

# Adiabate Verdunstungskühlung in der Lüftungstechnik

*Der immer stärker werdende Nachhaltigkeitsgedanke in der Gebäudetechnik stellt hohe Anforderungen an einen effizienten Betrieb von Lüftungs- und Kälteanlagen. Für einen wirtschaftlichen Betrieb von raumlufttechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) ist nicht nur die Wärmerückgewinnung im Winter von Bedeutung, sondern auch die Kälteerzeugung und -rückgewinnung im Sommer. Neue gesetzliche Vorgaben für die mechanische Kältebereitstellung erhöhen die Anforderungen an Effizienz und Umweltschutz massiv. Als Alternative gewinnt der Einsatz natürlicher Kühlsysteme immer mehr an Bedeutung – beispielsweise die adiabate Verdunstungskühlung. Mit neuen Technologien ist es heutzutage möglich, den Bedarf an Kälteleistung mit der indirekten adiabaten Verdunstungskühlung ganzjährig bereitzustellen. Wenn kleine Zugeständnisse an den Komfort gestellt werden können, kann unter Umständen gänzlich auf mechanisch erzeugte Kälte verzichtet werden.*



Tobias Lackmann,  
Area Sales Manager  
Vertrieb / Technik,  
Menerga GmbH,  
Mülheim an der Ruhr

Die indirekte adiabate Verdunstungskühlung hat sich seit ihrer Einführung vor über 20 Jahren immer mehr als natürliche und energiesparende Ergänzung zur konventionellen mechanischen Kälteerzeugung etabliert. Ein Pionier in diesem Bereich war das Mülheimer Unternehmen Menerga, das bereits 1991 die ersten standardisierten Kompaktklimageräte mit adiabater Verdunstungskühlung vorstellte. Mittlerweile gibt es viele Anbieter unterschiedlichster Systeme, das grundlegende Prinzip der adiabaten Verdunstungskühlung bleibt dabei unverändert: Durch die Befeuchtung mit Wasser wird der Luft die für die Verdunstung benötigte Verdampfungswärme ohne externe Wärmezufuhr entzogen – also adiabatisch. Da bei dieser Zustandsänderung gleichzeitig die Luftfeuchte steigt, kann die Zuluft aus Komfortgründen nicht direkt befeuchtet werden. Das geschieht stattdessen im Abluftstrom. Die gekühlte, feuchte Abluft wird anschließend in ein Wärmerückgewinnungssystem geführt und kühlt dort die warme Außenluft sensibel ab. Die Leistungsfähigkeit der adiabaten Verdunstungskühlung und die erreichbare

Zulufttemperatur hängen entscheidend von der Außen- und Abluftfeuchte ab. In Mitteleuropa werden entsprechend ausgestattete Klimageräte daher insbesondere bei hohen Komfortansprüchen dreistufig betrieben. Die Anlagen arbeiten zunächst mit freier Kühlung und schalten dann bei Kühlbedarf die adiabate Verdunstungskühlung hinzu. Bei höheren Leistungsanforderungen oder Entfeuchtungsbedarf wird die Zuluft dann zusätzlich noch über ein Pumpen-Kaltwasser-Register oder alternativ über einen Direktverdampfer gekühlt.

## Umweltpolitik im Wandel

Die Europäische Union bemüht sich, den Energieverbrauch im Allgemeinen einzuschränken, speziell aber auch für Komponenten der Gebäudeklimatisierung. Daher ist in den vergangenen Jahren eine Vielzahl an EU-Verordnungen in Kraft getreten, die spezifische Grenzwerte für Energieverbräuche von Produkten und Anlagen definieren. So wurde beispielsweise im Jahr 2014 die EU-Verordnung 1253/2014 veröffentlicht, die Effizienzgrenzwerte für neu produzierte Lüftungsgeräte seit dem Jahr 2016 vorschreibt und eine Verschärfung dieser Grenzwerte seit Anfang 2018 mit sich brachte. Für die mechanische Kälteerzeugung schreibt die EU-Verordnung 2016/2281 seit dem Jahr 2018 spezifische Grenzwerte für die Effizienz und eine weitere Verschärfung ab dem Jahr 2021 vor.

Es werden nicht nur Mindesteffizienzstandards an Produkte und Anlagen definiert, auch die Verwendung von Kältemitteln zur mechanischen Kälteerzeugung wird reglementiert. Die Europäische Union bemüht

sich, die Verwendung von F-Gasen flächendeckend einzuschränken. Die Überarbeitung der EU-Verordnung 842/2006 sieht vor, den Einsatz der für die Klimatechnik relevanten Kältemittel R407C, R410A und R134a mittelfristig zu verbieten. Als Alternativen sollen dann nur noch natürliche Kältemittel und reine Hydrofluorolefine (HFO) zugelassen sein, die jedoch in Hinsicht auf die Effizienz sowie den Brand- und Explosionsschutz problematisch sind. Vor diesem Hintergrund wird die Bedeutung der adiabaten Verdunstungskühlung zukünftig erheblich größer werden, da sie vollständig auf den Einsatz von F-Gasen als Kältemittel verzichtet.

Zu den gesetzlich einzuhaltenden Anforderungen werden durch öffentliche Förderprogramme des Bundes Anreize geschaffen, umweltfreundliche Klimasysteme einzusetzen. So werden durch die Nationale Klimaschutzinitiative (NKI) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) die Neuerrichtung, die Voll- und die Teilsanierung mit besonders energieeffizienten Kälte- und Klimaanlage gefördert. Mit der Novellierung der Förderrichtlinie im Jahr 2018 sind auch besonders effiziente Systeme mit adiabater Verdunstungskühlung förderfähig. Die Förderhöhe ist variabel und richtet sich nach Größe und Art der Anlage. Außerdem wird zwischen Neuerrichtung und Sanierung unterschieden. Die Förderhöchstgrenze beträgt 150.000 Euro.

## Übersicht marktgängiger Systeme

Mittlerweile haben sich viele Ansätze zur Umsetzung der indirekten adiabaten Verdunstungskühlung in Zentralklimageräte



ten etabliert. Im Folgenden werden die fünf wichtigsten, marktüblichen Lösungen in Bezug auf Technik, Effizienz sowie Vor- und Nachteile kurz vorgestellt. Als Kriterium für die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Systeme wird dabei der adiabate Kühlwirkungsgrad herangezogen. Ausgehend von der Tatsache, dass die theoretisch minimal erreichbare Zulufttemperatur der Feuchtkugeltemperatur der Abluft entspricht, ist diese folgendermaßen definiert:

$$\phi_{adia} = \frac{\text{Außenlufttemperatur} - \text{Zulufttemperatur}}{\text{Außenlufttemperatur} - \text{Feuchtkugeltemperatur der Abluft}}$$

Einen wesentlichen Einfluss auf den adiabaten Kühlwirkungsgrad haben dabei der Wirkungsgrad des Befeuchtungssystems und die Rückwärmzahl der Wärmerückgewinnung.

**System 1: Abluftbefeuchtung und Rotationswärmeübertrager**

Die technisch einfachste Lösung liegt darin, Befeuchtung und Wärmeübertragung im Klimagerät zu trennen. Dabei wird der Abluftstrom erst durch ein Befeuchtungssystem – in den meisten Fällen ein Wabenbefeuchter – und anschließend häufig durch einen Rotationswärmeübertrager geführt (Abbildung 1). Gerade bei größeren Luftleistungen von mehr als 10.000 m³/h erreicht diese Kombination bei niedrigen Anschaffungskosten einen guten adiabaten Kühlwirkungsgrad von 70 Prozent. Zudem können die Anlagen mit einer geringen Baulänge ausgeführt werden. Weiterhin stellt der Betrieb des Wabenbefeuchters keine besonderen Anforderungen an die Wasserqualität, sodass hier in der Regel einfaches Leitungswasser verwendet und auf eine zusätzliche Aufbereitung verzichtet werden kann. Kritisch muss allerdings die bei regenerativen Wärmerückgewinnungssystemen unvermeidbare Feuchteübertragung von der Abluft an die Zuluft betrach-

Tabelle 1: Leistungsdaten der Systeme zur adiabaten Verdunstungskühlung

Leistungsdaten der Systeme zur adiabaten Verdunstungskühlung			
System		$\phi_{adia}$	WRG Klasse nach EN 13053:2017 (ENTWURF)
1	Abluftbefeuchtung und Rotationswärmeübertrager	70 %	H2
2	Abluftdirektbefeuchtung mit Frischwasser und Kreuz-Gegenstrom Rekuperator	75 %	H2
3	Abluftdirektbefeuchtung mit Hochleistungs-KVS	90 %	H2
4	Abluftdirektbefeuchtung mit Umlaufwasser und Gegenstrom Rekuperator	91 %	H1
5	Abluftdirektbefeuchtung mit Umlaufwasser, Taupunktkühlung und Gegenstrom Rekuperator	> 100 %	H1

tet werden, die in Hinsicht auf die einzuhaltenden Behaglichkeitskriterien eine große Herausforderung darstellt.

Feuchteübertragung geschieht sowohl über den Rotationswärmeübertrager selbst als auch über Leckagen an den Schleifdichtungen. Um die Übertragung von Luftfeuchtigkeit auf die Zuluft über Leckluft und Mitrotationsluft auszuschließen, muss die Ventilatoranordnung so gewählt werden, dass ein Druckgefälle von der Zuluft- zur Abluftseite gewährleistet ist. Zudem muss der Rotationswärmeübertrager mit einer Spülkammer ausgerüstet werden. Der dann als Leck- und Spülluft zusätzlich zu transportierende Außenluftvolumenstrom muss bei der Dimensionierung der Ventilatoren berücksichtigt werden. Hohe Anforderungen an die Hygiene ergeben sich durch den Wabenbefeuchter im Abluftstrom vor dem regenerativen Wärmerückgewinnungssystem. Um einer Keimbildung mit der möglichen Folge einer Keimübertragung in den Zuluftstrom sicher vorzubeugen, sind sehr kurze Wartungs-

zyklen erforderlich. Diese erhöhen wiederum die Betriebskosten. Weiterhin entstehen Druckverluste durch den Wabenbefeuchter, auch wenn die Verdunstungskühlung nicht aktiv ist. Diese führen ganzjährig zu einer erhöhten Leistungsaufnahme des Abluftventilators und verringern so die Energieeffizienz des Klimageräts.

**System 2: Abluftdirektbefeuchtung mit Frischwasser und Rekuperator**

Eine deutlich höhere Effizienz bei der Verdunstungskühlung lässt sich erreichen, wenn die Abluft direkt im Wärmerückgewinnungssystem befeuchtet wird (Abbildung 2). Dann finden die Stoff- und Wärmeübertragung gleichzeitig im Rekuperator statt. Das ist energetisch und physikalisch deutlich günstiger. Hierzu wird im Abluft- bzw. Fortluftweg so viel Wasser versprüht, dass der Verdunstungsprozess noch innerhalb des Plattenwärmeübertragers erfolgt. Voraussetzung dafür ist, dass der Rekuperator absolut luftdicht und korrosionsbeständig ist. Hier spielt auch das verwendete Material eine wichtige Rolle, wobei Edelstahl und Aluminium deutlich anfälliger für Verunreinigungen durch Wasser sind als Kunststoff. Derartige Systeme basieren in der Regel auf einem Kreuz-Gegenstrom-Wärmeübertrager (typische WRG-Klasse H2 nach DIN EN 13053:2017 ENTWURF), werden aber auch mit einfachen Kreuzstrom-Plattenwärmeübertragern bzw. mit Kreislauf-Verbund-Systemen ausgeführt. Zur Einbringung des Wassers in den Luftstrom sind die Düsen der Sprühanlage am Ablufteintritt angeordnet. Auf diese Weise wird die abluftseitige Wärmeübertragerfläche gleichzeitig direkt zur Befeuchtung genutzt, wodurch sich die

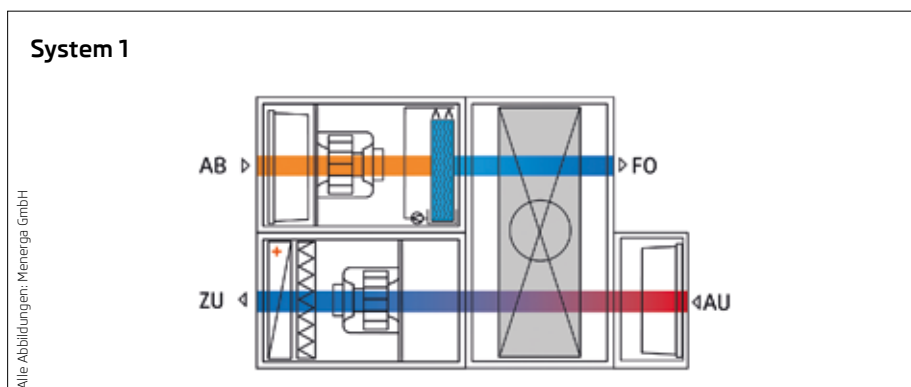


Abbildung 1: Abluftbefeuchtung und Rotationswärmeübertrager

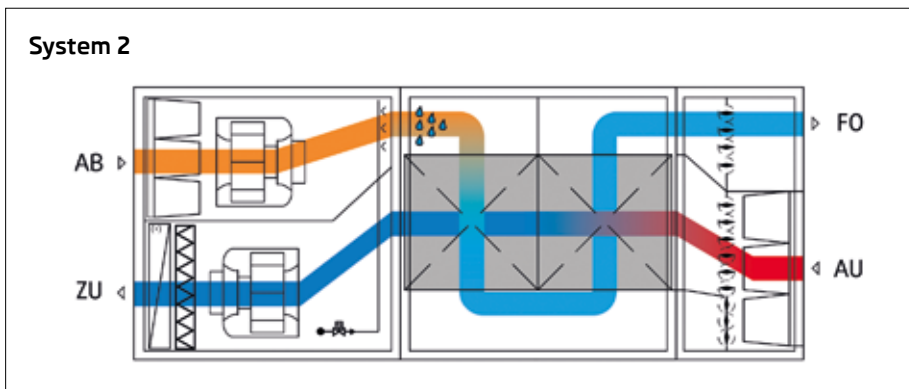


Abbildung 2: Abluftdirektbefeuchtung mit Frischwasser und Rekuperator

Kühlleistung deutlich erhöht. Wird eine hydrophile Oberflächenbeschichtung des Plattenwärmeübertragers auf der Abluftseite verwendet, unterstützt sie die Bildung eines Flüssigkeitsfilms für höhere Verdunstung und damit bessere Kühlleistungen. Weiterhin werden nicht verdunstete Wassertropfen über einen am Fortluftaustritt des Rekuperators installierten Tropfenabscheider abgeschieden und dem Ablauf zugeführt. Da so auf ein zusätzliches Befeuchtungssystem im Abluftstrom verzichtet werden kann, reduzieren sich die Investitionskosten und die Baulänge. Höhere Druckverluste auf dem Abluftweg entstehen nur im Betrieb des adiabaten Kühlsystems durch die Benetzung der Wärmeübertragungsplatten. Dauerhafte, zusätzliche Druckverluste im Betrieb ohne Kühlung treten nicht auf. In dieser einfachen Geräteausführung wird das unterhalb des Rekuperators aufgefangene, nicht vom Abluftstrom aufgenommene Wasser direkt abgeführt. Hier werden die Investitions- und auch Betriebskosten für ein Umlaufwassersystem gespart, sodass die Anschaffungskosten insgesamt relativ niedrig sind. Gleichzeitig sind die Anforderungen an die Wasseraufbereitung zur Vermeidung von Ablagerungen im Wärmeübertrager vergleichsweise gering. In den meisten Fällen kommt enthärtetes Wasser zum Einsatz. Um höhere adiabate Kühlwirkungsgrade von bis zu 75 Prozent bei der Verdunstungskühlung zu erreichen, müssen allerdings größere Mengen Frischwasser versprüht werden, als für die Befeuchtung der Abluft notwendig sind. Dementsprechend steigt bei hohem Kältebedarf die Wasser-Luft-Zahl stark an. Das wirkt sich deutlich auf die Betriebskosten aus.

### System 3: Abluftdirektbefeuchtung mit Kreislaufverbundsystem

Neben dem Einsatz von Rotationswärmeübertragern und Kreuz-Gegenstrom-Rekuperatoren

können auch Kreislaufverbundsysteme (KV-Systeme) mit einer adiabaten Befeuchtung ausgestattet werden. Für ein solches Wärmerückgewinnungssystem werden hauptsächlich Lamellenrohrwärmetauscher eingesetzt, die jeweils im Außen- bzw. im Abluftstrom eingebaut werden. Die Anzahl der einzusetzenden Wärmetauscher wird anhand der Auslegungsbedingungen bestimmt und muss nicht symmetrisch auf die Luftwege aufgeteilt werden. Systembedingt sind die Luftströme vollständig voneinander getrennt, wodurch eine Übertragung von der Ab- auf die Zuluft ausgeschlossen ist. Zur Übertragung der Wärme- bzw. Kälteenergie zirkuliert ein Wärmeübertragungsmedium zwischen den Wärmetauschern – meistens ein Wasser-Glykol Gemisch.

In der Praxis haben sich zwei unterschiedliche Möglichkeiten bewährt, um KV-Systeme mit einer adiabaten Abluftbefeuchtung zu kombinieren. Die einfachste Möglichkeit mit dem technisch geringsten Aufwand ist, dem KV-System auf der Abluftseite einen Wabenbefeuchter vorzuschalten. Hier wird der Abluftstrom vor dem Eintritt in den ersten Wärmetauscher des KV-Systems adiabatisch befeuchtet und folglich abgekühlt. Mit Hilfe des im Abluftstrom abgekühlten

Wärmeübertragungsmediums wird die Außenluft vorgekühlt.

Eine effizientere Möglichkeit, KV-Systeme mit einer adiabaten Abluftbefeuchtung zu kombinieren, ist das direkte Besprühen der Abluftwärmetauscheroberfläche mit Wasser. Bei dieser Variante wird vor jedem Abluftwärmetauscher ein Düsenstock installiert, der Wasser auf die Wärmetauscher sprüht und so einen Wasserfilm auf den Lamellen erzeugt. Der Verdunstungskühleffekt stellt sich durch das Überströmen der nassen Lamellen mit Luft ein. Eine Reihenschaltung mehrerer Wärmetauscher pro Luftweg mit vorgeschalteten Düsenstöcken ergibt die mehrstufige Befeuchtung. Durch den Temperaturanstieg der Abluft nach jedem Wärmetauscher ist neues Verdunstungspotenzial (relative Feuchte < 100 Prozent) vorhanden. Vor dem Eintritt in den nächsten Wärmetauscher wird die Abluft erneut adiabatisch befeuchtet und abgekühlt. Folglich ist das System bestehend aus mehrstufiger Befeuchtung leistungsstärker.

Tendenziell weisen KV-Systeme einen höheren luftseitigen Druckverlust auf als Rotationswärmetauscher oder Rekuperatoren. Speziell bei mehrstufigen Systemen muss zwischen Effizienz und zusätzlichen Druckverlusten abgewogen werden, um einen wirtschaftlichen Betrieb sicherzustellen. KV-Systeme werden dann eingesetzt, wenn eine Vermischung von Abluft und Zuluft unter allen Umständen zu vermeiden ist oder örtliche Gegebenheiten eine getrennte Aufstellung von AU-ZU-Gerät und AB-FO-Gerät erforderlich machen. Die Verwendung solcher Wärmerückgewinnungssysteme bedingt den Einsatz zusätzlicher Pumpen, um das Wärmeträgermedium zirkulieren zu lassen. Die hierfür einzusetzende elektrische Energie muss ebenfalls in die Leistungsbewertung einbezogen werden. Zudem bringen diese Systeme einen erhöhten Installations- und Inbetriebnahmeaufwand mit sich.

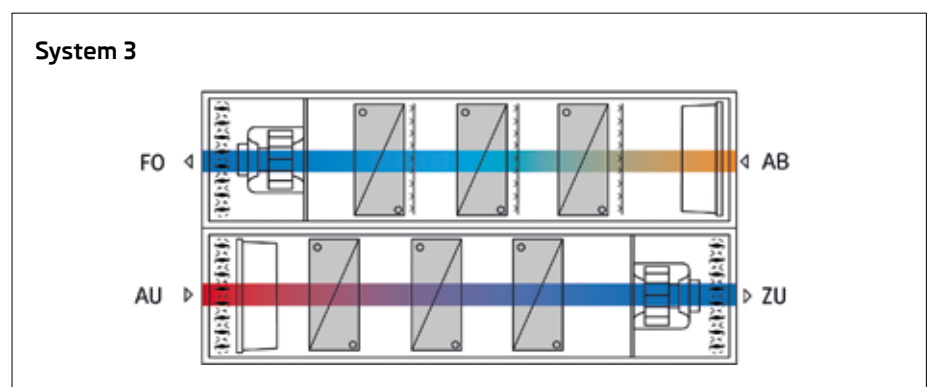


Abbildung 3: Abluftdirektbefeuchtung mit Kreislaufverbundsystem

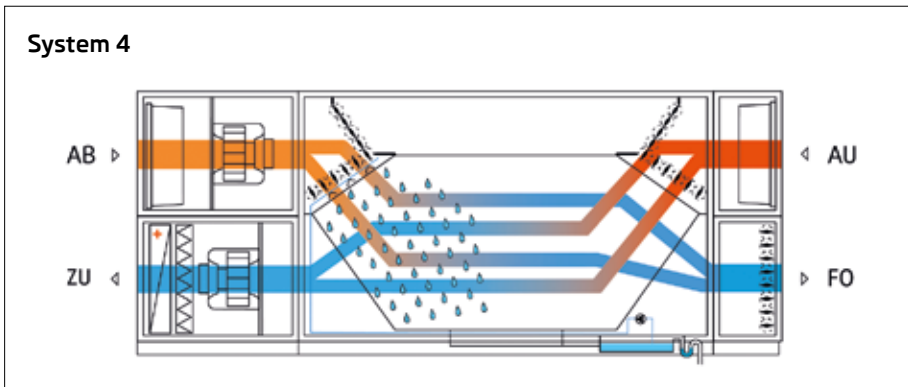


Abbildung 4: Einsatz von Gegenstrom-Wärmeübertragern

**System 4: Einsatz von Gegenstrom-Wärmeübertragern**

Die erfolgreiche Einführung von Gegenstrom-Plattenwärmeübertragern in Klimageräten mit hohen Luftleistungen war für die indirekte Verdunstungskühlung ein wichtiger Entwicklungssprung. Dadurch ist diese Art der „natürlichen“ Kühlung in vielen Anwendungsfällen zu einer vollwertigen Alternative für konventionelle Anlagen geworden. Durch die hohe Effizienz des Gegenstromprinzips ist es möglich, den adiabaten Kühlwirkungsgrad und die Kühlleistung noch einmal deutlich zu steigern. Das führt dazu, dass zusätzliche Kompressionskälteanlagen erheblich kleiner dimensioniert werden können oder gar nicht mehr benötigt werden. Entsprechend ausgestattete Zentralklimageräte wurden als Prototyp erstmals auf der ISH 2011 vorgestellt. Aufbauend auf dem Prinzip der Abluftbefeuchtung mit Umlaufwasser wird dabei der Kreuz-Gegenstrom-Plattenwärmeübertrager durch einen Gegenstrom-Plattenwärmeübertrager ersetzt. Mit hohen Rückwärmzahlen von über 90 Prozent und einem energetischen Wirkungsgrad von über 75 Prozent gemäß DIN EN 13053:2017 ENTWURF verfügen die Geräte über ein Wärmerückgewinnungssystem, das die strengen Anforderungen der Wärmerückgewinnungskategorie H1 über den gesamten Arbeitsbereich weit übertrifft. Durch die patentierte Konstruktionsweise liegen die Druckverluste hier bei sehr niedrigen 150 Pa – auch bei hohen Nennvolumenströmen von mehreren 10.000 m<sup>3</sup>/h.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Nutzung von Gegenstrom-Plattenwärmeübertragern für die Verdunstungskühlung ist die Befeuchtung der Abluft direkt im Rekuperator. Aufgrund der Luftführung kann das Wasser hier normalerweise nur unmittelbar vor dem Ablufteintritt versprüht werden. Die im Gegenstromsektor offene Bauform ermöglicht es, das gesamte Wärmerückgewinnungssystem flächendeckend zu benetzen. Dazu muss lediglich ein zweiter Düsenstock über den oben offenen, abluftseitigen Luftkanälen im Gegenstrombereich des Wärmeübertragers angebracht werden. Gleichzeitig wurde der Wärmeübertrager so konstruiert, dass sich kein Stauwasser im Luftweg ansammeln kann. So kommt es zwar zur gewünschten und notwendigen Tropfenbildung auf der Oberfläche – sobald sich diese Tropfen aber zu einem Film zusammenschließen, fließen sie direkt ab und werden in einer separaten Speicherwanne aufgefangen. So können sich auch bei den großen Wärmeübertragerflächen, wie sie beim Gegenstromprinzip zur Verfügung stehen, keine Wassernester bilden und es werden auch keine zusätzlichen Druckverluste erzeugt.

Standardmäßig wird in Zentralklimageräten mit Adconair-Wärmerückgewinnung nur ein Düsenstock an der Einströmung verwendet, wodurch die Luft in der vorderen Hälfte der Abluftseite des Gegenstrom-Plattenwärmeübertragers befeuchtet wird. Damit ist die für die Verdunstungskühlung genutzte Fläche deutlich kleiner als beim System mit Kreuz-Gegenstrom-Plattenwärmeübertrager. Das wird allerdings durch den hohen Wärmerückgewinnungsgrad des Gegenstrom-

Das neueste System der indirekten, adiabaten Verdunstungskühlung beweist, dass für die herkömmliche Gebäudeklimatisierung keine Kompressionskälteanlage installiert werden muss. Die mit dem deutschen Kältepreis 2018 ausgezeichnete Kühltechnologie Adiabatic<sup>zeroGWP</sup> auf Basis einer Adconair-Wärmerückgewinnung, besteht aus einer Kombination aus Gegenstrom-Plattenwärmeübertrager mit direkter, adiabater Verdunstungskühlung und Taupunktkühlung. Konstant niedrige Zulufttemperaturen können garantiert werden, das minimiert bzw. ersetzt den Einsatz mechanisch erzeugter Kälte.

Plattenwärmeübertragers mehr als kompensiert. Gleichzeitig reduziert sich die benötigte Wassermenge deutlich. Das macht sich in einer entsprechend geringeren elektrischen Leistungsaufnahme der Pumpen für das Umlaufwasser bemerkbar. Durch die vollständige Nachverdunstung aller Aerosole im Gegenstromteil des Rekuperators treten keine Aerosole oder Tropfen auf der Fortluftseite des Wärmeübertragers aus. Deshalb ist hier auch kein zusätzlicher Tropfenabscheider erforderlich und die relative Feuchtigkeit der Fortluft im adiabaten Kühlobetrieb ist im Vergleich zu anderen Systemen sehr niedrig. Auf diese Weise erreichen die Zentralklimageräte einen adiabaten Kühlwirkungsgrad von 91 Prozent, womit die Temperatur der Außenluft nach Herstellerangaben um mehr als 14 K gesenkt werden kann.

**System 5: Direkte Abluftbefeuchtung mit Umlaufwasser, Taupunktkühlung und Gegenstrom-Rekuperator**

Bei der direkten adiabaten Abluftbefeuchtung mit Umlaufwasser und Taupunktkühlung im Gegenstrom-Rekuperator wird an zwei Stellen innerhalb des Lüftungsgerätes ein Luftstrom befeuchtet. Im hinteren Teil, beim Eintritt der Abluft in den Wärmeübertrager, findet die direkte Abluftbefeuchtung

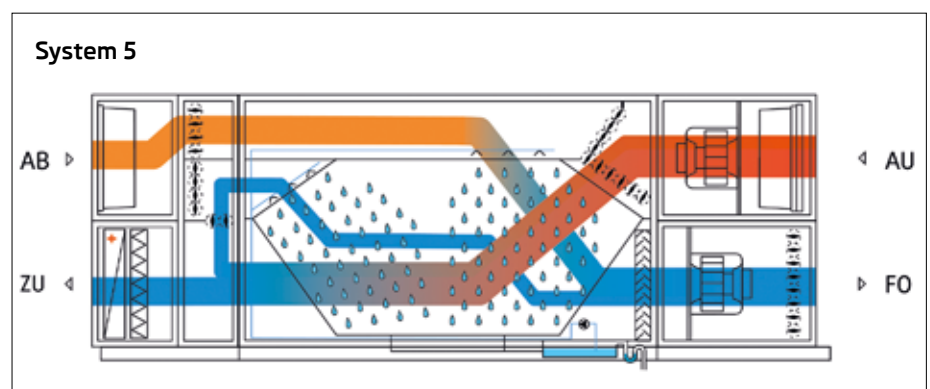


Abbildung 5: Direkte Abluftbefeuchtung mit Umlaufwasser, Taupunktkühlung und Gegenstrom-Rekuperator



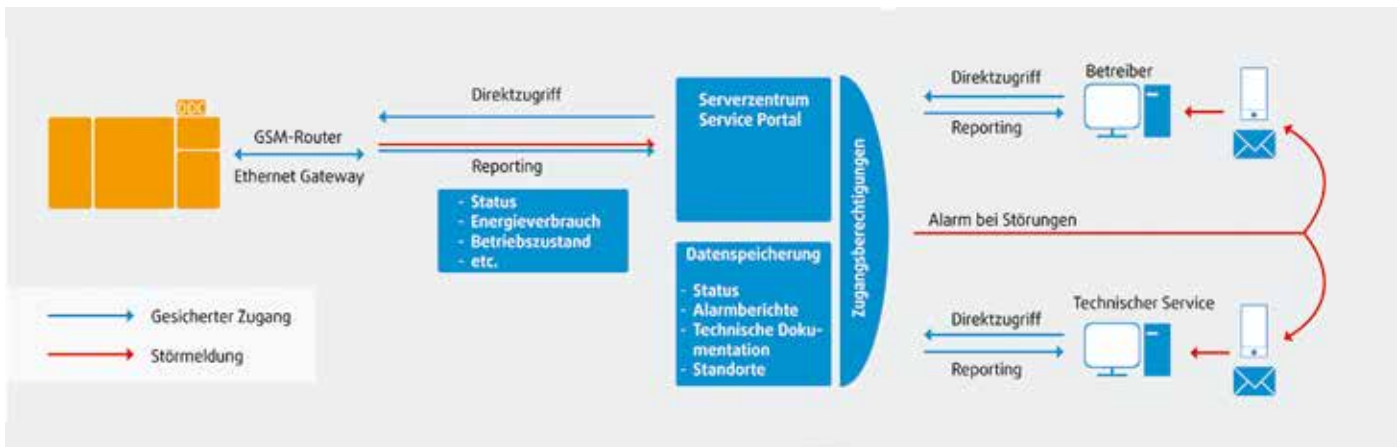


Abbildung 6: Energiemonitoring-Systeme ermöglichen die Kontrolle und Aufzeichnung energieverbrauchsrelevanter Daten.

ähnlich Abbildung 4 statt. Damit wird der Außenluftstrom bereits zu einem großen Teil abgekühlt. Ein Teil dieses gekühlten Luftstromes wird als Prozessluftstrom auf der Zuluftseite direkt nach dem Austritt aus dem Wärmeübertrager entnommen und zurückgeführt. Bevor der Prozessluftstrom im Gegenstromprinzip dem Wärmeübertrager wieder zugeführt wird, befindet sich eine zweite Stelle zur Luftstrombefeuchtung, die als Taupunktkühlung bezeichnet wird. Durch die Befeuchtung und die damit verbundene Zustandsänderung der Prozessluft (Temperaturabnahme) ist zusätzliches Kühlpotenzial zur Außenluftkühlung gegeben.

Durch das sensible Kühlen der Außenluft im ersten Schritt wird die Enthalpie gesenkt. Dadurch wird erreicht, dass die Feuchtkugeltemperatur der Außenluft unterhalb der Feuchtkugeltemperatur der Abluft liegt. Das Rückführen und zusätzliche Befeuchten der vorgekühlten Außenluft als Prozessluft im zweiten Schritt, ermöglicht dann ein Kühlen der Außenluft unterhalb der Abluftfeuchtkugeltemperatur. Bei konventionellen Sys-

temen ist das die theoretisch tiefstmögliche Temperatur, die erreicht werden kann.

Mit dem beschriebenen System lässt sich die Außenlufttemperatur unter Spitzenlastbedingungen um ca. 16 K senken. Da ein Teil der Außenluft als Prozessluft befeuchtet, erneut durch den Plattenwärmeübertrager geführt und anschließend dem Fortluftstrom zugeführt wird, sind im Kühlbetrieb die Luftströme der Außen- bzw. Fortluft höher als die der Zu- bzw. Abluft. Es werden maximal bis zu 50 Prozent vom Nennvolumenstrom als stetig geregelter Prozessluftvolumenstrom verwendet, sodass die Sollzulufttemperatur gehalten werden kann. Bei der Dimensionierung des bauseitigen Kanalnetzes muss diese Betriebsweise berücksichtigt werden, denn der Außen- und Fortluftkanal muss entsprechend größer geplant werden.

Das System ermöglicht es, auf ein zusätzliches Kühlregister oder auf den Einsatz einer Kompressionskälteanlage zu verzichten. Damit einher geht die Vermeidung von Druckverlusten für das zuvor genannte Kühlregister oder den Verdampfer und

den Verflüssiger einer Kälteanlage. Zudem sind keine Wartungsarbeiten und Dichtungsprüfungen für die mechanische Kälteerzeugung erforderlich und bauseits ist weniger elektrische Anschlussleistung vorzuzulassen.

### Energie- und kostenoptimierter Betrieb durch Monitoring

Die vorgestellten Systeme der adiabaten Verdunstungskühlung werden seit Jahren weiterentwickelt und helfen deutlich bei der Einsparung oder gar bei der Vermeidung mechanisch erzeugter Kälteenergie. Die Regelung von raumlufttechnischen Anlagen, speziell mit adiabater Verdunstungskühlung, hat einen entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch und die Lebenszykluskosten. In den seltensten Fällen werden RLT-Anlagen mit konstanten Auslegungslastbedingungen betrieben. Oft wird nur für wenige Stunden im Jahr die Auslegungsleistung benötigt, sodass Lüftungsanlagen über einen großen Zeitraum hinweg im Teillastbereich betrieben werden. Ein energie- und kostenoptimierter Betrieb in genau diesem Teillastbereich ist nur mit einer genau abgestimmten Regelung zu erzielen.

Energiemonitoring-Systeme ermöglichen die Kontrolle und Aufzeichnung energieverbrauchsrelevanter Daten von RLT-Anlagen, beispielsweise das Energiemonitoring-System vicomo von Menega. Dieses System leistet einen entscheidenden Beitrag zum Gebäudeenergiemanagement. Seit dem 1. Januar 2013 ist ein zertifiziertes Energiemanagement die Voraussetzung für die Inanspruchnahme steuerlicher Entlastungen nach § 55 des Energie- und § 10 des Strom-Steuergesetzes. Mit einem Monitoringtool werden wichtige Parameter einer RLT-Anlage in Echtzeit erfasst und über ein Gateway oder eine GSM-Verbindung in einer Online-



Abbildung 7: RLT-Anlage mit Taupunktkühlung und Nacherhitzer



datenbank gespeichert. Zur schnellen und einfachen Übersicht können Templates definiert und Überwachungszyklen (stündlich, täglich, monatlich, jährlich) oder Zeiträume festgelegt werden.

Aber nicht nur Betriebszustände werden erfasst: Per Fernzugriff können Parameter der Anlage geändert werden, um einen optimalen Betrieb zu gewährleisten. Ferner können Alarmsignale direkt zu den verantwortlichen Stellen wie Haustechnik oder technischer Service übermittelt werden, beispielsweise bei Überschreitung der maximalen Filterdruckverluste. Durch diese Informationsbereitstellung in Echtzeit kann eine Störung schnell beseitigt werden. Erhöhter Energieverbrauch und unwirtschaftlicher Betrieb von RLT-Anlagen werden auf diese Weise vermieden.

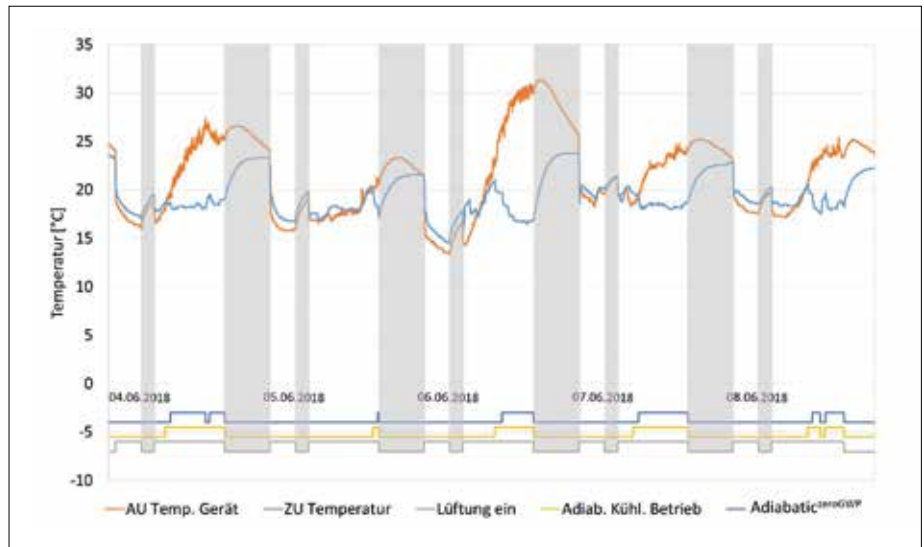
**Ein Beispiel aus der Praxis**

Im folgenden Abschnitt werden Betriebsdaten einer Lüftungsanlage vorgestellt. Mit Hilfe des Energiemonitoring-Systems können Daten oder Störmeldungen in Echtzeit bzw. über einen frei wählbaren Zeitraum betrachtet und ausgewertet werden. Die Anlage hat ein Adiabatsystem mit Taupunktkühlung zur Kühlung der Außenluft im Sommer und einen Nacherhitzer für die Wintermonate (Abbildung 7).

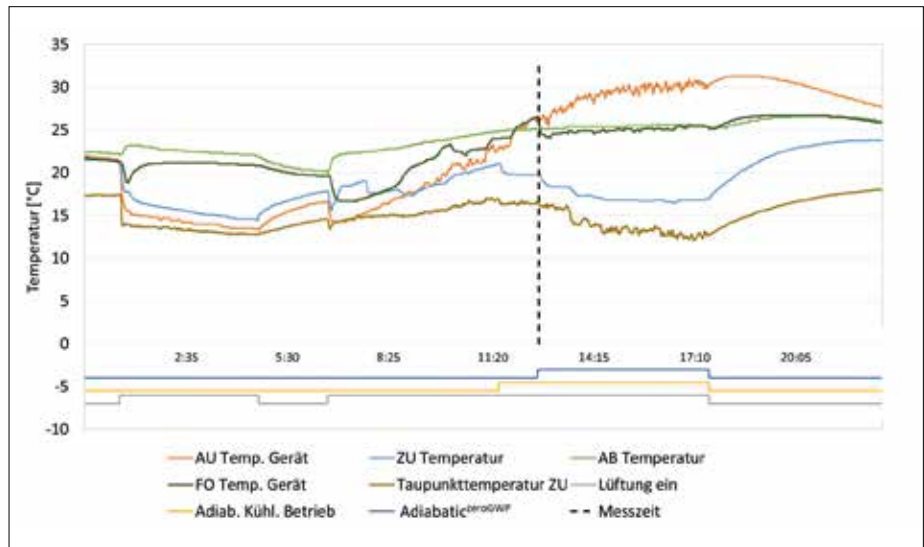
Zur Regelung der Anlage ist eine Vielzahl von Temperatur- und Drucksensoren installiert. Diese liefern die Daten zur Auswertung sowie grafische Darstellungen (Grafik 1).

Der nächtliche Betrieb der Anlage mit kurzen Pausen in den Morgenstunden zeigt den Betrieb der Nachtkühlfunktion. Die vergleichsweise niedrige Außenlufttemperatur in den Nachtstunden wird genutzt, um das Gebäude zu kühlen. In diesem Betriebsmodus werden die Ventilatoren auf niedriger Stufe betrieben, kühle Luft ins Gebäude gefördert und das Aufheizen der gesamten Gebäudesubstanz über einen langen Zeitraum verhindert.

Zur detailgetreuen Leistungsanalyse des Adiabatsystems wird jetzt nur der wärmste Tag im genannten Zeitraum betrachtet (Grafik 2). Es ist deutlich zu erkennen, wann die unterschiedlichen Modi der Adiabatik geschaltet werden.



Grafik 1: Daten der Temperatur und Drucksensoren



Grafik 2: Daten des wärmsten Tages

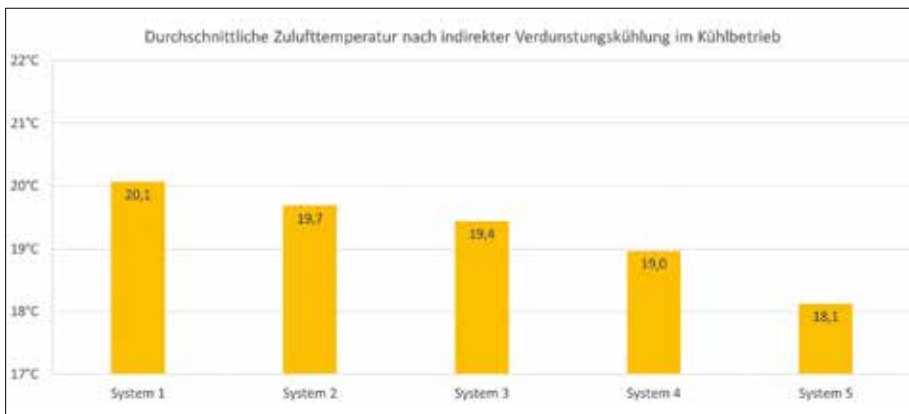
Bis ca. 11:30 Uhr ist gar keine Adiabatik erforderlich. Die hocheffiziente Wärmerückgewinnung reicht aus, um den Kühlbedarf zu decken. Steigt die Zulufttemperatur, wird in der ersten Sequenz die normale Adiabatik zugeschaltet, um den erhöhten Kühlbedarf abzudecken. Bei weiter steigender Kühlanforderung wird dann die Taupunktkühlung zugeschaltet - hier um 13:00 Uhr. Im Verlauf ist zu erkennen, dass unmittelbar nach dem

Schalten einer Adiabatikstufe die Zulufttemperatur weiter gesenkt werden kann.

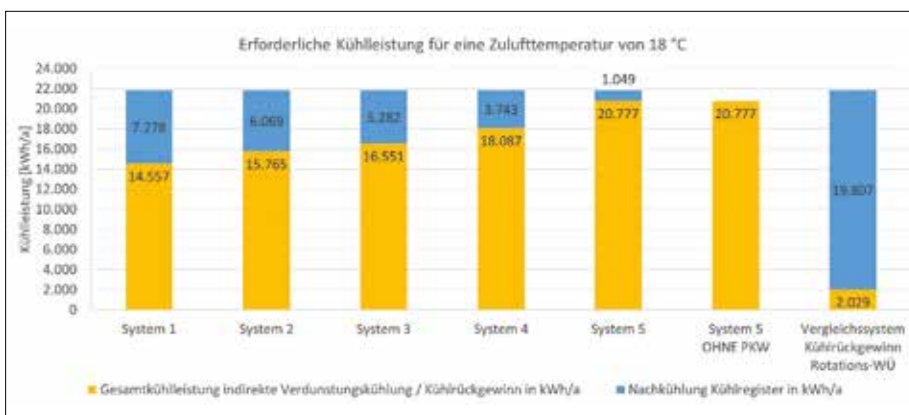
Bei der Tageshöchsttemperatur von über 30 °C konnte eine Temperaturdifferenz von über 14 K erzielt werden, bezogen auf die Zuluft. Das entspricht einer Zulufttemperatur von unter 17 °C (Tabelle 2). Die Taupunktkühlung der Zuluft ermöglicht es, Temperaturen unterhalb der Abluftfeuchtkugelttemperatur zu erzielen, die bei herkömmlichen

Tabelle 2

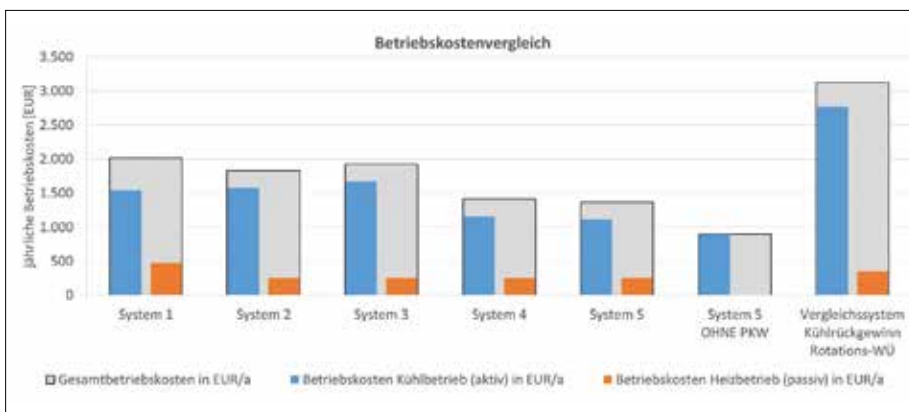
Außenluft		Zuluft		Abluft			Fortluft	
Temp.	Vol.-Str.	Temp.	Feuchte	Temp.	Feuchtk.	Feuchte	Temp.	Vol.-Str.
°C	m³/h	°C	%	°C	°C	%	°C	m³/h
30,9	6.152	16,8	72,2	25,6	18,6	51,6	25,4	6.145



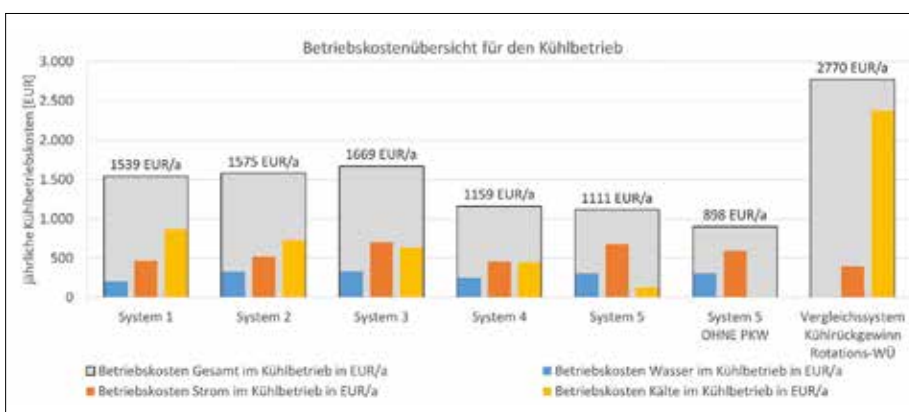
Grafik 3: Durchschnittlich Zulufttemperatur nach indirekter Verdunstungskühlung im Kühlbetrieb



Grafik 4: Erforderliche Kühlleistung für eine Zulufttemperatur von 18 °C



Grafik 5: Betriebskostenvergleich



Grafik 6: Betriebskostenübersicht für den Kühlbetrieb

Systemen mit adiabater Abluftbefeuchtung die physikalische Grenze ist. Vereinfacht gerechnet, kann im dargestellten Messpunkt eine Kälteleistung von ca. 30 kW mit der Adiabatik bereitgestellt werden.

Um die Wirtschaftlichkeit der Anlage zu bewerten, ist die Analyse eines kurzen Betrachtungszeitraums nicht ausreichend. Ein realistischer Vergleich der zu erwartenden Betriebskosten kann nur durch eine ganzheitliche Betrachtung der Betriebszustände erreicht werden – auch im Teillastbetrieb. Außerdem muss der zusätzliche Energieverbrauch berücksichtigt werden, der entsteht, wenn das adiabate Kühlsystem nicht aktiv ist. Die Grundlage für die Berechnungen bilden dabei die Klimadaten für den Standort Mannheim gemäß DIN 4710:2011. Hier sollen die Anlagen an sechs Wochentagen für jeweils 14 h eingesetzt werden. Das entspricht 4.380 Betriebsstunden pro Jahr. Bei einem Luftvolumenstrom von 10.000 m<sup>3</sup>/h liegt die geforderte Zulufttemperatur im Kühlbetrieb bei 18 °C. Die Ablufttemperatur wurde auf 26 °C festgelegt. Die aktive Kühlung beginnt ab einer Außenlufttemperatur von 20 °C und ist damit an 961 h im Jahr in Betrieb. In der verbleibenden Zeit wird entweder die freie Kühlung genutzt oder die Anlage befindet sich im Heizbetrieb mit Wärmerückgewinnung.

Die Analyse der durchschnittlich erreichten Zulufttemperaturen – die nur mit der adiabaten Verdunstungskühlung erzielt werden – zeigt, dass unter Zuhilfenahme der Taupunktkühlung (System 5) die geforderte Zulufttemperatur ganzjährig fast erreicht werden kann. Im Vergleich zu technisch „einfachen“ Systemen ist das ein Unterschied von 2 K. Dieser vergleichsweise geringe Unterschied hat jedoch einen erheblichen Einfluss auf den elektrischen Energieeinsatz und die damit verbundenen Stromkosten des Lüftungssystems bestehend aus Lüftungsanlage und Kälteerzeugung.

Der Unterschied wird deutlich, wenn eine herkömmliche Lüftungsanlage mit Rotationswärmeübertrager, der die gesetzlichen Mindestanforderungen erfüllt, mit einer Lüftungsanlage mit adiabater Verdunstungskühlung verglichen wird. Lediglich ein Zehntel der erforderlichen Kühlenergie kann mit dem Rotationswärmeübertrager bereitgestellt werden. Für den Rest muss eine mechanische Kälteerzeugung eingesetzt werden. Wird dem Rotationswärmeübertrager eine adiabate Befeuchtung auf der Abluftseite vorgeschaltet (System 1), können zwei Drittel der gesamten erforderlichen Kühlenergie regenerativ bereitgestellt werden. Adiabate Hochleistungssysteme mit Taupunkt-





kühlung (System 5) können über 95 Prozent der erforderlichen Kälteleistung bereitstellen. Unter diesen Gesichtspunkten stellt sich die Frage, ob der Einsatz eines Nachkühlers (PKW) sinnvoll ist, da dieser zusätzliche Druckverluste erzeugt, die vom Ventilator ganzjährig überwunden werden müssen. Hinzu kommt der Mehraufwand durch die erforderliche bauseitige Verrohrung des Nachkühlers bei der Geräteinstallation. Diese Mehraufwände wären durch kleine Zugeständnisse beim Komfort vermeidbar.

Für die Kostenrechnung einzelner Betriebsmittelverbräuche wurden die folgenden spezifischen Kosten berücksichtigt:

- Elektrischer Strom [Euro/kWh]:	1,65,
- Frischwasser [Euro/m <sup>3</sup> ]:	2,36,
- Abwasser [Euro/m <sup>3</sup> ]:	0,20,
- Kälteenergie [Euro/kWh]:	0,12.

Durch den Einsatz adiabater Abluftbefeuchtungssysteme (System 1 bis System 5) können die Betriebskosten signifikant gesenkt werden. Die Einsparungen liegen zwischen 35 und 70 Prozent – bezogen auf ein herkömmliches Lüftungssystem. Auch der Vergleich zwischen Lüftungsanlagen mit adiabater Verdunstungskühlung liefert Betriebskostenunterschiede von bis zu 55 Prozent.

Verdeutlichen lässt sich das am Beispiel eines Rotationswärmeübertragers, denn nicht der Wasserverbrauch, sondern erhöhte Druckverluste durch Komponenten der Adiabatik machen den Unterschied. Resultat sind ein höherer Energieeinsatz für Ventilatoren

und eine gegebenenfalls erforderliche Kälteanlage. Der Druckverlust eines solchen Rotationswärmeübertragers ist geringer als der eines Rekuperators, jedoch macht der vorgeschaltete Wabenbefeuchter mit seinen Druckverlusten diesen Vorteil wieder zunichte.

Bei den KV-Systemen sieht es ähnlich aus: Um hier den gesetzlichen Mindestanforderungen gerecht zu werden, müssen Wärmeübertrager mit großer wärmeübertragender Fläche eingesetzt werden. Das steigert die Effizienz der Adiabatik, geht aber auch mit einer Druckverluststeigerung in nicht zu vernachlässigendem Maße einher. Der Vergleich zeigt die höchsten Stromverbrauchs-kosten für das KV-System, denn nicht nur für die erhöhte Ventilatorleistung, sondern auch für die erforderlichen Pumpen des Systems muss elektrische Energie eingesetzt werden.

Auch Systeme mit Taupunktkühlung weisen einen etwas erhöhten Stromverbrauch auf. Dieser resultiert jedoch nicht aus erhöhten Druckverlusten, sondern die Zuluftrezirkulation durch den Rekuperator und der damit verbundene erhöhte Außenluft-Fortluftstrom lassen die Leistungsaufnahme der Ventilatoren steigen. Der wesentliche Vorteil ist, dass die Mehrleistung nicht ganzjährig bereitgestellt werden muss. Bei Spitzenlasten mit hohen Außentemperaturen müssen die Ventilatoren den erhöhten Luftstrom für wenige Stunden im Jahr fördern. Im normalen Adiabatik- oder im Teillastbetrieb fällt keine Mehrleistung an.

## Fazit

Insgesamt ist das Einsparpotenzial lüftungstechnischer Anlagen mit adiabater Verdunstungskühlung überzeugend. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass Leistungsdaten und Einsparpotenziale solcher Anlagen standortabhängig sind. In warmen Regionen mit hohem Verdunstungspotenzial kann in der Regel weitaus mehr Kälteleistung eingespart werden. Der eigentliche wirtschaftliche Vorteil der adiabaten Verdunstungskühlung liegt jedoch darin, dass eine zusätzliche Kälteerzeugung deutlich kleiner dimensioniert oder gänzlich eingespart werden kann. Das wirkt sich positiv auf Investitionskosten und bauliche Gegebenheiten aus, beispielsweise auf Anlagenplatzbedarf, Bereitstellung elektrischer Anschlussleistung und Lebenszykluskosten.

Die Umwelt profitiert ebenfalls, denn kleiner dimensionierte Kälteanlagen enthalten geringere Mengen an Kältemitteln, die einen hohen GWP (in der Regel >1.000) aufweisen. Global Warming Potential (GWP, auch als Treibhauspotenzial bezeichnet) beschreibt den Beitrag eines Stoffes zum Treibhauseffekt – umgerechnet auf die Klimaschädlichkeit von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Je niedriger der Wert ist, umso geringer ist die Wirkung auf die Erderwärmung. Durch den Einsatz von adiabatischen Hochleistungssystemen kann die Gebäudekühlung zuverlässig und klimaneutral mit einem GWP von null realisiert werden. ◀

# BTGA-Lieferantenverzeichnis

Optimiert für PC, Tablet und Smartphone



[www.btga-lieferantenverzeichnis.de](http://www.btga-lieferantenverzeichnis.de)