

HLH

Lüftung/Klima
Heizung/Sanitär
Gebäudetechnik

Organ des VDI für Technische Gebäudeausrüstung



Technik, Leistung und Wirtschaftlichkeit der indirekten Verdunstungskühlung

das die Abluft so nahe wie möglich an den Sättigungszustand von 100 % relative Feuchte adiabatisch befeuchtet (Bild 1). Der Verdunster in Bild 1 rechts (System Condair ME), besteht aus parallel nebeneinander angeordneten, wellenförmigen Polyesterlamellen, die von oben gleichmäßig mit aufbereitetem Wasser berieselt werden, das dann langsam nach unten fließt. Bei der Durchströmung des Verdunsters wird die Abluft bis auf 96 % r.F. befeuchtet. Durch diese adiabate Befeuchtung sinkt die Temperatur der Abluft um 2,5 K pro Gramm Wasser, das in der Luft verdunstet. Je nachdem, welche Temperatur und Feuchte die Abluft hat (im Sommer bei Büronutzung meist etwa 25 bis 27 °C und 55 bis 65 % r.F.), sinkt die Temperatur der Abluft um rund sechs bis 10 K. Dadurch hat die Abluft in der nachgeschalteten Wärmerückgewinnung nun eine deutlich höhere Kapazität, um der warmen Außenluft Wärme zu entziehen. Ein Beispiel dazu zeigt Bild 3. In dem gezeigten Beispiel wird durch die indirekte Verdunstungskühlung die Abluft (25 °C) auf 96 % befeuchtet. Dadurch sinkt ihre Temperatur auf rund 20 °C. Im nachgeschalteten Kreuzstromwärmeübertrager (Rückwärmezahl 75 %) kann die Abluft nun die Außenluft (32 °C) um 9 K auf etwa 23 °C kühlen. Ohne die Verdunstungskühlung hätte es eine Temperaturverringerung der Außenluft um nur 5,2 K auf 26,8 °C gegeben. Durch diese zusätzliche Leistung der Verdunstungskühlung werden elektrische Energie des Wasserkühlsatzes (und damit einhergehende CO₂-Emissionen) eingespart. Die so vorgekühlte Außenluft muss im nachgeschalteten Kühler (Bild 1) noch auf den gewünschten Zuluftzustand von zum Beispiel 20 °C nachgekühlt werden. Dabei entspricht bei einem Luftvolumenstrom von zum Beispiel 3 m³/s die durch die Verdunstungskühlung zusätzlich erzielte Temperaturverringerung um 3,8 K (9 K – 5,2 K) einer Leistung von knapp 14 kW, die der Wasserkühlsatz zur Luftkühlung nun nicht erbringen muss.

In Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen (Temperaturen, Feuchten, Effizienz der Wärmerückgewinnung) kann es durchaus sein, dass die Abkühlung in der Verdunstungskühlung bereits ausreicht, um die Außenluft auf die gewünschte Zulufttemperatur von

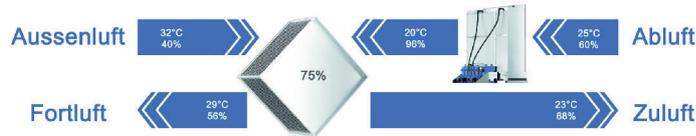


Bild 2

Beispiel für die Leistungsfähigkeit einer indirekten Verdunstungskühlung



Bild 3

Screenshot des Programms „myCoolblue“ mit integriertem Förderrechner

Alle Bilder: Condair

zum Beispiel 19 bis 20 °C zu temperieren. Allerdings kann die Verdunstungskühlung keinen Beitrag zur Entfeuchtung der Außenluft leisten, da zum Unterschreiten der Taupunkttemperatur der Außenluft deutlich niedrigere Temperaturen im Kühler erforderlich sind.

Voraussetzungen für eine effiziente Verdunstungskühlung

Wie effizient eine indirekte Verdunstungskühlung in der Praxis tatsächlich ist, hängt hauptsächlich von folgenden Parametern ab:

- Die Abluft kann umso intensiver befeuchtet (bis etwa 96 %) und somit stärker gekühlt werden, je wärmer und je trockener sie ist.
- Je größer die Rückwärmezahl (Effizienz) der Wärmerückgewinnung ist, umso mehr Energie kann die warme Außenluft an die gekühlte Abluft übertragen. Seit Anfang 2018 fordert die Ökodesign-Verordnung 1253/2014 für alle RLT-Geräte den Einsatz einer Wärmerückgewinnung mit einer guten Rückwärmezahl von mindestens 73 % (KVS-Systeme 68 %).
- Bei guten Rahmenbedingungen (Außenluft < 30 °C, Abluft < 25 °C, geringe Feuchte) kann durch die indirekte Verdunstungskühlung eine Zulufttemperatur im Bereich von 20 bis 22 °C erreicht werden, sodass eine

mechanische Nachkühlung der Luft oft nicht mehr nötig ist.

- Aufgrund der möglichen Übertragung von belasteter (feuchter) Abluft zur Zuluft werden zur Wärmerückgewinnung bei der Verdunstungskühlung sehr dichte Plattenwärmeübertrager oder Kreislaufverbundsysteme empfohlen. Der Einsatz von Rotoren ist wegen der systembedingt vorhandenen Leckage zwischen Abluft- und Außenluftseite zu prüfen.

Leistungen der Verdunstungskühlung

Zur Berechnung der Leistung und der Kühlarbeit einer Verdunstungskühlung dient nachfolgend das von der Condair GmbH entwickelte Programm „myCoolblue“ (www.mycollblue.de). Damit können Fachplaner und Hersteller von RLT-Geräten bereits bei der Projektierung des Lüftungsgeräts sehr rasch und genau die energetischen Potenziale und Einsparungen durch den Betrieb der indirekten Verdunstungskühlung ermitteln. Das Programm basiert auf drei Schritten:

- Eingabe des Standorts des Projekts und aller gewünschten Betriebsdaten (Nutzungszeiten pro Tag/Woche, Temperatur- und Feuchtesollwerte im Raum). Im Programm sind die Auslegungsdaten und Jahresverläufe von Außentemperaturen und Feuch-

	Potsdam	München
Betriebsstunden VK	642 h/a	573 h/a
Kältearbeit gesamt	20 014 kWh/a	16 857 kWh/a
Kältearbeit mechanisch	10 122 kWh/a	8 128 kWh/a
Kältearbeit VK + WRG	9 892 kWh/a	8 729 kWh/a
Anteil VK + WRG	49 %	52 %
Arbeitszahl VK	4,9	4,4
Leistung Wasserkühler		
ohne VK	76 kW	75 kW
mit VK	70 kW	67 kW

ten für die 15 deutschen Referenzstandorte und für 320 internationale Städte hinterlegt. Die Daten basieren auf der VDI 4710 „Meteorologische Grundlagen für die technische Gebäudeausrüstung“ und auf Meteorolognorm-Wetterdaten. Die vorgegebenen Werte können individuell geändert werden.

- Eingabe der Anlagendaten. Das sind der Luftvolumenstrom, die voraussichtlichen Abmessungen des RLT-Geräts (Luftgeschwindigkeit im RLT-Gerät), das System zur Wärmerückgewinnung (inklusive Rückwärmezahl), Druckerhöhungen, Ventilatorwirkungsgrade sowie die Anordnung der Komponenten im RLT-Gerät. Die so konfigurierte RLT-Anlage wird in einer Grafik dargestellt.
- Aus den Eingabedaten berechnet das Programm folgende Werte: Gesamtbetriebsstunden der RLT-Anlage pro Jahr, Betriebsstunden der Verdunstungskühlung und die zur Luftkühlung zu installierende Kälteleistung des Wasserkühlsatzes mit und ohne Berücksichtigung der Verdunstungskühlung. Angegeben werden auch die insgesamt pro Jahr benötigte Kältearbeit zur Luftkühlung mit den Anteilen der mechanischen Kühlung (inklusive Entfeuchtung), der Wärmerückgewinnung und der Verdunstungskühlung, sowie die Jahresarbeitszahl der Verdunstungskühlung. Diese ist das Verhältnis der von der Verdunstungskühlung erzeugten Kältearbeit zur benötigten Pumpenarbeit zur Förderung des Verdunstungswassers und der Ventilatorarbeit zur Überwindung des luftseitigen Druckverlusts des Verdunstungskühlers.

Mit diesem Programm werden nun Beispiele berechnet, die die Potenziale und Leistungen einer Verdunstungskühlung an den Standorten Potsdam (deutscher

Referenzstandort) und München (Mühldorf) zeigen. Dabei orientieren sich die Daten bezüglich der Außenluft- und Abluftzustände an den Referenzvorgaben der BAFA-Förderung der indirekten Verdunstungskühlung (Abluft 25 °C, 60 % r.F., Außenluft 32 °C, 40 % r.F.). Angenommen wird ein RLT-Gerät mit einer Luftleistung von 10 800 m³/h (3 m³/s), ein Kreuzstromwärmeübertrager (Rückwärmezahl 75 %), eine Abluftbefeuchtung auf 95 %, eine Luftgeschwindigkeit im RLT-Gerät von 1,7 m/s, eine Effizienz der Ventilator-Motor-Einheit von 0,6 und eine Betriebszeit der RLT-Anlage von 60 h pro Woche (3 120 h pro Jahr). Die Ergebnisse der Berechnungen sind in **Tabelle 1** zusammengefasst und in Bild 3 dargestellt.

Gemäß Tabelle 1 leistet die indirekte Verdunstungskühlung inklusive der Wärmerückgewinnung an beiden Standorten einen Anteil von rund 50 % der jährlich zur Luftkühlung benötigten Kältearbeit. Die Jahresarbeitszahl der Verdunstungskühlung liegt bei 4,4 und 4,9. Gleichzeitig kann durch den Einsatz der Verdunstungskühlung die Nennleistung des Wasserkühlsatzes um 6 kW (Potsdam) beziehungsweise 8 kW (München) verringert werden. Während die Verdunstungskühlung einen Großteil der sensiblen Luftkühlung übernimmt, wird die Leistung des Wasserkühlsatzes wesentlich zur Luftentfeuchtung benötigt.

Diese Aussagen und Tendenzen werden durch einen weiteren Berechnungsgang bestätigt. Dabei werden alle Betriebsparameter der Beispielrechnung unverändert übernommen und nur ein Parameter geändert: Die maximal erlaubte Raumluft- beziehungsweise die Abluftfeuchte wird von zuvor 60 % auf nun 70 % erhöht. Dies führt zwar in den Räumen zu einer etwas geringeren thermischen Behaglichkeit,

Tabelle 1

Ergebnisse der Beispielrechnungen zur indirekten Verdunstungskühlung (VK) für die Standorte Potsdam und München (Variante 1: Abluftfeuchte maximal 60 %)

aber eine solche, erhöhte Raumluftfeuchte wird sich nur an sehr wenigen Stunden im Jahr einstellen. Allerdings trägt diese Erhöhung der Feuchte erheblich zur Verringerung der jährlichen Kältearbeiten zur Luftkühlung und Entfeuchtung bei, wie die Ergebnisse in **Tabelle 2** zeigen.

Bei einem Vergleich der Daten in Tabelle 1 (Abluftfeuchte 60 %) und Tabelle 2 (Abluftfeuchte 70 %) ergeben sich folgende Ergebnisse:

- Die insgesamt zur Luftkühlung zu leistende Kältearbeit ist in Potsdam um knapp 5 000 kWh/a und in München um etwa 4 400 kWh/a gesunken. Dies entspricht im Vergleich zum Referenzzustand „60 % relative Feuchte“ einer Verringerung um rund 25 %.
- Gleichzeitig ist der Anteil der Kältearbeit der Verdunstungskühlung und der Wärmerückgewinnung auf deutlich über 60 % gestiegen.
- Der Wasserkühlsatz benötigt nun eine um 15 kW (Potsdam) beziehungsweise um 13 kW (München) geringere Nennleistung.

Einsparungen durch die Verdunstungskühlung

Welche Einsparungen in Euro ergeben sich durch den Betrieb der Verdunstungskühlung zur Luftkühlung? Dazu wird angenommen, dass der eingesetzte Wasserkühlsatz eine Arbeitszahl von 4,0 hat. Wenn durch die Verdunstungskühlung am Standort Potsdam (60 % r.F.) 9 892 kWh/a_{th} eingespart werden, entspricht dies einer elektrischen Arbeit von $9 892 : 4 = 2 473 \text{ kWh/a}_{el}$ (bei 70 % r.F. im Vergleich zum Referenzzustand $20 014 \text{ kWh/a} - 5 654 \text{ kWh/a} = 14 360 \text{ kWh/a}_{th} : 4 = 3 590 \text{ kWh/a}_{el}$). Bei einem Strompreis von 18 Cent/kWh ergeben sich Einsparungen an elektrischer Arbeit von 445 €/a (60 % r.F.) beziehungsweise von 646 €/a (70 % r.F.). Berücksichtigt man eine Lebenszyklusbetrachtung über 15 Jahre, ergeben sich daraus 6 675 € und 9 690 €.

Weitere Einsparungen kommen aus den verringerten Nennleistungen der einzusetzenden Wasserkühlsätze. Hier wird angenommen, dass pro kW geringere Kälteleistung 300 € weniger Investitionskosten anfallen. Alle Einsparun-

Tabelle 2

Ergebnisse der Beispielrechnungen zur indirekten Verdunstungskühlung (VK) für die Standorte Potsdam und München (Variante 2: Abluftfeuchte 70 %)

	Potsdam	München
Betriebsstunden VK	642 h/a	573 h/a
Kältearbeit gesamt	15 031 kWh/a	12 428 kWh/a
Kältearbeit mechanisch	5 654 kWh/a	4 194 kWh/a
Kältearbeit VK + WRG	9 377 kWh/a	8 234 kWh/a
Anteil VK + WRG	62 %	66 %
Arbeitszahl VK	4,7	4,1
Leistung Wasserkühler		
ohne VK	67 kW	56 kW
mit VK	52 kW	43 kW

gen werden für beide Berechnungen gemeinsam mit den Beträgen der BAFA-Förderungen in **Tabelle 3** zusammengestellt.

Die neue Förderrichtlinie Kälte-Klima

Mit Wirkung zum 1. Januar 2019 hat das Bundeswirtschaftsministerium eine Neufassung der „Richtlinie zur Förderung von energieeffizienten Kälte- und Klimaanlageanlagen mit nicht-halogenierten Kältemitteln in stationären und Fahrzeug-Anwendungen“ veröffentlicht. Sie wird ausgeführt vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA, www.bafa.de). Nach der neuen Richtlinie werden nur noch neue Kälte- und Klimaanlageanlagen gefördert, die mit natürlichen Kältemitteln betrieben werden (Propan, Propen, Isobutan, Ethan, Ammoniak, CO₂, Wasser), sowie Ab- und Adsorptions-Kälteanlagen. Systeme der indirekten Verdunstungskühlung wurden neu in die Förderrichtlinie aufgenommen. Die Förderhöhe F einer Kälte- oder Klimaanlage (in Euro) ergibt sich nach der Gleichung

$$F = (A \cdot X^B + C) \cdot X$$

Darin sind X die Nennkälteleistung der Anlage (in kW) und A, B und C anlagen-spezifische Koeffizienten, die für jedes einzelne Kältesystem definiert sind. Für die indirekte Verdunstungskühlung gilt: A = 3 567,45, B = -1,0788, C = 70,79. Die durch die Verdunstungskühlung erzeugte Kälteleistung X wird für die definierten Bedingungen Außenluft (32 °C, 40 % r.F.) und Abluft (25 °C, 60 % r.F.) und die eingesetzte

Wärmerückgewinnung berechnet. Bei einer Befeuchtung der Abluft (25 °C, 60 % r.F.) in der Verdunstungskühlung auf 96 % sinkt deren Temperatur auf etwa 20 °C. Dann ergibt sich bei einer Rückwärmezahl der Wärmerückgewinnung von 75 % die Kälteleistung zu

$$X = q \cdot p \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot \eta_{WRG}$$

$$X = 3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 1 006 \text{ kJ/kgK} \cdot (32 - 20) \text{ K} \cdot 0,75$$

$$X = 32,6 \text{ kW}$$

Setzt man diesen Wert in die Fördergleichung ein, folgt für die Förderung

$$K = (3 567,45 \cdot 32,6^{-1,0788} + 70,79) \cdot 32,6 = 5 018 \text{ €}$$

Somit wird in diesem Beispiel die RLT-Anlage, unabhängig vom Standort und von sonstigen Betriebsparametern, vom BAFA pauschal mit 5 018 € gefördert.

Zusammenfassung der Einsparungen

Insgesamt ergeben sich durch den Betrieb der indirekten Verdunstungskühlung für die Beispiel-RLT-Anlage, die beiden Standorte, die beiden Feuchteannahmen (60 % und 70 %), und für eine Betrachtungszeit von 15 Jahren die in Tabelle 3 dargestellten Einsparungen. Die Daten zeigen, dass sich durch den Einsatz einer indirekten Verdunstungskühlung im Standardbetrieb (Abluftfeuchte 60 %) über eine Betriebszeit von 15 Jahren erhebliche Einsparungen von mehr als 13 000 € ergeben. Diese

Einsparungen steigen auf Werte von rund 22 000 bis 23 000 €, wenn der Betreiber bereit ist, für wenige Stunden im Jahr eine Raumluftfeuchte von 70 % zu akzeptieren.

Die Aufwendungen zur Verdunstungskühlung

Den Einsparungen in Tabelle 3 stehen aber mehrere Aufwendungen gegenüber. Dies ist zunächst der Kauf des Verdunstungskühlers. Hinzu kommen Betriebskosten für das benötigte Wasser und dessen Aufbereitung (hierfür kann auch aufbereitetes Regenwasser eingesetzt werden), der zusätzliche Stromverbrauch des Abluftventilators (Druckverlust des Verdunsters) und für die Wasserpumpe, Kosten für eine dichtere Ausführung der Wärmerückgewinnung sowie Kosten für Service, Wartung und Instandhaltung (Kontrolle der Wasserhygiene, Austausch der Befeuchtungskörper etc.).

Alle Kosten und Einsparungen sind aber sehr stark abhängig von der RLT-Anlage selbst (Luftvolumenstrom, Rückwärmezahl der Wärmerückgewinnung, Befeuchtungsleistung, Betriebszeit), den Betriebsparametern (Temperaturen und Feuchten von Zuluft, Abluft und Außenluft), dem Standort (Jahresgang der Außenluft), den tatsächlichen Strom- und Wasserpreisen, der Arbeitszahl des Wasserkühlsatzes und den realen Einsparungen bei der Verringerung der Nennleistung des Wasserkühlsatzes. Daher können die vorherigen Beispielrechnungen nur Tendenzen aufzeigen. All diese Faktoren müssen projektspezifisch in Simulationsrechnungen von

Tabelle 3

Gesamte Einsparungen beim Betrieb der indirekten Verdunstungskühlung durch die Verringerung der elektrischen Kältearbeit des Wasserkühlsatzes, die geringeren Investitionen für den Wasserkühlsatz (WKS) und die BAFA-Förderung in 15 Jahren Betriebszeit

Einsparung durch	Potsdam (60 % r. F.)	Potsdam (70 % r. F.)	München (60 % r. F.)	München (70 % r. F.)
elektrische Arbeit	6 675 €	9 693 €	5 893 €	8 548 €
Investition WKS	1 800 €	7 200 €	2 400 €	9 600 €
Förderung BAFA	5 018 €	5 018 €	5 018 €	5 018 €
Summe	13 493 €	21 911 €	13 310 €	23 166 €

von Fachplanern oder von Herstellern von RLT-Geräten, die Systeme zur Verdunstungskühlung anbieten

ten, ermittelt werden. Aus vielen bisher ausgeführten Lüftungsanlagen ergaben sich für Verdunstungskühlsysteme Amortisationszeiten zwischen rund drei bis zehn Jahren – allerdings ohne Berücksichtigung der neuen BAFA-Förderung, die diese Amortisationen nun deutlich verbessert.

Zusammenfassung

Um in RLT-Geräten die Leistungen der zur Luftkühlung eingesetzten Wasserkühlsätze zu verringern, bietet die indirekte Verdunstungskühlung erhebliche ökologische und ökonomische Potenziale. Die Verdunstungskühlung ist aber kaum dazu geeignet, die Gebäudeküh-

lung allein zu übernehmen. Sie ist nur bei wenigen Projekten, zum Beispiel an sommerlich kühlen Standorten, in der Lage, einen Wasserkühlsatz komplett zu ersetzen. Meist liegen die Anteile der Verdunstungskühlung an der Kühlarbeit, die jährlich zur Luftkühlung insgesamt benötigt wird, aber im Bereich von 50 bis 60 %. Daher sollte die Verdunstungskühlung, wie es auch mehrere aktuelle technische Regeln empfehlen, stets als ein „Basis-Öko-System zur Vorkühlung der Außenluft“ angesehen werden. Die Rest- oder Spitzenlast zur Luftkühlung und -entfeuchtung übernimmt der in der Leistung reduzierte und dadurch günstigere Wasserkühl-

satz. Ein weiterer positiver Aspekt sind die Einsparungen an CO₂-Emissionen durch den geringeren Stromverbrauch des Wasserkühlsatzes. Hier ist laut Bundesumweltamt ein Wert von rund 0,5 kg CO₂ pro eingesparte kWh Strom anzusetzen. Daraus folgt: Wenn die Kältearbeit des Wasserkühlsatzes (Arbeitszahl 4) zum Beispiel um 8 000 kWh/a verringert wird, entspricht das einer Einsparung beim Stromverbrauch um 2 000 kWh/a und einer Verringerung der CO₂-Emissionen um 1 t/a. Auch dieser Umweltaspekt gewinnt bei vielen Unternehmen an Bedeutung und spricht für den Einsatz einer Verdunstungskühlung.

© VDI Fachmedien GmbH & Co. KG, Düsseldorf 2019



myCoolblue mit BAFA-Förderrechner



Die Berechnungssoftware myCoolblue steht als Browser-Version unter www.mycoolblue.de und als iOS-App im AppStore kostenlos zur Verfügung.

