

Autor

Dipl.-Ing. Bernd Schulz,
Dipl.-Ing. (FH) Christian Bremer
Walter Meier (Klima Deutschland GmbH),
85748 Garching

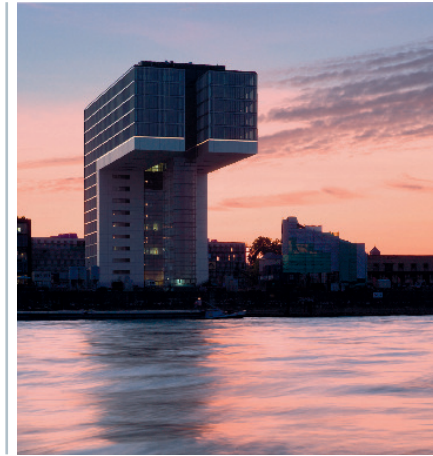


Bild 1: Das Kranhaus 1 in Köln

Öko-Klima für ein spektakuläres Bürogebäude

Effiziente indirekte Verdunstungskühlung im Kranhaus 1

Mit dem Kranhaus 1, direkt am Rhein gelegen mit Blick auf den Kölner Dom, entstand Anfang 2009 ein spektakuläres und innovatives Bürogebäude, das auf der internationalen Immobilienmesse MIPIM 2009 in Cannes als weltbestes „Office Building“ ausgezeichnet wurde. Für eine hohe Energieeffizienz bei der Klimatisierung des Kranhauses sorgt eine indirekte (adiabate) Verdunstungskühlung der Abluft zur Kühlung der Zuluft.

Die drei Kranhäuser in Köln wurden von den Stararchitekten Bothe Richter Teherani (BRT) aus Hamburg entworfen und sollen als Winkelgebäude mit ihren weit über die Sockelgeschosse hinausragenden Obergeschosse an Kräne erinnern, mit denen im früheren Kölner Innenstadthafen die Flussschiffe beladen wurden.

Jährliche Betriebszeiten der Verdunstungskühlung

Für eine plausible Wirtschaftlichkeitsbeurteilung ist die Kenntnis der Betriebszeiten, bei welchen die adiabate Kühlung tatsächlich energetisch nutzbar ist, vonnöten. Deren Abschätzung bereitet in der Regel keine Probleme, wenn man sich einmal folgende Zusammenhänge vor Augen führt: Adiabate Kühlung kommt in Betriebszeiten zum Einsatz, wenn freie Kühlung und Wärmerückgewinnung durch die zunächst ungekühlte Abluft den vorhandenen Kühlbedarf nicht mehr decken – ohne aber bereits auf den Kaltwassererzeuger zurückzugreifen. Die Kältemaschine schaltet erst dann zu, wenn auch die zusätzliche Verdunstungskühlung alleine nicht mehr ausreicht. Die Außenlufttemperaturen, ab wann somit die Verdunstungskühlung erforderlich ist, werden also anhand der Anlagenplanung vorbestimmt und mit den Temperatur-Referenzwerten aus DIN 4710 abgeglichen.

Somit lässt sich die jährliche Betriebszeit ohne weiteres mit guter Genauigkeit abschätzen. Zudem ist die detailliertere Berechnung anhand von stündlichen Wetterdaten möglich und kann insbesondere bei über den Jahresverlauf gleitendem Kühlbetrieb die Bewertung verbessern. Die so ermittelten Jahres-Betriebsstunden dienen dann als Basis für eine detaillierte Bestimmung der Betriebsdaten anhand der Kennwerte des jeweiligen Verdunstungskühlers. Eine genaue Berechnung, in welche zudem die spezifischen Gerätekenneiwerte einfließen, ermöglicht das Berechnungstool „Condair Coolblue“ von Walter Meier (Klima Deutschland) GmbH.

Das Kranhaus-Ensemble besteht aus drei Gebäuden mit je 15 Stockwerken und den Abmessungen Höhe 60 m, Länge 70 m und Breite 34 m. Das in der Mitte des Ensemble gelegene Kranhaus 1 wurde als Bürogebäude mit einer Gesamtfläche von 16 000 m² als erstes fertiggestellt. Links davon befindet sich das ebenfalls als Bürogebäude genutzte „Kranhaus Plus“, rechts das „Vadion Vista“. Dieses wird nach seiner Fertigstellung mehr als 130 luxuriöse Eigentumswohnungen mit Preisen von 3500 €/m² in den unteren bis 8000 €/m² in den oberen Etagen beinhalten. Verantwortlich für das Kranhaus 1 war als Entwickler die Development Partner AG (Düsseldorf), als Generalunternehmer die Hochtief Construction AG (Essen), als Projektmanager die Schürmann Spannel AG (Bochum) und als Fachplaner TGA die Bähr Ingenieure GmbH aus Köln. Aufgrund der außergewöhnlichen Architektur umfasst das Kranhaus 1 in den ersten neun Etagen eine Fläche von je 630 m² und in den oberen, herausragenden Geschossen eine Fläche von je 1900 m². Die gesamten Baukosten für das Kranhaus 1 lagen bei etwa 50 bis 60 Mio. €.

Fassade mit offenbaren Fenstern

Bei der Gebäudehülle entschied sich der Bauherr für eine vorgefertigte einschalige Fassade (Fabrikat: Schüco), bei der die Fensterflügel in den Glas-Aluminium-Elementen den Personen eine individuelle Öffnung und damit eine natürliche Lüftung ermöglichen (und den „direkten Kontakt zum Rhein“). Zur Minimierung der äußeren solaren Wärmelasten kommt ein für das Gebäude entwickelter äußerer Sonnenschutz mit strömungstechnisch optimierten Lamellen zum Einsatz, die auch bei größeren Windgeschwindigkeiten in einer Höhe von 50 bis 60 m stabil bleiben.

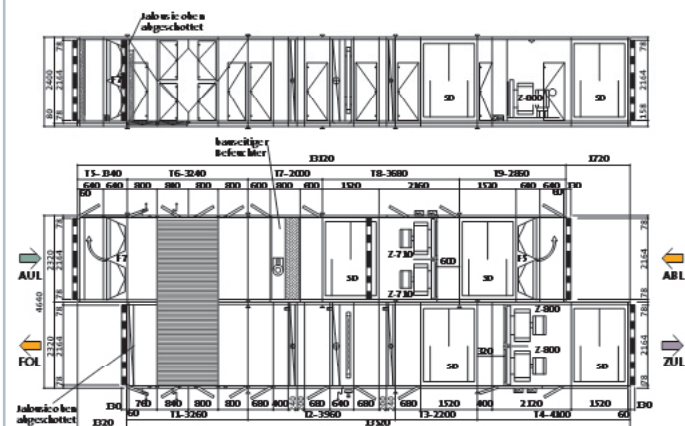


Bild 2: Prinzipskizze der RLT-Anlage

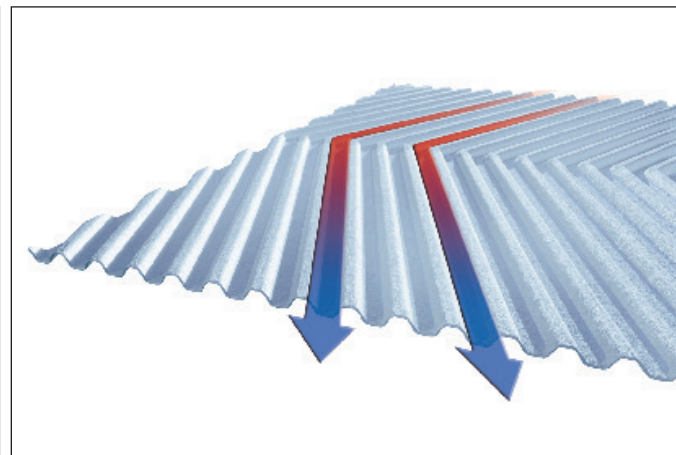


Bild 3: Verdunstungsvlies des „Condair SH2“ mit V-Profilstruktur, zellstoff- und glasfaserfrei

Klima individuell einstellbar

Wer als Käufer oder Mieter in ein so attraktives Gebäude wie das Krankenhaus 1 einzieht, der hat auch höchste Ansprüche an die thermischen Bedingungen und an eine optimale Luftqualität in den Büros. Diese sollten den Raumnutzern das ganze Jahr über effizientes Arbeiten in bestmöglichem Wohlfühlklima ermöglichen. Hierzu kommen unter anderem folgende Lüftungs- und Klimasysteme zum Einsatz:

- Für eine gute Raumluftqualität sorgt eine mechanische Be- und Entlüftung über eine zentrale raumlufttechnische Anlage. Zwei nebeneinander angeordnete RLT-Geräte (Fabrikat: GEA Happel) fördern einen Zuluft- und Abluftvolumenstrom von insgesamt je 80 000 m³/h und sind mit Aluminium-Kreuzstrom-Plattenwärmeübertragern zur Wärmerückgewinnung ausgestattet (System Ecoplat).

Rechnet man den Zuluftvolumenstrom auf die netto für Büros nutzbare Gebäudelfläche um, ergibt sich ein etwa 2- bis 2,5facher Luftwechsel, der die Anforderungen an die beste Raumluftqualitätskategorie 1 nach VDI 3804 und DIN EN 13 779 erfüllt (Kategorie 1 bei mehr als 54 m³/h Außenluft pro Person).

Den wesentlichen Anteil zur Abführung der in den Büros freigesetzten Wärme übernehmen Kühlsegel, deren Leistung die Raumnutzer in vorgegebenen Grenzen individuell nach ihrem Wärme- oder Kälteempfinden regeln können. Die Kälteleistung beziehen die Kühldecken aus einem etwa 30 m tiefen Rheingrundwasserbrunnen, wobei das erwärmte Rücklaufwasser aus den Kühldecken mit dem Brunnenwasser auf die gewünschte Vorlauftemperatur abgekühlt wird.

RLT-Anlage mit adiabatischer Kühlung

Eine Besonderheit bei der Erzeugung von Kälteleistung zur Kühlung der im Sommer warmen Außenluft besteht bei der RLT-Anlage im Krankenhaus 1 im Einsatz eines adiabaten Kühlsystems.

So funktioniert die adiabate Verdunstungskühlung

Bei Klimaanlage sind der Strombedarf für die Ventilatoren und die Erzeugung von Kälteleistung zur Kühlung und Entfeuchtung der Zuluft die größten Positionen bei den Betriebskosten. Um den Aufwand

einer mechanischen Kälteerzeugung per Kältemaschine zu verringern und deren Stromverbrauch zu minimieren, wird immer mehr das Prinzip der adiabaten Verdunstungskühlung genutzt.

Dieses beruht auf dem Effekt, dass warme, trockene Luft abkühlt, wenn sie durch Wasserverdunstung befeuchtet wird. Das heißt: Die warme Luft nimmt Wasser auf, das dabei vom zuvor flüssigen in den dampfförmigen Zustand übergeht. Dadurch steigt der Wassergehalt der Luft um einige Gramm Wasser pro kg Luft an. Die Verdunstungswärme (latente Wärme) des Wassers von ca. 2500 kJ, die pro kg Wasser für den Phasenübergang von flüssig zu dampfförmig benötigt wird, wird dabei der Luft entzogen (sensible Wärme) – wodurch sie um einige Kelvin abkühlt.

Je mehr Wasser bei diesem Prozess verdunstet und von der Luft aufgenommen wird, umso mehr Wärme wird dafür benötigt und umso stärker wird die Abkühlung der Luft. Ein Anhaltswert für die Abkühlung der Luft ist 2,5 K pro Gramm Wasser, das pro kg Luft aufgenommen wird. Wesentliche Einflussfaktoren bei diesem Prozess der Verdunstungskühlung sind:

- die Temperatur der Luft vor der Befeuchtung: Je kühler diese ist, umso weniger Feuchte kann sie aufnehmen und umso geringer wird der Abkühlereffekt.
- die Feuchte der Luft vor der Befeuchtung: Je mehr die Luft bereits mit Wasser gesättigt ist, umso weniger Wasser kann diese aufnehmen und umso geringer wird die Abkühlung.
- Die Grenze der Verdunstungskühlung ist erreicht, wenn die Luft komplett gesättigt ist und kein weiteres Wasser mehr aufnehmen kann. Je nach eingesetztem Befeuchtertyp sind durch die Verdunstungsbefeuchtung relative Feuchten bis über 90 % erreichbar.

Indirekte Verdunstungskühlung beim Krankenhaus 1

Beim Krankenhaus 1 wird die so genannte indirekte Verdunstungskühlung eingesetzt. Dabei wird auf der Abluftseite des Klimazentralgeräts die Luft in einem von der Walter Meier (Klima Deutschland) GmbH gelieferten, patentierten Oberflächenbefeuchter „Condair SH2 Reflow“ befeuchtet. Dieser besteht aus einem Vliesverbund mit par-

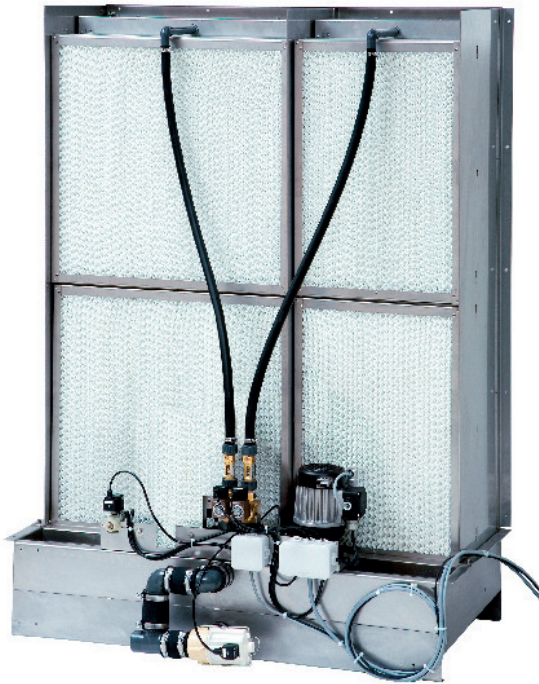


Bild 4: „SH2“-Oberflächenverdunster

allel verlaufenden V-Profilen, die ständig mit mineralfreiem bzw. voll entsalztem (VE) Wasser berieselt werden.

Bei ihrer Strömung durch den Befeuchter wird die Abluft bis auf etwa 90% relative Feuchte befeuchtet, wodurch sie von zuvor 26 °C auf nun rund 19 °C abkühlt. Dem Befeuchtungssystem ist im RLT-Zentralgerät ein Plattenwärmeübertrager nachgeschaltet, in dem die nun kühle Abluft Wärme aus der Außenluft aufnimmt und diese dadurch vor-kühlt. Nun muss in dem nachgeschalteten Zuluftkühler, der mit kaltem Wasser aus einer mechanischen Kälteanlage versorgt wird, nur noch der restliche Kältebedarf aufgewendet werden, was die Betriebskosten erheblich verringert. Für den Betrieb der RLT-Anlagen im Krankenhaus 1 im Sommer bei einer Außentemperatur von 32 °C und einer relativen Feuchte von 40% muss die Zuluft, um eine Raumtemperatur von maximal 26 °C sicherzustellen, mit einer Temperatur von 17 °C in die Räume eingebracht werden. Um die Zuluft auf diesen Zustand zu konditionieren, befinden sich in den RLT-Zentralgeräten Kühler mit einer Leistung von je 312 kW, die mit Kaltwasser (Vorlauf 7 °C, Rücklauf 13 °C) aus einem Wasserkühlsatz betrieben werden. Die Zuluft wird über Dralldurchlässe in die Räume eingebracht (Mischlüftung).

Welchen Beitrag erbringt die indirekte Verdunstungskühlung?

Für Investoren, Bauherren, Betreiber und Fachplaner ist die Frage interessant, welchen Beitrag denn die Verdunstungskühlung auf der Abluftseite zur Verringerung der Kälteleistung der Kältemaschine und der Betriebskosten tatsächlich leistet.

Dies soll durch nachfolgende beispielhafte Berechnungen für den Auslegungszustand des Klimasystems im Sommer verdeutlicht werden. Dazu sind zwei wichtige Luftzustände vorgegeben (die entsprechenden x- und h-Werte für die absolute Feuchte und die Enthalpie wurden berechnet bzw. im h,x-Diagramm abgelesen):

Zustand der Außenluft: Temperatur $t_{\text{au1}} = 32$ °C, 40% relative Feuchte ($x_{\text{au1}} = 12$ g/kg, $h_{\text{au1}} = 63,5$ kJ/kg)
 Zustand der Abluft: Temperatur $t_{\text{abl}} = 26$ °C, 45% relative Feuchte ($x_{\text{abl}} = 9,4$ g/kg, $h_{\text{abl}} = 50,0$ kJ/kg)

Berechnungsbeispiel

Berechnung 1: Welchen Beitrag leistet die Wärmerückgewinnung zur Kühlung der Abluft?

Das Wärmerückgewinnungssystem besteht aus Plattenwärmeüber-trägern mit einer trockenen Rückwärmezahl $RWZ = 0,44$. Aus der Gleichung für die Rückwärmezahl mit $RWZ = (t_{\text{zul1}} - t_{\text{au1}})/(t_{\text{abl}} - t_{\text{au1}})$ ergibt sich beim Einsetzen der obigen Werte eine Zulufttemperatur $t_{\text{zul1}} = 29,4$ °C und eine Enthalpie der Zuluft von $h_{\text{zul1}} = 60,5$ kJ/kg.

Berechnet man nun die Wärmeleistung, die im Wärmerückgewin-nungssystem von der Zuluft an die Abluft abgegeben wurde nach der Gleichung, dann ergibt sich:

$$Q_1 = m_L \times (h_{\text{au1}} - h_{\text{zul1}}) = 26,7 \times (63,5 - 60,5) = 80 \text{ kW.}$$

Dabei ist der Luftmassenstrom:

$$m_L = 80\,000 \text{ m}^3/\text{h} / 3600 \text{ s/h} \times 1,2 \text{ kg/m}^3 = 26,7 \text{ kg/s.}$$

Das heißt: Allein durch die Wärmerückgewinnung wird die Kältema-schine um einen Leistungsanteil von 80 kW entlastet.

Berechnung 2: Welchen Beitrag leistet die indirekte Verdunstungs-kühlung?

Im zweiten Fall wird nun dem Wärmerückgewinnungssystem auf der Abluftseite ein „Condair SH2“ Verdunstungskühler vorgeschaltet (siehe Infokasten rechte Seite unten). Dieser erreicht bei den vorge-gbenen Betriebsbedingungen (Befeuchtung mit 140 l Wasser pro Stunde, Luftströmungsgeschwindigkeit durch die Lamellen 3,75 m/s) einen Befeuchtungswirkungsgrad von 86%. Die Wassermenge setzt sich zusammen aus 135 l Verdunstungsleistung und nur 5 l Spülwas-ser. Daraus ergibt sich für die Abluft nach dem Austritt aus dem Ver-dunstungskühler eine Temperatur $t_{\text{abl2}} = 18,9$ °C, eine relative Feuchte von 90%, eine absolute Feuchte von $x_{\text{abl2}} = 12,3$ g/kg und eine unver-änderte Enthalpie von $h_{\text{abl2}} = 50$ kJ/kg. Setzt man nun die „neuen“ Ab-luftwerte in die Gleichung für die Rückwärmezahl (unverändert $RWZ = 0,44$) ein und errechnet daraus die „neue“ Zulufttemperatur, ergibt sich dafür ein Wert von $t_{\text{zul2}} = 26,2$ °C, eine relative Feuchte von 56% und eine Enthalpie von $h_{\text{zul2}} = 57$ kJ/kg. Berechnet man nun mit den neuen Werten die durch „Verdunstungskühlung inklusive Wärmerück-gewinnung“ erzielte Kälteleistung, ergibt sich ein Wert von $Q_2 = m_L \times (h_{\text{au1}} - h_{\text{zul2}}) = 26,7 \times (63,5 - 57) = 174$ kW. Subtrahiert man schließlich von der im Berechnungsgang 2 ermittelten Kälteleistung $Q_2 = 174$ kW den im Berechnungsgang 1 ermittelten Anteil der Wärmerückgewin-nung $Q_1 = 80$ kW, ergibt sich eine von der Verdunstungskühlung zur Kühlung der Zuluft geleistete thermische Leistung von $Q_v = 94$ kW.

Berechnung 3: Die Wirtschaftlichkeit der Verdunstungskühlung

Nehmen wir an, die RLT-Anlage wird unter den in der Berechnung 2 beschriebenen Rahmenbedingungen jährlich 1000 Stunden betrie-ben. Welcher wirtschaftliche Nutzen durch den Einsatz der Verdun-stungskühlung ergibt sich dann für den Betreiber? Durch den Betrieb der adiabaten Verdunstungskühlung entstehen folgende Kosten pro Jahr:

a) Wasseraufbereitung:

Aufbereitung von 140 kg Wasser pro Stunde x 1000 h x 5 €/1000 l x 2 Anlagen = 1400 €.

b) Pumpenstrom:

Die Leistung der im Verdunstungskühler integrierten Wasserpumpe beträgt 353 W. Daraus ergibt sich: 353 W x 1000 h = 353 kWh x 0,15 €/kWh x 2 Anlagen = 106 €.

c) Ventilatorenstrom:

Durch den Einbau des Verdunstungskühlers im Abluftstrang entsteht ein zusätzlicher Druckverlust von 134 Pa, der durch eine Mehrleistung des Ventilators kompensiert werden muss. Diese Zusatzleistung P „kostet“ bei einem Ventilator-Wirkungsgrad von 85 % $P = (22,2 \text{ kg/s} \times 134 \text{ Pa}) / (2000 \text{ h} \times 0,85) = 7000 \text{ kWh} \times 0,15 \text{ €/kWh} = 1051 \text{ €}$. Damit beträgt die Summe der Aufwendungen $1400 \text{ €} + 106 \text{ €} + 1051 \text{ €} = 2557 \text{ €}$.

Dabei wurde angenommen, dass der Ventilator an 2000 h pro Jahr den zusätzlichen Druckverlust überwinden muss, nachdem die Verdunstungskühlung tagsüber, aber nicht nachts genutzt wird. In der Jahreszeit, in welcher die Verdunstungskühlung witterungsbedingt nicht in Betrieb ist, können die Verdunstungskörper mit wenigen Handgriffen einfach entfernt werden. Ein zusätzlicher Druckverlust ist dann nicht mehr vorhanden.

Im Gegenzug wird durch die Verdunstungskühlung, wie zuvor berechnet, eine Kälteleistung von 94 kW eingespart. Würde man diese Kälteleistung mit einem elektrisch betriebenen luftgekühlten Wasserkühlsatz mit einer gängigen Leistungszahl von $EER = 2,4$ erzeugen (inkl. Berücksichtigung des Pumpenstroms), würde dessen Betrieb $P = 94 \text{ kW} : 2,4 \times 1000 \text{ h} \times 0,15 \text{ €/kWh} = 5875 \text{ €}$ kosten.

Vergleicht man nun die Aufwendungen für die Verdunstungskühlung von 2557 € mit denen eines Wasserkühlsatzes von 5875 €, ergibt sich ein Betriebskostenvorteil für die Verdunstungskühlung von 3318 € pro Jahr.

Last but not least sind die Investitionskosten zu berücksichtigen. Die Verdunstungskühlsysteme kosten inkl. Wasseraufbereitung rund 27000 €. Die Kälte-Mehrleistung des Wasserkühlsatzes von knapp 100 kW, welche ohne Verdunstungskühlung erforderlich wäre, würde mit rund 12000 € zu Buche schlagen. Somit liegen die effektiven Mehrkosten der adiabaten Kühlung bei $27000 \text{ €} - 12000 \text{ €} = 15000 \text{ €}$. Daraus ergibt sich eine Amortisationszeit von $15000 \text{ €} (\text{Mehrkosten}) : 3318 \text{ €} (\text{jährliche Einsparungen}) = 4,52$, also von nur viereinhalb Jahren.

Unterhalt und Wartung der Verdunstungskühlung

In eine vollständige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung müssen natürlich die Betriebsaufwendungen für Verschleißteile und Wartung einfließen. Bei der Verdunstungskühlung durch Oberflächenbefeuchter wird der Materialverschleiß im Wesentlichen durch das verwendete Befeuchtungswasser beeinflusst. Wird dabei, wie beim Krankenhaus 1 der Fall, vollentsalztes und mineralfreies Wasser verwendet, ist Materialverschleiß durch Kalkinkrustationen ausgeschlossen. Voraussetzung dafür ist aber, dass das verwendete Material des Verdunstungskörpers vollkommen beständig ist und durch vollentsalztes Wasser nicht angegriffen wird. Ein turnusmäßiger Ersatz der Verdunstungskörper innerhalb der berechneten Amortisationszeit ist daher beim System „Condair SH2“ nicht erforderlich. Durch den Einsatz der Oberflächen-

Indirekter Verdunstungskühler

Der „Condair SH2“-Verdunstungskühler der Walter Meier (Klima Deutschland) GmbH besteht aus einem patentierten Verdunstungskörper mit parallel verlaufenden V-Profilen in einem Vliesverbund. Ein synthetisches, glasfaser- und zellstofffreies Basismaterial ermöglicht die uneingeschränkte Nutzung von mineralfreiem bzw. vollentsalztem Wasser. Dies verhindert Inkrustationen im Befeuchter und es wird eine lange Lebensdauer des Vliesmaterials erreicht. Weil keine Mineralien im laufenden Betrieb ausgespült werden müssen, wird zudem eine hohe Wassereinsparung erzielt. Den Oberflächenverdunster „SH2“ gibt es in den Ausführungen „SH2 Reflow“ für den Betrieb mit Umlaufwasser und als „SH2 flow“ für den Betrieb mit Frischwasser. Die erreichbaren Befeuchtungswirkungsgrade und damit die Abkühlung hängen jeweils von den vorhandenen Luftzuständen und der Luftgeschwindigkeit ab. Je nach Anlagen- und Auslegungssituation können dabei Werte bis über 90 % erreicht werden.

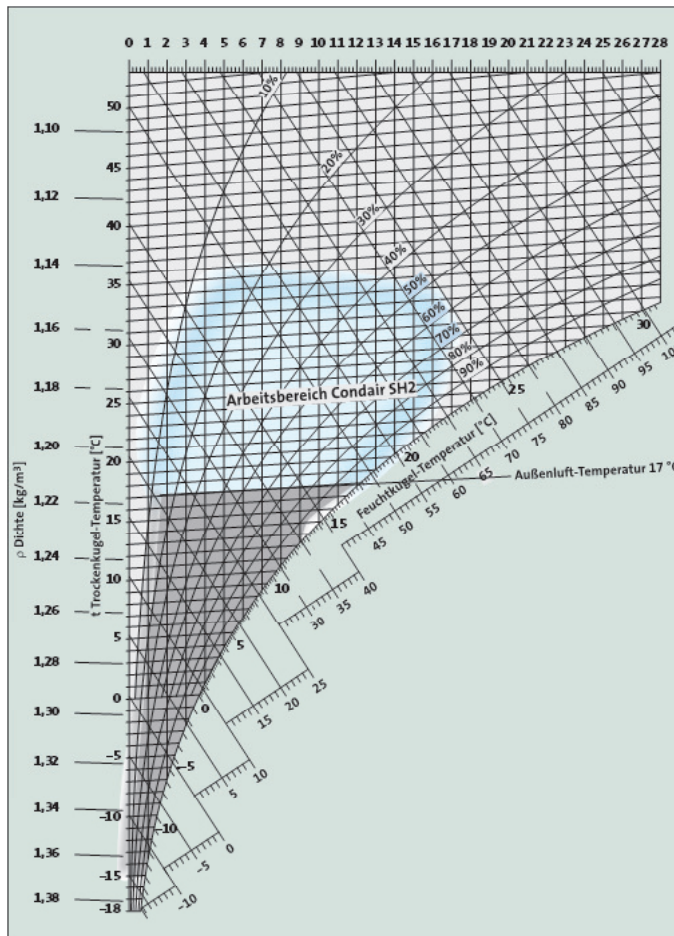


Bild 5: h,x-Diagramm mit meteorologischen Summenwerten nach DIN 4710: Für einen konkreten Fall bedeutet das, dass beispielsweise ab 18 °C Außenluft-Temperatur die Verdunstungskühlung zuschaltet und diese bei Absinken auf 16 °C erst wieder ausschaltet, die gemittelte Temperatur für den Abgleich mit den Temperatur-Referenzwerten wäre also 17 °C; somit würde die Summe aller Temperaturhäufigkeiten oberhalb dieser 17 °C die jährliche Betriebszeit ergeben

befeuchter auf der Abluftseite kann auch Staubeintrag durch die Anlagenluft eine Rolle spielen.

Hier wird die Filterung der Abluft mit F7 empfohlen. Ansonsten beschränken sich die Wartungsmaßnahmen für die Verdunstungskühlung auf Anlagenkontrollen zwei Mal jährlich.

Zusätzliche Unterhaltsaufwendungen für die Wasseraufbereitung wurden mit denen für eine größere Kältemaschine aufgerechnet. Häufig sind geeignete Wasseraufbereitungsanlagen für andere Zwecke (beispielsweise zur Luftbefeuchtung im Winter) ohnehin vorhanden, welche im Sommer die Wasserversorgung der Verdunstungskühlung übernehmen können.

Fazit

Die Reduzierung des elektrischen Kälteenergieverbrauches von Gebäuden durch die indirekte Verdunstungskühlung liegt auf der Hand. Gerade im Hinblick auf die heutigen Effizienzanforderungen (EnEV, EEWärmeG) leistet sie einen wertvollen Beitrag und ist integraler Bestandteil zeitgemäßer Raumlufttechnik. Hohe Rückwärmzahlen effizienter Wärmerückgewinnungssysteme und Betrieb des Verdunstungskühlers mit vollentsalztem mineralfreiem Wasser bringen zusätzlich zum energetischen Nutzen dieser Maßnahme auch noch attraktive Amortisationszeiten mit sich.