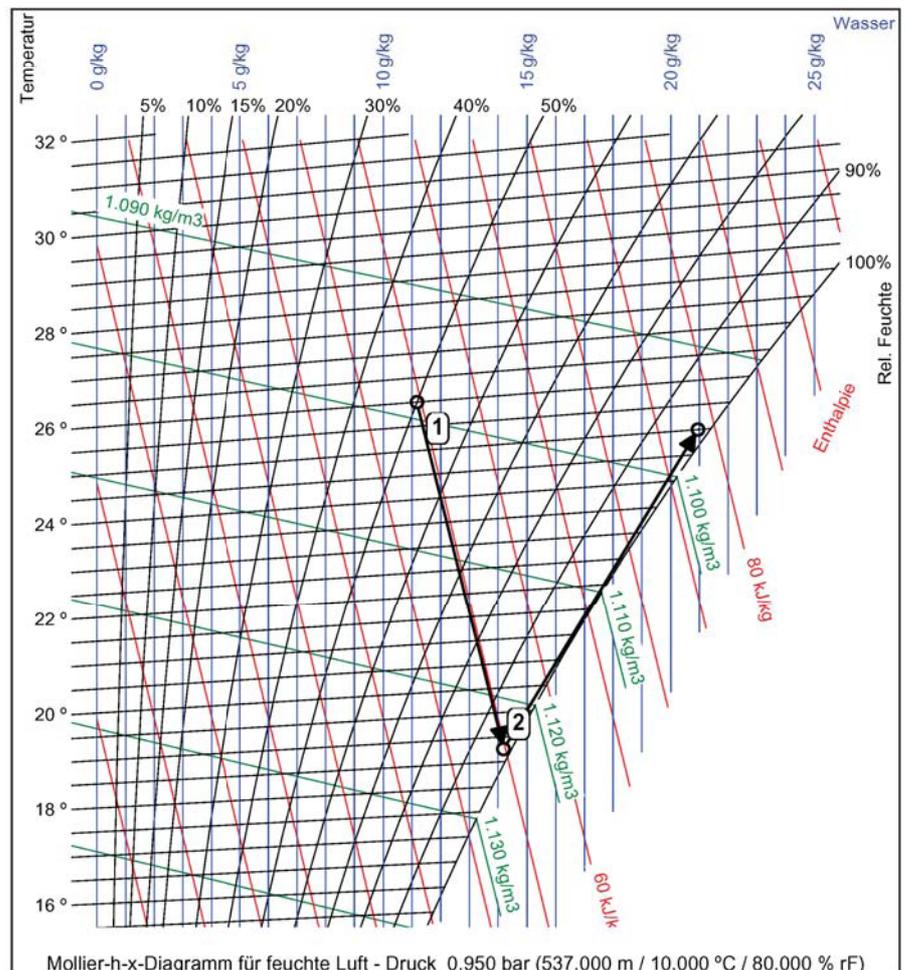


Abb. 4 Idealisierte Zustandsänderung im indirekten Verdunstungsbefeuchter

so dimensioniert wird, dass zum einen ein größtmöglicher Wärmeübergang sichergestellt ist und zum anderen die Druckverluste des Systems nicht zu hoch ausfallen. Auf Grund der stark unterschiedlichen Wärmekapazitäten von Luft und Wasser bzw. Sole und der sich zwangsläufig einstellenden großen Temperaturdifferenzen auf der Mediumseite sind die

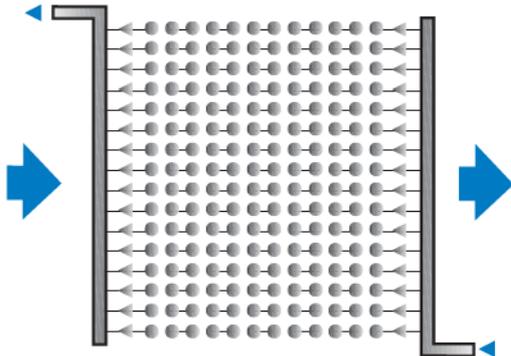


Abb. 5 Kreuz-/Gegenstromschaltung von Rippenrohrwärmeübertragern

Umlaufmengen des Trägermediums sehr niedrig. Hier ist vor allem darauf zu achten, dass sich die Strömung des Mediums nicht im laminaren Bereich bzw. im Grenzbereich befindet. Es ist hierzu erforderlich, die Geometrie des Wärmeübertragers so zu wählen, dass eine turbulente Strömung in den Rohren vorherrscht.

Konstruktionsvariablen sind:

- Die Abmessungen des Wärmeübertragers, speziell die Höhe des Registers und damit verbunden die Anzahl der Rohrlagen übereinander,
- der Rohrdurchmesser und die Rohranordnung (Geometrie),
- die Rohrschaltung des Wärmeübertragers.

Speziell der Rohrschaltung des Wärmeübertragers muss eine hohe Bedeutung beigemessen werden, da Gleichstromanteile absolut vermieden werden müssen. Im Gleichstrom ist ein max. Wärmewirkungsgrad von 64% pro Wärmeübertrager ($\Phi_{1/2}$) möglich. Daraus resultiert ein max. WRG-Wirkungsgrad Φ_{ges} im Gleichstrom von:

$$\Phi_{ges} = 1 / (1 / F_1 + 1 / F_2 \times W_1 / W_2 - W_1 / W_2) [9]$$

$$\Phi_{ges} = 1 / (1 / 0.64 + 1 / 0.64 \times 1 - 1)$$

$$\Phi_{ges} = 0.47$$

Die übliche Kreuz-/Gegenstromschaltung von Rippenrohrwärmeübertragern, die in Abb. 5 dargestellt ist, liefert zwar den größtmöglichen Wärmewirkungsgrad, hat allerdings auch Grenzen bezüglich der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums, da jede Rohrlage als Wasserweg angeschlossen ist.

Wird mittels dieser Schaltung und einer vorgegebenen Geometrie die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr nicht mehr im turbulenten Bereich gehalten, kann die in Abb. 6 dargestellte Schaltung verwendet werden. In dieser Schaltung werden z. B. zwei Rohrlagen zu jeweils einem Wasserweg zusammengefasst, wodurch die Wassergeschwindigkeit verdoppelt wird. Die Wassergeschwindigkeit ist hierdurch erhöht, ohne jedoch den Gegenstromanteil von min. 99% zu verringern.

Messergebnisse

Unter Beachtung der beschriebenen Voraussetzungen können dann auch tatsächlich Übertragungsgrade von 0.7 bis 0.8 erreicht werden. Dies haben umfangreiche Messungen auf dem Prüfstand des RWTÜV in Essen und dem nach DIN/EN 45001 akkreditierten Prüfstand des Technikums Luzern in Horw (Schweiz) ergeben, Tab. 1.

Mehrstufige adiabatische Verdunstungssysteme

Die adiabatische indirekte Verdunstungskühlung hat sich in den letzten Jahren bewährt. Über ein Wärmerückgewinnungssystem wird die Verdunstungskälte, die durch einen adiabatischen Befeuchter erzeugt wird, auf die Zuluftseite übertragen. Durch die Aufteilung des Gesamtsystems in

mehrere Stufen entsteht ein mehrstufiges Hybridsystem.

Der Vorteil der Mehrstufigkeit gegenüber einem einstufigen System liegt in der höheren Kälteleistung, die daraus resultiert, dass die Lufttemperatur in den folgenden Stufen nochmals abgesenkt wird und somit die mittlere Temperatur tiefer liegt als bei einem

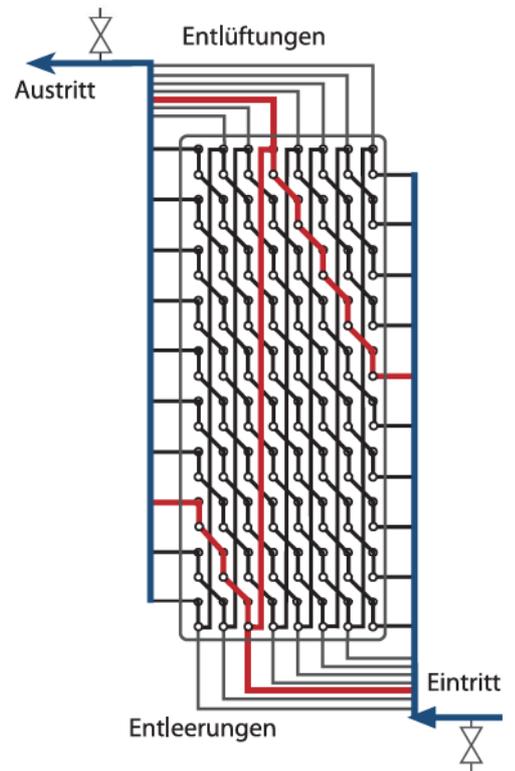


Abb. 6 Fallende Gegensinnverrohrung mit Entlüftung und Entleerung [10]

einstufigen System. Die Kälteleistung kann mit diesem Verfahren um etwa 25% gesteigert werden, ohne dass sich dabei die Druckverluste des Systems erhöhen, denn die ohnehin benötigten Lamellen dienen nicht nur der Wärmeübertragung, sondern werden auch als Verdunstungsfläche herangezogen. Durch Hybridsysteme werden die Elektroenergiekosten reduziert, da der Druckverlust des Befeuchters bzw. der Befeuchter (mehrstufig) entfällt und die mechani-

24 Rohrreihen fluchtende Rohranordnung	68% bei 2.5 m/s	74% bei 1.5 m/s
3 Register a 300 mm Bautiefe	285 Pa	130 Pa
24 Rohrreihen versetzte Rohranordnung	73% bei 2.5 m/s	77% bei 1.5 m/s
3 Register a 300 mm Bautiefe	367 Pa	167 Pa

Tabelle 1 Messergebnisse [11]

sche Kälteerzeugung erheblich später zum Einsatz kommen kann. Messungen eines dreistufigen Systems auf dem Prüfstand des RWTÜV in Essen haben ergeben, dass bei einer Außenlufttemperatur von 33°C bei 35% rel. Feuchte und einer Ablufttemperatur (Raumluft) von 26°C bei 56% rel. Feuchte eine Zulufttemperatur von 22.5°C erreicht wurde (Daten HOWATHERM). Der trockene Wirkungsgrad des Hochleistungs-KV-Systems lag dabei im Winterbetriebsfall bei 76% [12]. Im Sommerbetrieb wird bei 32°C Außenlufttemperatur eine Zulufttemperatur von 22°C erreicht. Erst bei einer weiteren Zulufttemperaturabsenkung wird dann die mechanische Kälteerzeugung notwendig. Bis zu einer Außenlufttemperatur von 24°C könnte somit ohne mechanische Kälteerzeugung gekühlt werden, da die geforderte Zulufttemperatur von z. B. 19°C ausschließlich durch die adiabatische Verdunstungskühlung realisiert werden kann.

Die Messungen und Simulationen des ZAE Bayern ergaben folgende Ergebnisse in Bezug auf eine zweistufige

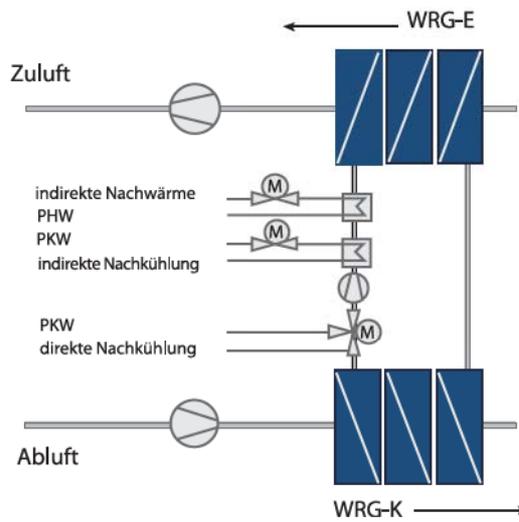


Abb. 7 Wärmeeinspeisung bzw. Wärmeauskopplung in das Hochleistungs-KV-System

der Luftseite über Wasser/Wasser-Wärmeübertrager zusätzlich Nachwärme oder Nachkühlung in das Zwischenträgermedium indirekt einzuspeisen. Auch eine direkte Einspeisung von zusätzlichen Medien (z. B. Kaltwasser) über ein Dreiweg-Ventil ist möglich, Abb. 7.

Dieses Verfahren wird als Wärmeeinspeisung bzw. Wärmeauskopplung bezeichnet. Hierdurch ist es ebenfalls möglich, überschüssige Wärme für andere Aufgaben (z. B. Brauchwasservorwärmung) oder andere Räume nutzbar zu machen. Dies erhöht den Effekt der Wärmerückgewinnung zusätzlich [14]. Mit den dargestellten Sekundärfunktionen ist es auch möglich komplexe Systeme mit erweiterten Funktionen auszubilden, wie Abb. 8 zeigt. So kann beispielsweise eine Entfeuchtungsschaltung mit Entfeuchungskälterückgewinnung aufgebaut werden. Auch die Kältemaschinenabwärme kann über die Fortluft abgeführt werden, indem z. B. das letzte Register ausgekoppelt wird [15].

Konstruktionsmerkmale

Beim Hochleistungs-KV-System müssen Mindestkonstruktionsmerkmale beachtet werden, um auch während der gesamten Lebensdauer des Sys-

Theoretisch max. Leistung bei vollständiger Übertragung: 100%	
WRG + sep. Befeuchter:	67%Simulation
WRG + 2 sep. Befeuchterstufen:	73%Simulation
WRG mit integrierter Hybridbefeuchtung (2 Stufen):	87%Simulation
WRG mit integrierter Hybridbefeuchtung (2 Stufen):	83%Messung

indirekte hybride Verdunstungskühlung [13]: Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass durch die integrierte Befeuchtung gegenüber der separaten eine deutlich höhere Kühlleistung (+19%) erreicht werden kann, ohne dass dabei zusätzlicher Druckabfall erzeugt würde.

Sekundärfunktionsprinzip des KV-Systems

Mit dem KV-System lassen sich weitere Funktionen verbinden. Durch die Zwischenschaltung eines Trägermediums ergeben sich Möglichkeiten ohne weitere Wärmeübertrager auf

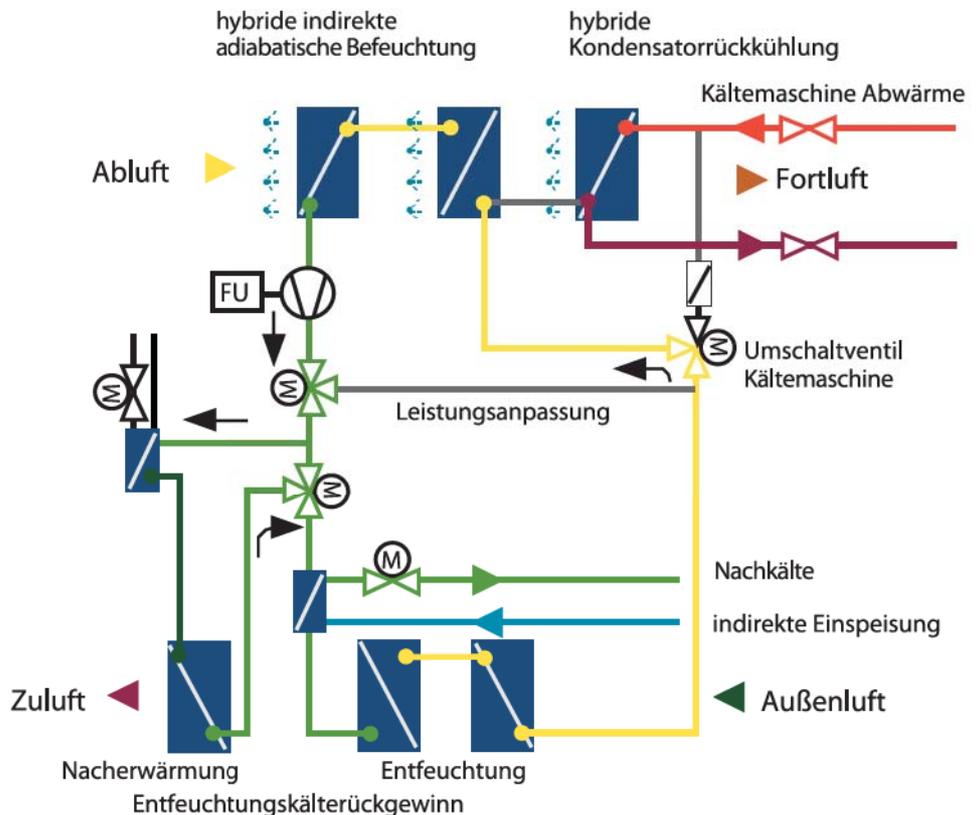


Abb. 8 Erweiterte Sekundärfunktionen im Sommerbetrieb

tems die geforderten Leistungen zu erreichen. Um eine optimale Reinigungsfähigkeit gem. VDI 3803 und VDI 6022 zu gewährleisten dürfen in Luftrichtung max. 300 mm in der Tiefe pro Register verwendet werden. Tiefere Register sind praktisch nicht mehr durchgängig zu reinigen. Wärmeübertrager von z. B. 24 Rohrreihen sind deshalb aus mind. 3 Registern mit 8 Rohrreihen zusammengesetzt. Die einzelnen Register sollten von jeder Seite zugänglich sein bzw. so ausgebildet sein, dass sie leicht ausziehbar sind, um eine praktikable Reinigung zu ermöglichen. Aus Korrosionsgründen ist es sinnvoll, kunststoffbeschichtete Lamellen, Kupfer oder korrosionsbeständiges Aluminium - alles glatt und gratfrei ausgeführt - als Material zu wählen. Die Kunststoffbeschichtung hat den Vorteil der Korrosionsbeständigkeit und der besseren Reinigungsfähigkeit.

Zusammenfassung

Aus den vorgenannten Ausführungen wird deutlich, dass eine Wärmerückgewinnung nicht zwangsläufig mit niedrigen WRG-Zahlen betrieben werden muss.

Gerade die indirekte hybride Verdunstungskühlung, die mehrstufig ausgeführt werden kann, ermöglicht eine besonders hohe Ausnutzung des theoretischen Kältepotenzials.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung z.B. nach VDI 2071 wird letztendlich den Ausschlag für das geeignete WRG-System geben [16].

Hochleistungs-Wärmerückgewinnungssysteme auf Basis des KV-Systems haben sich als eine Alternative zu den bisherigen WRG-Systemen mit hohem Wirkungsgrad mehr als bewährt und sind aufgrund der Eingriffsmöglichkeit in den Zwischenkreis einzigartig.

Autor:

*Dr.-Ing. Christoph Kaup,
Geschäftsführer und Entwicklungsleiter
Howatherm, Brücken
www.howatherm.de*

- [1] Kaup, C.: Die Physik der Hochleistungswärmerückgewinnungssysteme – Übertragungsgrade bis 80% mit berippten Lamellenwärmeübertragern in Blockbauweise, VDI-TGA Jahrbuch 1999
- [2] N.N.: Berechnung von Wärmeübertragern, Kopplung zweier Wärmeübertrager durch einen umlaufenden Wärmeträgerstrom, Ca 13, VDI-Wärmeatlas, 7. Aufl. 1994
- [3] Kaup, C.: Hochleistungswärmerückgewinnungssysteme, IKZ Haustechnik, 1995, Nr. 8/95
- [4] Hausmann, H.: Wärmerückgewinnung in Hallenbädern, In: Wärmerückgewinnung und Abwärmeverwertung 1978
- [5] Kaup, C.: Entwicklungstendenzen bei RLT-Geräten, HLH Bd. 49 (98), Nr. 6, S. 38-48
- [6] Kaup, C.: Möglichkeiten der Energieeinsparung in RLT-Geräten, KK 1995, Nr. 3/95
- [7] Kaup C.: Integrierter Kontaktbefeuchter im Wärmeübertrager, TAB Nr. 2/1997, Bertelsmann Verlag
- [8] Hauer, A., Schölkopf, W.: Abschlussbericht zum Projekt Thermodynamisches Speichersystem mit Zeolith 13 X zum Heizen, Kühlen und Trocknen von Gebäuden, 2001
- [9] N.N.: Berechnung von Wärmeübertragern, Kopplung zweier Wärmeübertrager durch einen umlaufenden Wärmeträgerstrom, Ca 13, VDI-Wärmeatlas, 7. Aufl. 1994
- [10] Kaup, C.: Deutsches Patent DE 198 08 753, 1999
- [11] Technikum Luzern / Prüfberichte Messung KVS-Systeme Fabrikat HOWATHERM, Horw 1997 und 1998
- [12] RWTÜV / Messung WRG-System mit Verdunstungskühlung, Fabrikat HOWATHERM, Essen, 1998
- [13] Raab, U., Lävemann, E.: Indirekte Verdunstungskühlung - Gerätetest und Simulation, ZAE Bayern - Bayrisches Zentrum für angewandte Energieforschung, 2004
- [14] Dehli, F.; Dreher, E.: Wärmerückgewinnung in raumluft- und prozesslufttechnischen Anlagen, In: Handbuch der Energiespartekniken, Band 2, Hrsg: H.L. von Cube, 1983, Verlag C.F. Müller
- [15] Kaup, C.: Minimierung der latenten Kühlleistung durch eine integrierte Rückgewinnung, KI Luft- und Kältetechnik, 12/2003
- [16] Vergleich von Hochleistungswärmerückgewinnungssystemen auf Basis des KV-Systems, HLH, 2/2004



saia-burgess

Smart solutions for comfort and safety

Alles in einem

Heizung + Lüftung + Sanitär

Compact-Plus

Ein Regler mit allen Standard Anlagenprogrammen der Heizungs-, Lüftungs- und Sanitärtechnik!

Beliebige Kombination aller Programme über ein komfortables Konfigurations-Tool!

Heizung

Lüftung

Sanitär



Saia-Burgess Controls AG
Bahnhofstrasse 18
CH-3280 Murten | Schweiz
T 026 672 71 11 | F 026 670 44 43
www.saia-burgess.com
pcd@saia-burgess.com