

## Wärmeübertragung

# Mehrfachfunktionale Hochleistungs-Wärmerückgewinnungssysteme

Christoph Kaup, Brücken

Kreislaufverbund-Systeme (KV-Systeme) sind seit Jahren etabliert und wurden bisher sehr häufig als Wärmerückgewinnungssysteme (WRG) mit niedrigen Übertragungsgraden verwendet. Bei der Beachtung der konstruktiven Kriterien können KV-Systeme als Hochleistungssysteme mit bis zu 80 % Systemübertragungsgrad wirtschaftlich eingesetzt werden. Neben der Funktion der WRG können dann aber auch zusätzliche Funktionen wie Nacherwärmung, Kühlung und weitere Funktionen der Energierückgewinnung im System realisiert werden.

## Autor



**Dr.-Ing. Christoph Kaup**, Jahrgang 1963. Geschäftsführender Gesellschafter von HOWATHERM Klimatechnik GmbH. Vorstandsmitglied und Obmann für Technik des Herstellerverbandes Raumlufttechnische Geräte e. V. Mitglied in Normungsgremien wie z. B. EN 13779, EN 13053 und EN 1886 sowie Richtlinienausschüssen wie z. B. VDI 6022, VDI 3803 und VDI 2071. Lehrbeauftragter am Umwelt-campus Birkenfeld, Fachhochschule Trier, für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung.

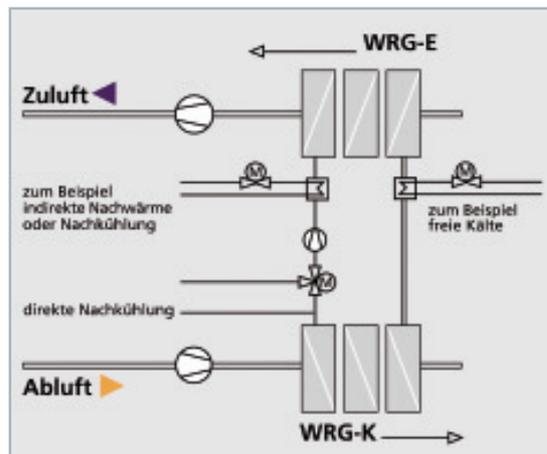


Bild 1

Einspeisung von Wärme oder Kälte in den Umlaufstrom

als auch in den Rücklauf des Systems ein- oder ausgekoppelt werden. Dadurch wird die mehrfachfunktionale Nutzung des Systems überhaupt erst ermöglicht.

Der Medienstrom (Sole) eines Hochleistungs-Kreislaufverbund-Systems, dessen eigentliche Funktion die Wärmerückgewinnung ist, kann daneben auch genutzt werden, um Wärme, aber auch Kälte in das System einzuspeisen.

## Zusatzenergien – Mehrfachfunktionale Nutzung des WRG-Systems

Aus Bild 1 ist ersichtlich, wie Zusatzwärme oder Zusatzkälte direkt oder aber indirekt in den Vorlauf des Umlaufstromes eingespeist werden kann. Energie wird dabei in das WRG-System ein- oder ausgekoppelt. Dadurch, dass in einem solchen Fall kein zusätzlicher Erhitzer oder Kühler im Luftstrom notwendig wird, erhöht sich die Wirtschaftlichkeit eines Hochleistungs-KV-Systems beträchtlich, da zum einen die Investitionskosten verringert und zum anderen die Betriebskosten, verursacht durch die Druckverluste, reduziert werden können [1].

## Übertragungsgrade bei gekoppelten Wärmeübertragern

Kreislaufverbund-Systeme sind unter den WRG-Systemen ein Sonderfall, da sie nicht aus einem Wärmeübertrager, sondern aus zwei durch einen Umlaufstrom gekoppelten Wärmeübertragern bestehen. Und in diesen Umlaufstrom können Energien sowohl in den Vorlauf

Um diese erweiterten Funktionen gewährleisten zu können, sind hohe Systemübertragungsgrade (Gesamtübertragungsgrade) von etwa 80 % erforderlich. Und hierfür errechnen sich Wärmeübertragungsgrade pro Wärmeübertrager (Zuluft und Abluft) von 0,9. Dies bedeutet, dass pro Wärmeübertrager 90 % der eingespeisten Wärme auch tatsächlich an die Luft abgegeben werden.

Der Gesamttemperaturübertragungsgrad  $\Phi_{2ges}$  gibt das Verhältnis der möglichen Temperaturänderung einer WRG-Einrichtung zur maximal möglichen Temperaturänderung, also dem Temperaturpotenzial zwischen Außen- und Raumluft, an. Er stellt somit einen „Wirkungsgrad“ dar und ergibt sich aus den Wärmebilanzen:

$$\Phi = \text{Nutzen der WRG} / \text{Potenzial der WRG}$$

$$\Phi = \dot{Q}_{WRG} / \dot{Q}_P$$

mit:

$\dot{Q}_{WRG}$  Leistung der WRG [kW]  
 $\dot{Q}_P$  maximal mögliche Leistung aufgrund des Temperaturpotenzials [kW]

wobei:

$$\dot{Q}_{WRG} = \dot{m}_2 \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_2'' - \vartheta_2')$$

oder:

$$\dot{Q}_{WRG} = \dot{m}_2 \cdot (h_2'' - h_2')$$

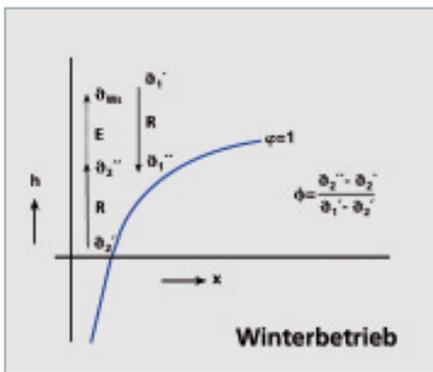


Bild 2

Darstellung der Wärmerückgewinnung im hx-Diagramm (Winterbetrieb)

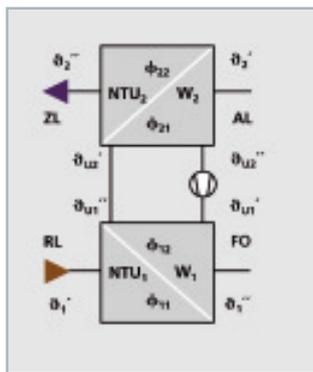


Bild 3

Darstellung des gekoppelten WRG-Systems

wobei:

$\dot{m}$  Massenstrom der Luft [kg/s]

$c_{pL}$  spezifische Wärmekapazität der Luft [kJ/(kg·K)]

$\vartheta$  Temperatur der Luft [°C]

$h$  Enthalpie der Luft [kJ/kg]

Die maximal mögliche Leistung wird durch das Temperaturpotenzial, also die Temperaturdifferenz zwischen Abluft ( $\vartheta_1'$ ) und Außenluft ( $\vartheta_2'$ ), gebildet (siehe **Bild 2**).

Damit ergibt sich aus:

$$\Phi_t = \dot{Q}_{WRG} / \dot{Q}_P = \dot{m}_2 \cdot c_{pL} \cdot$$

$$\cdot (\vartheta_2'' - \vartheta_2') / [\dot{m}_2 \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_1' - \vartheta_2')]$$

der Temperaturänderungsgrad:

$$\Phi_t = (\vartheta_2'' - \vartheta_2') / (\vartheta_1' - \vartheta_2')$$

oder aus dem Verhältnis der Enthalpien, wenn nicht nur sensible Wärme, sondern auch latente Wärme übertragen wird, mit:

$$\Phi_h = (h_2'' - h_2') / (h_1' - h_2')$$

wobei:

$$h = c_{pL} \cdot \vartheta + x (c_{pD} \cdot \vartheta + r_0)$$

mit:

$c_{pL}$  spezifische Wärmekapazität der Luft [kJ/(kg·K)]

$\vartheta$  Temperatur [°C]

$c_{pD}$  spezifische Wärmekapazität des Wasserdampfes [kJ/(kg·K)]

$r_0$  Verdampfungswärme von Wasser [kJ/kg]

Ohne Feuchteübertragung und ohne Kondensation, also unter trockenen Bedingungen, ist  $\Delta x = 0$ . Damit kalkuliert sich die Enthalpie aus:

$$h = c_{pL} \cdot \vartheta$$

Unter dieser Voraussetzung ist der Temperaturänderungsgrad  $\Phi_t$  gleich dem Enthalpieänderungsgrad  $\Phi_h$ .

Die Änderungsgrade werden gemäß DIN EN 308 [2] nur auf der Zuluftseite definiert, um Verwechslungen zu vermeiden. Physikalisch ist aber auch die Definition der Änderungsgrade, bezogen auf die Fortluft, möglich und bei der Betrachtung von mehrfachfunktionalen Verwendungen eines WRG-Systems auch sinnvoll.

Der Gesamtübertragungsgrad kann für das gekoppelte Wärmerückgewinnungssystem (siehe **Bild 3**) auch aus den Übertragungsgraden jedes einzelnen Wärmeübertragers wie folgt hergeleitet werden:

Der Apparat 1 (Fortluftwärmeübertrager) mit den charakteristischen Größen:

$$NTU_{11} = (k \cdot A)_1 / \dot{W}_1$$

$$\mu_{11} = \dot{W}_1 / \dot{W}_s$$

$$\Phi_{11} = (\vartheta_1' - \vartheta_1'') / (\vartheta_1' - \vartheta_{U1})$$

wobei:

NTU number of transfer units

$k$  Wärmedurchgangskoeffizient [W/m²K]

$A$  Wärmeübertragende Fläche [m²]

$\dot{W}$  Wärmekapazitätstrom mit:

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot c_p [W/K]$$

wobei:

$\dot{m}$  Massenstrom des Fluids [kg/s]

und der Apparat 2 (Außenluftwärmeübertrager) mit:

$$NTU_{22} = (k \cdot A)_2 / \dot{W}_2$$

$$\mu_{22} = \dot{W}_2 / \dot{W}_s$$

$$\Phi_{22} = (\vartheta_2' - \vartheta_2'') / (\vartheta_{U2} - \vartheta_2')$$

Für das Gesamtsystem gilt dann:

$$\Phi_{2ges} = (\vartheta_2'' - \vartheta_2') / (\vartheta_1' - \vartheta_2')$$

$$\mu_{2ges} = \dot{W}_2 / \dot{W}_1 = 1 / \mu_{1ges}$$

Hierdurch ergibt sich für die dimensionslose Temperaturänderung des Gesamtsystems [3]:

$$1 / \Phi_{2ges} = 1 / \Phi_{22} + 1 / \Phi_{11} \cdot \mu_{2ges} - \mu_{22}$$

Der optimale umlaufende Wärmekapazitätsstrom ermittelt sich dabei aus [4]:

$$1 / \dot{W}_{sopt} = (k \cdot A)_1 / [(k \cdot A)_1 + (k \cdot A)_2] / \dot{W}_1 +$$

$$+ (k \cdot A)_2 / [(k \cdot A)_1 + (k \cdot A)_2] / \dot{W}_2$$

und:

$$\mu_{22} = (\mu_{2ges} + 1) / 2$$

mit:

$$\mu_{11} = 1 / \mu_{22}$$

Wenn dieser optimale Umlaufstrom erfüllt ist, ergibt sich das effektive  $k \cdot A$  aus:

$$1 / (k \cdot A)_{eff} = 1 / (k \cdot A)_1 + 1 / (k \cdot A)_2$$

Unter trockenen Bedingungen und gleichen Luftmengen gilt:

$$\mu_{2ges} = \dot{W}_1 / \dot{W}_2 = 1$$

und damit:

$$\mu_{11} = \mu_{22} = 1$$

folgt vereinfacht für den Gesamtübertragungsgrad des gekoppelten Systems:

$$1 / \Phi_{2ges} = 1 / \Phi_{22} + 1 / \Phi_{11} - 1$$

### Einfluss der Ein- und Auskopplung von Energieströmen in gekoppelte Wärmeübertrager

Wenn in den Umlaufstrom der WRG nun weitere Energieströme ein- oder ausgekoppelt werden wie Nacherwärmung, Nachkühlung, freie Kälte, Brauchwasservorerwärmung, Kältemaschinenabwärme etc., muss der Einfluss auf das System berücksichtigt werden. Hierbei ist zu unterscheiden, ob dies im Vorlauf (**Bild 4**) oder im Rücklauf (**Bild 5**) des Systems geschieht.

Dabei wird der Übertragungsgrad der WRG verändert. Dieser Einfluss muss bei einer seriösen Betrachtung der Gesamteffizienz der WRG berechnet werden.

Ausgehend von der zusätzlich geforderten Lufttemperaturänderung (zum Beispiel Nacherwärmung), bemisst sich

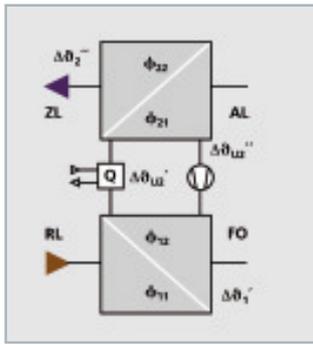


Bild 4

**Gekoppeltes WRG-System mit Ein- / Auskopplung im Vorlauf**

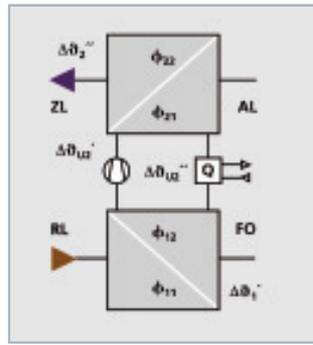


Bild 5

**Gekoppeltes WRG-System mit Ein- / Auskopplung im Rücklauf**

die Temperaturänderung im Umlaufstrom damit nach:

$$\Delta\vartheta_{U2}' = \Delta\vartheta_2'' / \Phi_{22}$$

wobei:

$\Delta\vartheta_2''$  gewünschte Lufterwärmung [K]

$\Delta\vartheta_{U2}'$  benötigte Temperaturänderung am Eintritt (Umlaufstrom) [K]

$\Phi_{22}$  luftseitiger Übertragungsgrad des Zuluftwärmeübertragers [./.]

Mit dem Übertragungsgrad des Zuluftwärmeübertragers wird diese zusätzliche Leistung an die Luft übertragen. Da der Übertragungsgrad immer kleiner als 1 ist, verbleibt auf der Austrittsseite dieses Registers die nicht übertragene Leistung in Form einer Temperaturänderung des Umlaufstroms:

$$\Delta\vartheta_{U2}'' = \Delta\vartheta_2'' \cdot (1 / \Phi_{21} - 1)$$

mit:

$\Delta\vartheta_{U2}''$  Temperaturänderung am Austritt (Umlaufstrom) [K]

$\Phi_{21}$  medienseitiger Übertragungsgrad des Zuluftwärmeübertragers [./.]

Diese Temperaturänderung im Umlaufstrom hat wiederum einen Einfluss auf die Fortlufttemperatur mit:

$$\Delta\vartheta_1' = \Delta\vartheta_{U2}'' \cdot \Phi_{11}$$

wobei:

$\Delta\vartheta_1'$  Temperaturänderung der Fortluft [K]

$\Phi_{11}$  luftseitiger Übertragungsgrad des Abluftwärmeübertragers [./.]

Zusammengesetzt ergibt sich damit die Änderungsgleichung:

$$\Delta\vartheta_1' = \Delta\vartheta_2'' \cdot (1 / \Phi_{21} - 1) \cdot \Phi_{11}$$

Diese korrigierte Fortlufttemperatur kann nun zur Berechnung des Temperaturübertragungsgrades  $\Delta\Phi_{2ges}$  mit Beeinflussung der Ein- oder Auskopplung verwendet werden

$$\Delta\Phi_{2ges} = \Delta\Phi_{2ges 0} - \Delta\Phi_{Korr}$$

also:

$$\Delta\Phi_{2ges} = \Delta\Phi_{2ges 0} - \Delta\vartheta_1' / (\vartheta_1' - \vartheta_2') / \mu_{2ges}$$

Nach Jüttemann kann dieser Einfluss auch berechnet werden nach [5]:

$$\Delta\vartheta_{U2}'' = \Delta\vartheta_2'' \cdot (1 - \Phi_{22}) / \Phi_{22} / (2 - \Phi_{22})$$

Diese Gleichung gilt jedoch nur unter der vereinfachten Voraussetzung mit  $\mu_{2ges} = \dot{W}_1 / \dot{W}_2 = 1$  und damit  $\mu_{11} = \mu_{22} = 1$  und  $\Phi_{22} = \Phi_{11} = \Phi_{21}$ .

Hieraus kann also geschlossen werden: Je höher der ursprüngliche Übertragungsgrad  $\Phi_{2ges 0}$  der WRG ist und damit die Übertragungsgrade der beiden Wärmeübertrager sind und je kleiner die Temperaturdifferenz der ein- oder auskoppelnden Energien ist, desto geringer ist der Einfluss der Ein- oder Auskopplung auf den WRG-Übertragungsgrad.

Allerdings beeinflussen sich die beiden Faktoren positiv. Denn je größer der ursprüngliche Übertragungsgrad  $\Phi_{2ges 0}$  der WRG ist, desto geringer sind meist die zusätzlichen Leistungen, die ein- oder ausgekoppelt werden müssen, und desto geringer ist auch deshalb die Beeinflussung der Ein- oder Auskopplung auf den Übertragungsgrad.

Dies ist damit die unabdingbare Voraussetzung zur mehrfachfunktionalen Nutzung der einzelnen Wärmeübertrager, die dann neben der Funktion der Wärmerückgewinnung auch zusätzlich Nachwärme oder im Sommer Nachkälte im System übertragen können, ohne den Rücklauf und damit den zweiten Wärmeübertrager auf der Abluftseite deutlich zu beeinflussen.

Analog kann diese Berechnung auch auf die Beeinflussung der Rücklaufseite (z. B. Auskopplung von freier Kälte) des Systems erfolgen (siehe Bild 5).

Diese errechnet sich aus:

$$\Delta\vartheta_{U2}' = \Delta\vartheta_1' \cdot (1 / \Phi_{12} - 1)$$

mit:

$\Delta\vartheta_{U2}'$  Temperaturänderung am Eintritt (Umlaufstrom) [K]

$\Phi_{12}$  medienseitiger Übertragungsgrad des Abluftwärmeübertragers [./.]

und dem Einfluss auf die Zulufttemperatur mit:

$$\Delta\vartheta_2'' = \Delta\vartheta_{U2}' \cdot \Phi_{22}$$

wobei:

$\Delta\vartheta_2''$  Temperaturänderung der Zuluft [K]

$\Phi_{22}$  luftseitiger Übertragungsgrad des Zuluftwärmeübertragers [./.]

Zusammengesetzt ergibt sich damit die Änderungsgleichung:

$$\Delta\vartheta_2'' = \Delta\vartheta_1' (1 / \Phi_{12} - 1) \cdot \Phi_{22}$$

Diese korrigierte Zulufttemperatur kann nun ebenfalls zur Berechnung des Temperaturübertragungsgrades  $\Delta\Phi_{2ges}$  mit Beeinflussung der Einspeisung verwendet werden.

$$\Delta\Phi_{2ges} = \Delta\Phi_{2ges 0} - \Delta\Phi_{Korr}$$

also:

$$\Delta\Phi_{2ges} = \Delta\Phi_{2ges 0} - \Delta\vartheta_2'' / (\vartheta_1' - \vartheta_2')$$

Um exakte Zustandsänderungen auf der Umlaufmedienseite sowie auf den Luftseiten zu erhalten, muss diese Berechnung iterativ und mehrfach erfolgen, da die jeweiligen Auswirkungen sich auch gegenseitig beeinflussen. Hierzu sind Berechnungsprogramme sinnvoll und notwendig.

Denn durch das Ein- und Auskoppeln von Wärme kann der Gesamtübertragungsgrad des Systems sowohl negativ als auch positiv beeinflusst werden.

## Die erweiterten Funktionen

### Indirekte Nachwärme

Über einen Plattenwärmeübertrager wird durch Warm- oder Heißwasser Wärme in das System eingespeist. Ein luftseitiger Nacherhitzer im Gerät kann wirtschaftlich sehr vorteilhaft entfallen. Durch das Einspeisen der Wärme wird der Übertragungsgrad der WRG in geringem Maß negativ beeinflusst. Diese Beeinflussung muss natürlich bei der Auslegung des Systems und bei Wirtschaft-

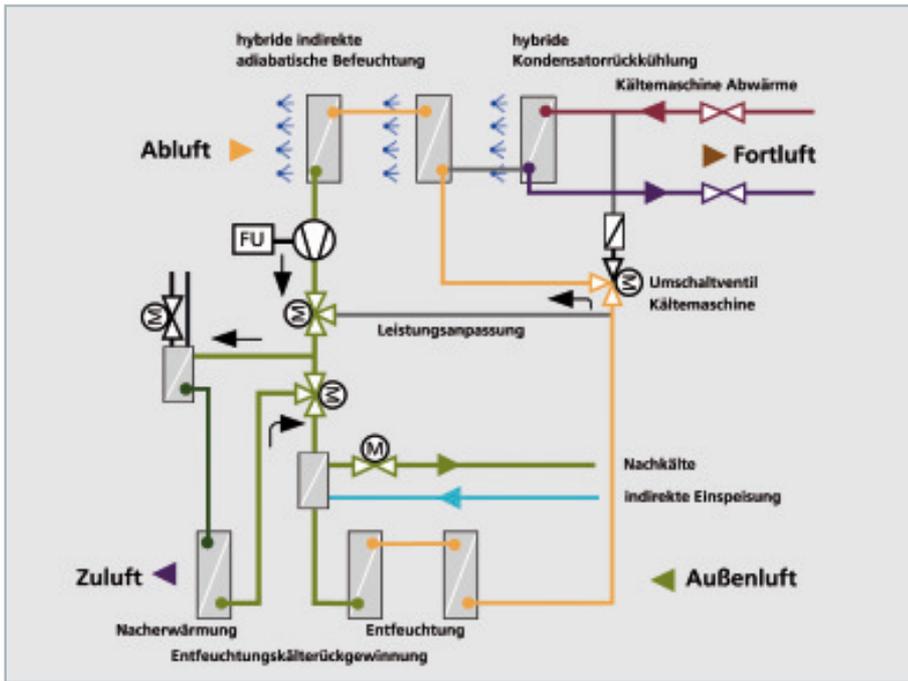


Bild 6

Mehrfachfunktionale Nutzung des KV-Systems mit Entfeuchtungsschaltung und Kältemaschinenabwärme

lichkeitsbetrachtungen wie beschrieben berücksichtigt werden [6].

#### Indirekte oder direkte Nachkühlung

Über einen Plattenwärmeübertrager wird durch Kaltwasser Kälte in das System eingespeist. Wird in der Kältemaschine nicht Kaltwasser, sondern Sole gekühlt, kann dieses Medium direkt in das System über ein Dreiwegeventil eingespeist werden. Ein Nachkühler im Gerät oder ein zusätzlicher Plattenwärmeübertrager im Solestrom kann entfallen (siehe Bild 1). Wie auch bei der Nacherwärmung wird bei der Nachkühlung der Übertragungsgrad einer hocheffizienten WRG ebenfalls in geringem Maße negativ beeinflusst.

#### Entfeuchtungsschaltung

Das WRG-KV-System kann auch zur Entfeuchtung der Luft eingesetzt werden [7]. Dazu wird zwischen dem zweiten und dritten Register (in Luftrichtung) Kälte in das System eingespeist. Dies kann direkt oder indirekt erfolgen. Dabei wird die Sole im Umluftstrom vor dem Eintritt in die zweite Stufe soweit abgekühlt, dass die Luft in den zwei folgenden Stufen entfeuchtet wird (siehe Bild 6). Diese unterkühlte Luft wird danach durch das, in Luftrichtung gesehen, dritte Register geführt. Dabei findet im dritten Register zwangsläufig ein Wärmeaustausch statt, der die Sole vor der Kälteeinspeisung vorkühlt und die Luft gleichzeitig erwärmt. Diese vorgekühlte Sole verringert damit wieder-

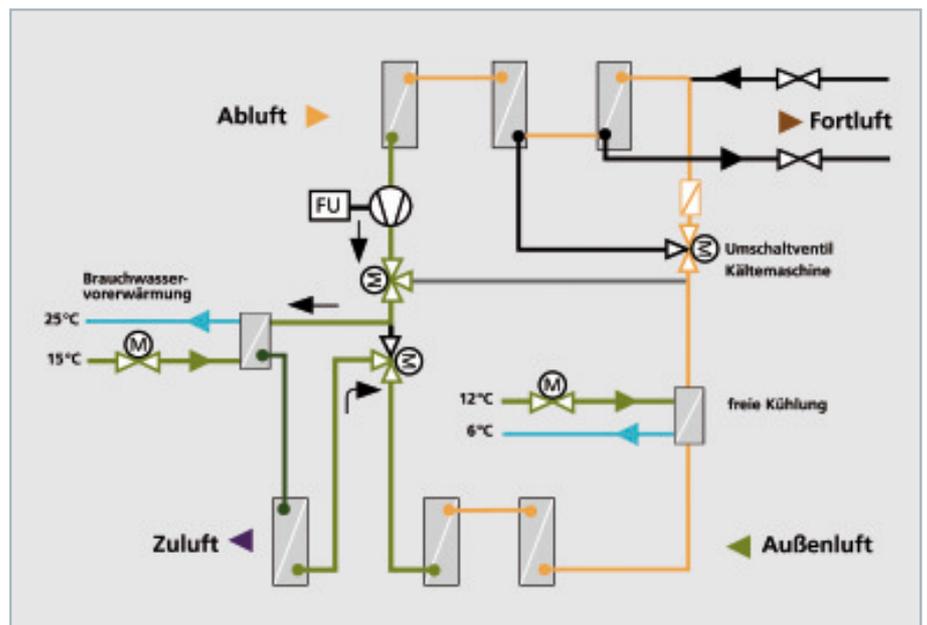


Bild 7

Mehrfachfunktionale Nutzung des KV-Systems mit freier Kälte und Brauchwasservorerwärmung

um die einzuspeisende Kälteleistung deutlich und die Nacherwärmung kann ohne zusätzliche Primärenergieaufwendungen realisiert werden (Entfeuchtungskälterückgewinnung).

#### Kältemaschinenabwärme

Die Abwärme der Kältemaschine kann energetisch vorteilhaft über das, in Luftrichtung gesehen, letzte Register des Wärmeübertragers im Fortluftstrom abgegeben werden. Hierzu wird das letzte Register aus dem Wärmerückgewinnungsprozess ausgekoppelt und der Kältemaschinenrückkühlung zur Verfügung gestellt (siehe Bild 6) oder es wird

die Kältemaschinenabwärme über einen Plattenwärmeübertrager im Rücklauf eingespeist.

Damit ist auch die Einbindung einer Wärmepumpe in ein mehrfachfunktionales WRG-System möglich, die im Sommer die „Restkühlung“ der Zuluft gewährleistet und im Winter die Nacherwärmung durch die Kältemaschinenabwärme sicherstellt.

#### Freie Kälte

Wird ganzjährig Kälteenergie benötigt, kann auch in der Winter- und Übergangszeit das Rücklaufmedium zur Auskopplung von Kälte genutzt werden.

Hier besteht die Möglichkeit, ein externes Medium energetisch sinnvoll über den WRG-Kreislauf zu kühlen. Dazu wird entweder ein zusätzlicher Plattenwärmeübertrager im Solerücklauf installiert oder über ein Umschaltventil das, in Luftrichtung gesehen, erste Register des Wärmeübertragers im Außenluftvolumenstrom vom WRG-Kreislauf abgekoppelt und mit dem externen Fluidstrom verbunden (siehe **Bild 7**).

### Brauchwasservorerwärmung

Bei hohen latenten Wärmeinhalten der Abluft (z. B. in der Schwimmbadnutzung) kann mehr Wärme dem Abluftstrom entzogen werden, als auf der Zuluftseite benötigt wird. In diesem Fall kann durch die Verwendung eines Plattenwärmeübertragers auf der Vorlaufseite Wärme dem Medienstrom zur Brauchwasservorerwärmung entzogen werden (siehe Bild 7). Sowohl die Brauchwasservorerwärmung, als auch die Auskopplung der freien Kälte verbessern den Übertragungsgrad der Wärmerückgewinnung wesentlich.

### Bewertung der Hilfsenergien

Die Druckverluste der WRG bestimmen die Hilfsenergien, die zum Betrieb einer WRG zwingend notwendig sind. Mit der mehrfachen Nutzung des Systems können gerade diese Hilfsenergien minimiert werden, da auf der Luftseite Komponenten eingespart werden können und damit deren Differenzdrücke entfallen.

Diese Hilfsenergien werden im Wesentlichen durch die elektrischen Antriebe (Ventilatoren und weitere Verbraucher, z. B. Pumpen) bestimmt. Die erforderlichen elektrischen Leistungen errechnen sich dabei aus:

$$P_{el} = \dot{V} \cdot \Delta p_{WRG} \cdot 1/\eta$$

mit:

$P_{el}$	elektrische Leistung [KW]
$\dot{V}$	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
$\Delta p_{WRG}$	Differenzdruck der WRG [Pa]
$\eta$	Gesamtwirkungsgrad des Antriebs (z. B. Ventilatoren) [./.]

Die elektrischen Leistungen, die zum Betrieb der WRG notwendig sind, können auch durch eine Leistungsziffer  $\varepsilon$  (COP = coefficient of performance), also das Verhältnis der thermischen Leistung zur elektrischen Leistung, beschrieben werden.

$$\varepsilon = \dot{Q}_{WRG} / P_{el}$$

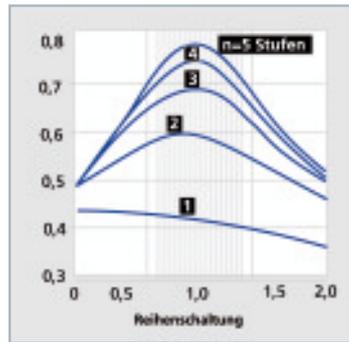


Bild 8

### Übertragungsgrad als Funktion des Wärmestromkapazitätenverhältnisses

Gute WRG-Systeme erreichen Leistungsziffern von 10 bis 20, weshalb beispielsweise das neue EEWärmeG [8] auch eine mittlere Leistungsziffer von mindestens 10 bei einem Übertragungsgrad von mindestens 70 % vorschreibt, wenn die WRG als Ersatzmaßnahme anerkannt werden soll.

Berücksichtigt man die mehrfachfunktionale Nutzung von Hochleistungs-Kreislaufverbund-Systemen, kann damit leicht eine Leistungsziffer von 15 bis 50 erreicht werden, da neben der eigentlichen Funktion der WRG Energieströme in das System ein- und ausgekoppelt werden können. Hierdurch erhöht sich die Leistungsziffer deutlich.

### Konstruktive Kriterien der Wärmeübertrager

Kreislaufverbund-Systeme können nur dann wirtschaftlich als mehrfachfunktionale WRG-Systeme mit zusätzlichen Funktionen eingesetzt werden, wenn durch die Beachtung von konstruktiven Kriterien der Temperaturübertragungsgrad auf bis zu 0,8 bei akzeptablen Druckverlusten von 200 bis ca. 300 Pa gesteigert wird.

Um diese Übertragungsgrade zu erreichen, setzt man Hochleistungswärmeübertrager ein, die einen thermodynamischen Gegenstromanteil von mehr als 99 % aufweisen, da nur bei maximalem Gegenstromanteil der einzelnen Übertragungseinheiten hohe WRG-Übertragungsgrade überhaupt erreichbar sind. Dies setzt die konsequente Einhaltung einer Gegensinnschaltung der Medien (z. B. Sole) und der Luft voraus. Gleichstromanteile sind zu vermeiden, da im Gleichstrom der Übertragungsgrad auf < 50 % begrenzt ist.

Neben der Stromführung sind zur Erreichung der Temperaturübertragungsgrade von 0,9 pro Luftseite Lamellenwärmeübertrager mit einer Bautiefe von ca. 900 bis 1200 mm notwendig [9].

Neben den konstruktiven Kriterien spielt bei der Erreichung der Übertragungsgrade die Abstimmung der beiden Medien (Luft und Sole) eine erhebliche Rolle. Nur bei optimaler Zwischenmedienmenge wird auch der projektierte Übertragungsgrad erreicht. Dieses Optimum liegt unter trockenen Bedingungen bei einem Wärmestromkapazitätenverhältnis von 1, also bei  $\dot{m}_L \cdot c_{pL} = \dot{m}_U \cdot c_{pU}$ , der Wärmekapazitätsstrom Luft muss gleich dem Wärmekapazitätsstrom des Umlaufstromes (z. B. Sole) sein (siehe **Bild 8**).

Je höher der angestrebte Übertragungsgrad ist, desto wichtiger ist die Abstimmung der Medienmassenströme aufeinander. Bei Anlagen mit variabler Luftmenge muss der Umlaufmassenstrom stetig geregelt und den variablen Luftmengen angepasst werden. Dies geschieht vorteilhaft z. B. über eine drehzahlgeregelte Pumpe in Abhängigkeit der gemessenen Luft- und Umlaufmenge.

Da sich die beiden Wärmekapazitäten von Luft und z. B. Sole etwa um den Faktor 4 und die beiden Dichten rund um den Faktor 1000 unterscheiden, muss der Umlaufstrom mit einem Viertel des Luftmassenstromes bzw. 1/4000 des Volumenstromes betrieben werden. Aufgrund dessen ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen der Medienmenge, die gering sein muss (Optimum), und der Medien-geschwindigkeit im Wärmeübertrager, die relativ hoch liegen muss, um hohe Übertragungskoeffizienten bei turbulenter Strömung zu erreichen. Dieser Zielkonflikt kann nur durch spezielle Gegensinn-Rohrschaltungen gelöst werden, bei denen die Umlaufmedien-geschwindigkeit im Wärmeübertrager bei möglichst großem Gegenstromanteil hoch liegen muss und die benötigte Medienmenge optimiert gefahren werden kann [10].

Hierbei ist vor allem darauf zu achten, dass die Entlüftung der Schaltung automatisch erfolgt, um Ansammlungen von Ausgasungen im System zu vermeiden. Des Weiteren sollten die Schaltungsvarianten selbstständig entleerbar sein, um einen zu hohen Entleerungsaufwand im Reparatur- oder Wartungsfall zu vermeiden.

Unter Beachtung der beschriebenen Voraussetzungen können dann auch tatsächlich Systemübertragungsgrade

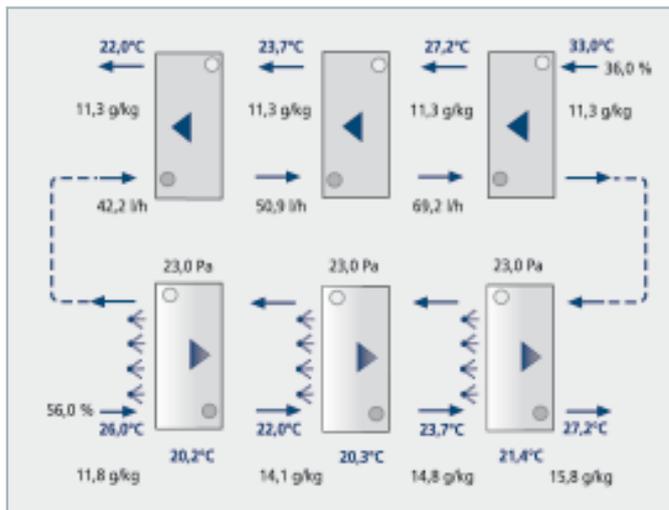


Bild 9

### Mehrstufige indirekte Verdunstungskühlung

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) sowie eine Vielzahl von ausgeführten Anlagen ergeben.

### Mehrstufige adiabatische Verdunstungssysteme

Die adiabatische indirekte Verdunstungskühlung hat sich in den letzten Jahren im Sommerbetrieb 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 komplexes Hybridsystem.

Der Vorteil der Mehrstufigkeit liegt in der höheren Kälteleistung gegenüber einem einstufigen System, die daraus resultiert, dass die Lufttemperatur in den folgenden Stufen nochmals abgesenkt wird und somit die mittlere Temperatur tiefer liegt als bei einem einstufigen System. Die Kälteleistung kann mit diesem Verfahren um etwa 25 % gesteigert werden, ohne dass sich dabei die Druckverluste des Systems erhöhen, da die ohne-

hin benötigten Lamellen nicht nur der Wärmeübertragung dienen, sondern auch als Verdunstungsfläche herangezogen werden (Hybridsystem) (siehe Bild 9).

Durch Hybridsysteme werden die Elektroenergiekosten reduziert, da die Druckverluste der Befeuchter (mehrstufig) entfallen und die mechanische Kälteerzeugung erheblich später zum Einsatz kommen kann.

Im Sommerbetrieb wird bei 32 °C Außenlufttemperatur eine Zulufttemperatur von ca. 22 °C erreicht. Dies haben umfangreiche Messungen auf dem Prüfstand des RWTÜV ergeben. Erst bei einer weiteren Zulufttemperaturabsenkung wird dann die mechanische Kälteerzeugung notwendig [11].

### Zusammenfassung

Aus diesen Ausführungen wird deutlich, dass auch mit speziellen KV-Systemen hohe Austauschgrade von bis zu 80 % realisierbar sind, wenn die konstruktiven Kriterien beachtet und die Medienströme exakt aufeinander eingestellt werden.

Mit hohen Übertragungsgraden kann ein KV-System durch die einfache Einflussnahme auf den Umlaufmedien-

strom auch zur Übertragung von Zusatzenergien (mehrfachfunktionale Nutzung) verwendet werden, was die Wirtschaftlichkeit des Systems deutlich erhöht. Je größer der Übertragungsgrad der WRG ist, desto geringer sind die zusätzlichen Leistungen, die ein- oder ausgekoppelt werden müssen (z. B. Nachwärme), und desto geringer ist die Beeinflussung auf den Übertragungsgrad. Hierzu sind aufwändige Berechnungen erforderlich, um die Beeinflussung der Ein- und Auskopplung der Energieströme berücksichtigen zu können.

Durch die Nutzung der Wärmeübertrager als Befeuchterkörper (Hybridsystem) können die Kälteleistungen erhöht und gleichzeitig die Druckverluste verringert werden.

Durch die mehrfachfunktionale Nutzung der WRG und die hybride, mehrstufige Nutzung der indirekten Verdunstungskühlung können sehr hohe COP-Werte von 50 und mehr erreicht werden.

### Literatur

- [1] Kaup, Ch.: Die Physik der Kreislaufverbundsysteme. VDI-Jahrbuch 1999, S. 216 ff.
- [2] DIN EN308, Juni 1997. Wärmeaustauscher - Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft/Luft- und Luft/Abgas-Wärmerückgewinnungsanlagen; Deutsche Fassung EN 308: 1997.
- [3] VDI-Wärmeatlas, 7. Auflage 1994: CA 13.
- [4] VDI-Wärmeatlas, 7. Auflage 1994: CA 14.
- [5] Jüttemann: Wärme- und Kälterückgewinnung in raumlufttechnischen Anlagen. Werner Verlag: 2001.
- [6] Kaup, Ch.: Praxishandbuch Thermodynamik, S. 474 ff, PP Publico Publications, 2008.
- [7] Kaup, Ch.: Minimierung der latenten Kühlleistung durch integrierte Rückgewinnung, KI 12/2003.
- [8] EEWärmeG: Das Erneuerbare-Energien-Wärmege-setz: 2008-6.
- [9] Kaup, Ch.: Hochleistungs-Wärmerückgewinnung auf Basis des KV-Systems, ISH Jahrbuch, 1997.
- [10] Kaup, Ch.: Vergleich von Hochleistungswärmerückgewinnungssystemen auf Basis des KV-Systems. HLH Bd. 55 (2004) Nr. 2, S. 40-46.
- [11] Kaup, Ch.: Integrierter Kontaktbefeuchter im Wärmeübertrager. TAB, 02/1997.