

Sorptionsgestützte Klimatisierung

Dr.-Ing. Jürgen Röben, MENERGA® Apparatebau GmbH, Mülheim an der Ruhr

In der heutigen Zeit rückt das Abführen von Wärmelasten, bedingt durch vermehrten Einsatz von elektrischen Geräten und hohen solaren Lasten durch große Fensterflächen, aus den Gebäuden immer mehr in den Mittelpunkt. Für das Wohlbefinden des Menschen sind in der DIN 1946 Teil 2 [1] unter anderem Richtwerte für die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit festgelegt. Aus diesen Vorgaben läßt sich das Behaglichkeitsfeld in ein h,x-Diagramm einzeichnen. In dem Bild 1 sind neben dem Behaglichkeitsfeld außerdem ca. 95% aller am Standort Essen auftretenden Außenluftzustände eingetragen.

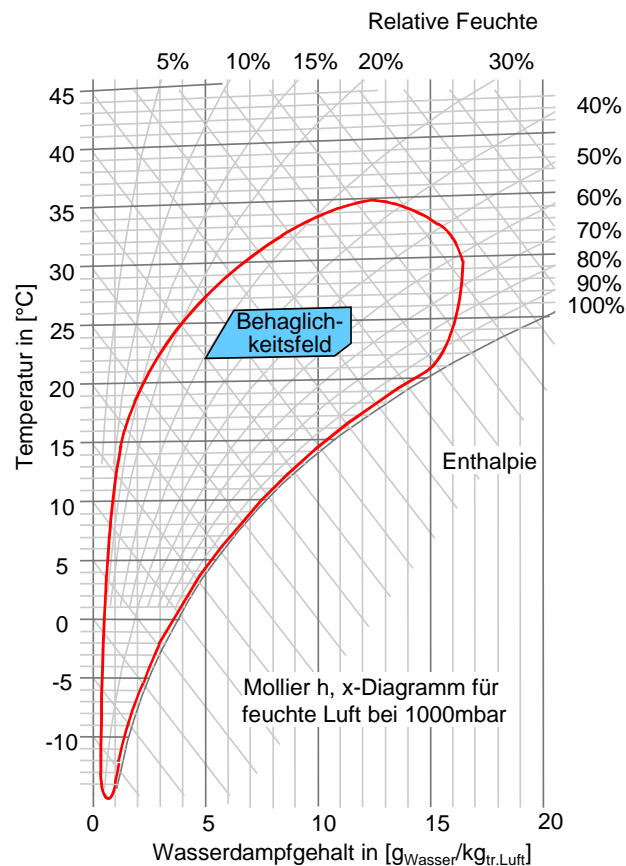


Bild 1: Darstellung von ca. 95% aller am Standort Essen auftretenden Außenluftzustände

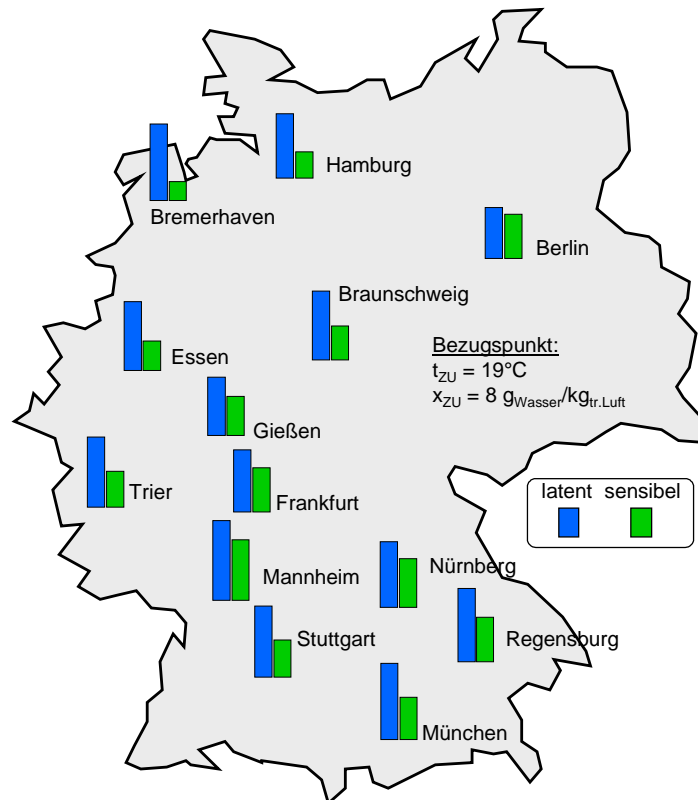
Für die Lüfterneuerung im Sommer muß mit Hilfe einer RLT-Anlage warme, feuchtebelastete Außenluft abgekühlt und entfeuchtet werden. Die Abkühlung der Außenluft erfolgt in der Regel bei konventionellen Klimaanlage durch herkömmliche Kaltdampf-Kältemaschinen, während die Entfeuchtung meistens über Oberflächenkühler erfolgt.

Im Bild 2 ist das Verhältnis von latenter und sensibler Kühllast der Außenluft im Sommer für ausgewählte Orte der Bundesrepublik Deutschland dargestellt. Man erkennt, daß der latente Kühllastanteil in allen Orten höher als der sensible ist. Für Essen ergibt sich ein latenter Anteil von 1,61 kWh/((m³/h)a) und ein sensibler Anteil von nur 0,69 kWh/((m³/h)a). Die im Bild 4 dargestellten Kühllasten der Außenluft lassen sich mit Hilfe der meteorologischen Daten aus der DIN 4710 [2] und folgenden Gleichungen berechnen:

$$q_{lat} = (\bar{x}_{AU} - x_{ZU}) \cdot r_0 \cdot \rho_L \cdot Z_x \quad (1)$$

$$q_{sen} = (\bar{t}_{AU} - t_{ZU}) \cdot c_{pL} \cdot \rho_L \cdot Z_t \quad (2)$$

Die mit den Gleichungen (1) und (2) berechneten Kühllasten gelten für eine maximale Zulufttemperatur von 19°C und eine Zuluftfeuchte von $8 \text{ g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{tr.Luft}}$. Es wurde dabei auf die Daten aus der DIN 4710 für einen Betrachtungszeitraum von 7.00 bis 18.00 Uhr zurückgegriffen.



Vergleiche DIN 4710 [2], Daten der Messung von 7.00 bis 18.00 Uhr

Bild 2: Sensible und latente Kühllasten für ausgewählte Orte der Bundesrepublik Deutschland

Im Sommer wird somit der Energieaufwand einer Klimaanlage hauptsächlich durch die Entfeuchtung der Außenluft bestimmt. Aus diesem Grund ist es notwendig, nach alternativen Verfahren zur Luftbehandlung zu suchen. Die Trennung von Kühlen und Entfeuchten der Außenluft ist aus energetischen Gesichtspunkten von größter Wichtigkeit.

Verfahren zur Luftentfeuchtung

Bei der Komfortklimatisierung ist man unter normalen Umständen bestrebt, eine Zuluftfeuchte von $8 \text{ g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{tr.Luft}}$ einzustellen. Bei einem Auslegungszustand im Sommer von 32°C und $12 \text{ g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{tr.Luft}}$ ergibt sich eine Entfeuchtungsbreite von $4 \text{ g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{tr.Luft}}$. Es ist aber durchaus möglich, daß an warmen, schwülen Tagen höhere Außenluftfeuchten vorliegen und somit größere Entfeuchtungsbreiten erforderlich sind. Die in der Klimatechnik gebräuchlichen Verfahren zur Luftentfeuchtung werden nachfolgend kurz beschrieben.

Die Entfeuchtung im Oberflächenkühler ist dabei das am häufigsten verwendete Verfahren. Hierbei sind Oberflächentemperaturen unterhalb des Taupunktes der zu entfeuchtenden Luft erforderlich, die entweder durch verdampfendes Kältemittel (Direktverdampfer) oder durch Kaltwasser (Kaltwasserkühler) erreicht werden.

Die Bereitstellung des Kaltwassers durch das Kälteaggregat (Kompressions- oder Absorptions-Kältemaschine) erfolgt in der Regel mit Vorlauftemperaturen von ca. 4 bis 8°C (gebräuchliche Angabe: 6°C Vorlauf/ 12°C Rücklauf) [3].

Bei der Entfeuchtung durch den Kontakt mit hygroskopischen Stoffen unterscheidet man die Verfahren unter anderem nach der Art der verwendeten Materialien:

- feste, hygroskopische Materialien und
- flüssige, hygroskopische Materialien.

Es gibt eine Vielzahl von festen Stoffen, die zur Trocknung von Luft eingesetzt werden können. Aktivkohle, Aktivtonerde, Kieselgel (Silikagel), Molekularsieb (Zeolith) sowie hygroskopische Salze, um nur einige zu nennen, finden Anwendung in der technischen Trocknung.

Triäthylen-Glykol fand, als eines der ersten flüssigen Stoffe, Anwendung bei der Luftentfeuchtung. Aufgrund des hohen Dampfdruckes dieses Materials ist allerdings der Einsatz in offenen Systemen ungeeignet, da mit hohen Arbeitsmittelverlusten und Umweltbelastungen zu rechnen ist. Dagegen haben sich Entfeuchtungssysteme die mit LiBr-, LiCl- und $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ -Lösungen arbeiten, in der Praxis teilweise durchgesetzt oder werden derzeit in aussichtsreichen Forschungsprojekten untersucht.

Da die Ab- bzw. Adsorption in erster Linie zur Entfeuchtung dient, wird neben den klassischen Kühlverfahren auch der Einsatz der direkten bzw. indirekten Verdunstungskühlung möglich.

Sorptionsmechanismen

Unter dem Begriff Sorption versteht man die Aufnahme von Gasen und Dämpfen durch feste oder flüssige Stoffe. Man unterteilt sie grundsätzlich in die Ad- und Absorption (siehe Bild 3). Während der Begriff der Adsorption nur in Verbindung mit einem festen Sorptionsmittel zu sehen ist, kann eine Absorption sowohl mit festen als auch mit flüssigen Stoffen erfolgen. In der Regel wird das Sorptionsmittel als Sorbens und das Sorbierte als Sorptiv bezeichnet.

Sorption: Bindung von Molekülen aus der Gasphase an einer festen oder flüssigen Phasengrenze.

Adsorption: Es findet eine Anreicherung von Molekülen eines Stoffes an einer Oberfläche statt. Sorbens und Sorptiv bilden keine homogene Phase.

Absorption: Sorptiv durchdringt vollkommen die Flüssigkeit oder den festen Körper. Sorbens und Sorptiv gehen in eine homogene Mischphase über.

Desorption: Regeneration des Sorbens. Austreiben des gebundenen Sorptivs, bei dem die umgekehrten Vorgänge wie bei der Sorption ablaufen.

Es sei allerdings noch angemerkt, daß eine Adsorption oder eine Absorption nur in Verbindung mit der Desorption, nämlich der Regeneration des Sorptionsmittels, zu sehen ist. Während bei der Ad- und Absorption die freiwerdende Bindungs- und Kondensationswärme abgegeben wird, muß bei der Desorption thermische Energie zugeführt werden, um das Sorptiv auszutreiben [4].

Die Desorption kann mit Niedertemperaturwärme erfolgen, so daß die Anwendung von z.B. Solarenergie oder Fernwärme für die sorptive Luftentfeuchtung interessant wird.

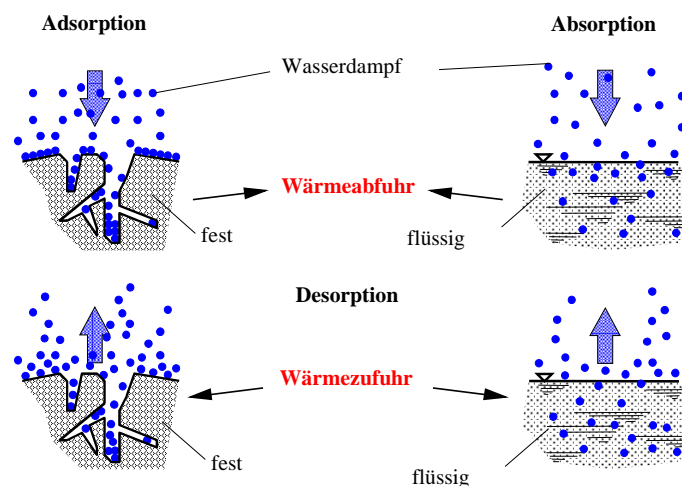


Bild 3: Sorptionsmechanismen

Bei der Bindung von Flüssigkeit an einem festen oder flüssigen Stoff spricht man also von Sorption. Materialien bei denen eine solche Bindung vorliegt, bezeichnet man als hygroskopisch und diese nehmen solange Feuchtigkeit auf, bis es zum Gleichgewichtszustand kommt. Das heißt, der Wasserdampfdruck der Luft unmittelbar über dem Sorbens ist gleich dem Sättigungsdampfdruck.

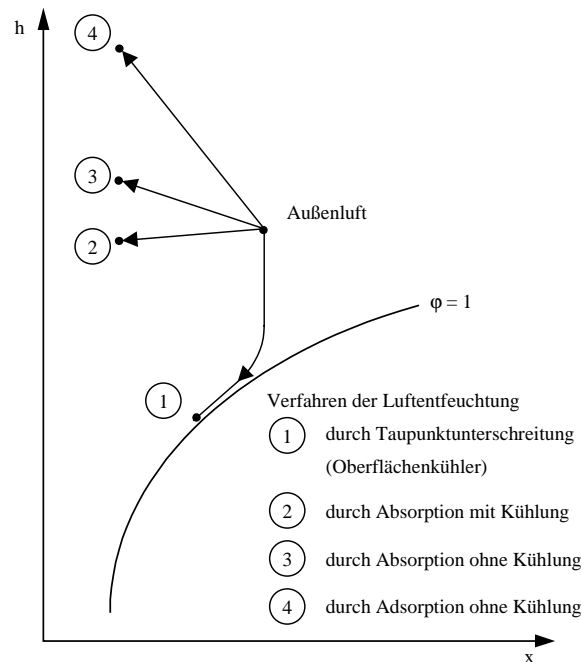


Bild 4: Zustandsänderungen der Luft bei der Entfeuchtung

Bild 4 zeigt den Verlauf der Zustandsänderungen der Luft bei der Entfeuchtung mit flüssigen und festen Sorptionsmaterialien. Der Verlauf gemäß (1) zeigt die Zustandsänderung der Luft bei Taupunktunterschreitung mittels Oberflächenkühler. Da bei der sorptiven Luftentfeuchtung Kondensations- und Bindungswärme frei wird, ist es unvermeidbar, daß sich die Luft in einem offenen Absorber ohne gleichzeitige Kühlung erwärmen wird. Der Verlauf (3) und (4) beschreibt den Entfeuchtungsvorgang bei der Ab- und Adsorption ohne gleichzeitige Kühlung. Im Gegensatz zu den festen Sorptionsmaterialien erlaubt eine Entfeuchtung mit flüssigen eine gleichzeitige direkte Kühlung des Prozesses, was der Verlauf (2) widerspiegelt.

Anforderungen an die Absorptionsmittel

Grundsätzlich sollten die verwendeten hygroskopischen Materialien ungiftig und umweltverträglich sein, da sie in offenen Systemen bei Umgebungsdruck eingesetzt werden. Weiterhin dürfen, außer Wasser, keine flüchtigen Stoffe im Material enthalten sein.

Damit eine kontinuierliche Entfeuchtung gewährleistet werden kann und somit ein störungsfreier Betrieb der Klimaanlage gegeben ist, müssen die Sorptionsmittel Langzeitstabilität besitzen. Ein großer Vorteil bei der Entfeuchtung der Luft mit hygroskopischen Materialien ist die Möglichkeit, Niedertemperaturwärme zur Regeneration zu verwenden. Das setzt allerdings voraus, daß die notwendigen Desorptionstemperaturen für die Sorptionsmittel möglichst niedrig sind. Desweiteren dürfen die Kosten der Materialien nicht zu hoch sein, und eine Verfügbarkeit bei gleichbleibender Qualität muß gewährleistet sein [4].

Bauelemente in sorptionsgestützten Klimaanlage

Für die sorptionsgestützte Klimatisierung können eine Vielzahl von Komponenten eingesetzt werden. Mit Hilfe dieser Komponenten ergeben sich eine Reihe von möglichen Schaltungsvarianten einer Klimaanlage. Die Auswahl der Komponenten ist immer durch die gestellte Klimatisierungsaufgabe bestimmt. Die Klimatisierung durch sorptive Trocknung kann sowohl in Verbindung mit einer

Kältemaschine als auch durch Temperaturabsenkung mittels Verdunstungskühlung erfolgen. Letztere erfordert eine sensible Auswahl aller Bauelemente der Klimazentrale, da die Absenkung der Temperatur durch Verdunstung von Wasser thermodynamisch begrenzt ist.

Die Kombination aller erforderlichen Komponenten zu einem wirtschaftlichen und konstruktiv lösbaren Gesamtkonzept ist daher eine der wichtigsten Grundvoraussetzung. Im folgenden werden die wichtigsten Bauteile von sorptionsgestützten Klimaanlage vorgestellt.

Ventilatoren

Die richtigen Wahl der Ventilatoren trägt entscheidend für einen energetisch günstigen Betrieb der sorptionsgestützten Klimaanlage bei. Der Anteil der Ventilatoren am Gesamtenergiebedarf kann in einem System mit variablen Volumenströmen bis zu 45% [5] betragen. Aus diesem Grund ist die richtige Auslegung der Ventilatoren sowie eine geeignete Wahl der Größe von Klimazentrale und Luftkanälen zur Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit entscheidend, um einen kostengünstigen Betrieb gewährleisten zu können.

Die Zu- und Abluftventilatoren einer Klimaanlage müssen folgende Forderungen erfüllen:

- geringe Anschaffungskosten
- geringe Geräuscentwicklung
- geringer Platzbedarf
- günstiges Betriebsverhalten bei Teillast
- Regelbarkeit
- Aufbringung der maximalen Strömungsarbeit bei Vollast.

In der Klima- und Lüftungstechnik werden hauptsächlich Radial- und Axialventilatoren eingesetzt. Die spezifischen Vor- und Nachteile des jeweiligen Typs müssen je nach Einsatzgebiet abgewägt werden.

In modernen Klimazentralen findet man immer häufiger die sogenannten „freilaufenden Räder“ (Bild 5). Es handelt sich dabei um Ventilatorräder mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln, die einseitig auf der Welle des Antriebsmotors gelagert sind. Die zu fördernde Luft wird vom Laufrad über eine Anströmdüse angesaugt. Beim Direktantrieb ergibt sich bereits durch den fehlenden Keilriemenantrieb eine Wirkungsgradverbesserung, außerdem entfällt im Spezialfall die Filterstufe auf der Druckseite, so daß eine Reduktion des internen Druckverlustes im Zentralgerät gegeben ist. Darüber hinaus ist auch die besondere Servicefreundlichkeit dieses Ventilator-Systems hervorzuheben.



Bild 5: Modernes Ventilatorsystem (MENERGA)

Nach praktischen Erfahrungen verringert sich der Energieaufwand für die Luftförderung gegenüber der konventionellen Lösung mit doppelseitig saugendem Ventilator mit rückwärtsgekrümmten Laufradschaufeln um bis zu 30%.

Wasser/Luft - Wärmeübertrager

Trennwandwärmeübertrager oder Rekuperatoren sind die verbreitetste Form der Wärmeübertrager in Klimazentralen. Die Wärmeübertragung findet bei ihnen von einem warmen Fluid auf ein kaltes Fluid durch eine Wand hindurch statt. Die Auslegung eines Wärmeübertragers erfolgt anhand der gegebenen Leistungs- und Betriebsdaten. Hierbei versteht man unter Leistungsdaten den übertragenen Wärmestrom und die Austrittstemperaturen, während die Betriebsdaten die Eintrittstemperaturen und die Massenströme der Fluide beinhalten. Die Auslegung erfolgt in der Praxis vereinfacht mittels Leistungstabellen oder über Nomogramme, die von den Herstellern der Wärmeübertrager geliefert werden. Nach Festlegung der Größe des Wasser/Luft - Wärmeübertragers läßt über weitere Nomogramme direkt der Wasserwiderstand und der benötigte Volumenstrom des Kühl- oder Heizwassers ermitteln. Die Normung der Geräte als Baukastengeräte bringt allerdings mit sich, daß die Wärmeübertragerflächen häufig überdimensioniert sind.

Wasser/Luft - Wärmeübertrager werden meist als Rohrwärmeübertrager aus Kupfer mit aufgepressten Aluminiumlamellen ausgeführt. Durch die Rohre wird das Heiz- bzw. Kühlmedium gepumpt, welches über seitliche Anschlußstutzen zu- und abgeführt wird. Die Luft durchströmt den Wärmeübertrager und erwärmt bzw. kühlt sich an der durch die Lamellen vergrößerten Wärmeübertragerfläche ab.

Systeme zur Wärmerückgewinnung

Systeme zur Wärmerückgewinnung haben in Klimaanlage die Aufgabe dem Abluftvolumenstrom Wärme zu entziehen und auf den Zuluftvolumenstrom zu übertragen. Dadurch läßt sich im Winter eine Energieeinsparung erzielen und die Heizungsanlage kann in der Regel kleiner ausgelegt werden. Eine energetisch sinnvolle Wärmerückgewinnung ist nur dann gegeben, wenn die Wärmeeinsparung den energetischen Mehraufwand bei der Luftförderung überschreitet.

In der Klimatechnik unterscheidet man grundsätzlich drei Systeme der Wärmerückgewinnung [6]:

- Regenerative Verfahren
- Rekuperative Verfahren
- Wärmepumpen Verfahren

Neben der Wärmerückgewinnung im Winter kann mit Hilfe des Wärmeübertragers im Sommer, an Tagen an denen die Außenlufttemperatur über der Ablufttemperatur liegt, eine Vorkühlung der Außenluft durch die Abluft erreicht werden.

Durch den Einbau eines Befeuchters im Abluftkanal oder direkt im Abluftsektor eines rekuperativen Wärmeübertragers der Klimaanlage kann die Abluft auf ein niedrigeres Temperaturniveau gebracht werden. Eine derartige Betriebsweise wird als indirekte Verdunstungskühlung bezeichnet und ermöglicht einen zeitlich längeren Einsatz des Wärmeübertragers während der Kühlperiode. Bild 6 zeigt vereinfacht eine Möglichkeit der direkten Verdunstungskühlung in einem rekuperativen Wärmeübertrager.

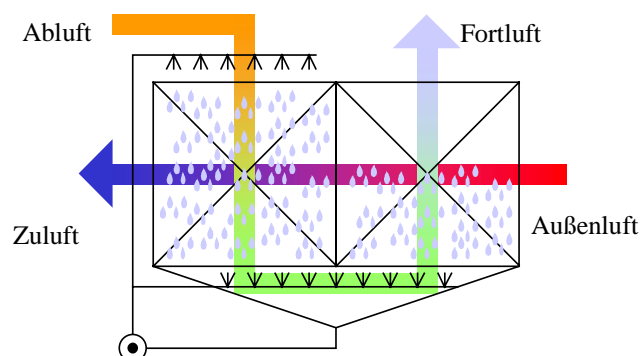


Bild 6: Direkte Verdunstungskühlung in einem rekuperativen Wärmeübertrager

Die Vielzahl der auf dem Markt befindlichen Wärmeübertrager und die dadurch unterschiedlichen Leistungsdaten und Spezifikationen machen es kaum möglich, den für ein Klimasystem idealen Wärmeübertrager auszuwählen. Die zusätzliche Option zum Einsatz des Wärmeübertragers in einem indirekten Verdunstungskühlsystem erschwert die Auswahl nochmals. Die Wirtschaftlichkeit verschiedener Systeme läßt sich nur für den Einzelfall, bei einer konkreten Klimatisierungsaufgabe, ermitteln. Die Auswahl eines Systems zur Wärmerückgewinnung ist abhängig von folgenden Punkten:

- dem Preis
- dem erforderlichen Gütegrad
- der Möglichkeit der Feuchteübertragung
- der Möglichkeit Luftmischung durch Umluft (Leckluft) im System zu akzeptieren
- dem Platzangebot
- der Konzeption: Neuanlage oder Nachrüstung
- der Wartungsfreundlichkeit
- der Option zum Einsatz des WRG in einem indirekten Verdunstungskühlsystem.

Zur Beurteilung der Güte eines Wärmeübertragers benötigt man die Rückwärmzahl Φ . Die Rückwärmzahl ist durch die bauliche Ausführung des Wärmeübertragers festgelegt und läßt sich in der Regel aus Diagrammen (Nomogramme) der Hersteller für die verschiedenen Betriebsbedingungen ablesen.

Bei den Verdunstungskühlsystemen ändert sich der Auslegungszustand der Wärmeübertrager vom Winter- zum Sommerbetrieb. Um mit indirekter Verdunstungskühlung ausreichend tiefe Untertemperaturen im Zuluftkanal erreichen zu können, sind hohe Rückwärmzahlen erforderlich. Die Auslegung erfolgt deshalb nicht ausschließlich nach wirtschaftlichen Aspekten. Die Einhaltung geforderter Leistungsdaten des eingebauten Wärmeübertragers ist eine Grundvoraussetzung für die Funktion der indirekten Verdunstungskühlung im Sommer.

Luftbefeuchter bzw. Verdunstungskühler

Befeuchter werden in sorptionsgestützten Klimaanlage eingesetzt, um einen Teil der Temperaturabsenkung der Außenluft im Sommer zu übernehmen. Für diese Aufgabe stehen der Klimatechnik verschiedene Arten der Befeuchter zur Verfügung:

- Luftwäscher
- berieselte Verdunstungselemente
- oder Zerstäuber.

Die Wahl des Befeuchtertyps ist abhängig von dem Einbauort, der Wirtschaftlichkeit sowie den Anforderungen an die Regelbarkeit und die Hygiene. Bei dem Einbau eines Luftbefeuchters in eine Klimaanlage sind alle der oben genannten Gerätetypen möglich. Aufgrund ihrer Arbeitsweise sind Umlauf oder Frischwassergeräte für den Einsatz als Verdunstungskühler besonders geeignet.

Bei der Luftbefeuchtung mit Wasser unterscheidet man grundsätzlich zwei Verfahren:

- Verdunsten des Wassers an einer Wasseroberfläche oder anderen befeuchteten Flächen
- Einsprühen beziehungsweise Zerstäuben von Wasser in den Luftstrom.

Mit den Sprüh- beziehungsweise Zerstäubungssystemen lassen sich höhere Befeuchtungsgrade als mit den Verdunstungssystemen erzielen. Die Zerstäubung des Wassers erfordert jedoch einen höheren Energieeinsatz zum Betreiben der Pumpen. Weiterhin sind diese Geräte meist aufwendiger und benötigen größere Einbaulängen als die Verdunstungssysteme.

Folgende Systeme werden in der Regel für die zur Verdunstungskühlung eingesetzt:

- Verdunstungssysteme
- Sprüh- und Zerstäubungssysteme

- Ultraschallbefeuchter
- Kaltdampfgeneratoren

Die nahezu vollständige Verdampfung erfordert jedoch den Einsatz von mineralfreiem Wasser (zum Beispiel: Ultraschallbefeuchter, Kaltdampfgeneratoren). Die Minerale müssen vor dem Eintritt in das Gerät abgeschieden werden, da sie nicht mehr über das Umlaufwasser abgeschlämmt werden. Der Verzicht von Entmineralisierungseinrichtungen würde zu einer schnellen Verkalkung der Geräte und so zu Betriebsstörungen führen. Zum Einsatz können vorgeschaltete Wasserreinigungsanlagen, wie UV-Entkeimung, Filter oder Osmoseanlagen und Wasser-demineralisierungseinrichtungen kommen.

Entfeuchter

Die sorptive Luftentfeuchtung wird durch direkten Kontakt der feuchten Luft mit den Trocknungsmitteln, den sogenannten Sorptionsmitteln, erreicht. Man spricht deshalb von offenen Sorptionstrocknern. Diese lassen sich anhand ihrer Funktionsweise in zwei Typen unterteilen. Man unterscheidet Adsorber, die mit festen hygroskopischen Materialien arbeiten, und Absorber, bei denen die Sorption mit hygroskopischen Lösungen erfolgt. Bei beiden Verfahren werden in der Sorptionstechnik kontinuierlich und diskontinuierlich arbeitende Trockner eingesetzt.

Entfeuchter mit festen Sorptionsmitteln

Bei den diskontinuierlichen oder periodisch arbeitenden Prozessen wird ein Behälter, der mit einem festen Sorptionsmaterial (zum Beispiel: Silikagel) gefüllt ist, von der zu trocknenden Luft durchströmt. Ist nur ein Entfeuchter (Adsorber) vorhanden, so müssen Sorption und Regeneration abwechselnd erfolgen. Die Kapazität des Entfeuchters muß dabei so groß gewählt werden, daß die Luft während der gesamten Arbeitszeit ausreichend entfeuchtet wird. Der Einbau eines zweiten Entfeuchters ermöglicht es, die Anlage im Dauerbetrieb zu fahren. Während der eine Entfeuchtungspaket die Luft trocknet, wird das andere regeneriert. Als problematisch erweist sich bei diesem System die anfallende Kondensations- und Bindungswärme, die zu einer Temperaturerhöhung im Trockner führt. Eine Verschlechterung der Entfeuchterleistung durch zu hohe Temperaturen kann durch Vorschaltung eines Luftkühlers vor dem Entfeuchter reduziert werden.

Die derzeitig häufigste Anwendung finden die mit hygroskopischen Materialien versehenen rotierenden Sorptionsregeneratoren. Ein solches Rad ist in Bild 7 dargestellt. Als Trägermaterial werden zum Beispiel Aluminium, keramische Stoffe oder auch Zellulose eingesetzt.

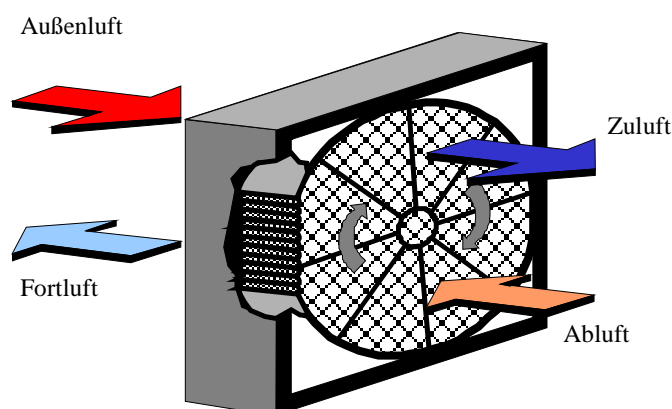


Bild 7: Mit hygroskopischem Material beschichteter Rotor

Dieses kontinuierlich arbeitende Verfahren der adsorptiven Entfeuchtung ist aufgebaut wie ein regenerativer Wärmeübertrager mit umlaufender Speichermasse. Durch eine Hälfte eines sich langsam drehenden Rotors strömt die zu trocknende Luft. Da die Speichermasse mit hygroskopischen Materialien beschichtet, beziehungsweise getränkt ist, gibt die Luft - aufgrund der vorliegenden

Wasserdampfpartialdruckdifferenz - Feuchtigkeit an das Trockenmittel ab. Infolge der Drehung des Rotors, wechselt das feuchtebeladene Adsorptionsmittel vom Trocknungssektor in den Regenerationssektor. Dort wird das aufgenommene Wasser mit Heißluft aus den Sorptionsmaterialien ausgetrieben. Zur Regeneration des feuchtebeladenen Sorptionsmittels sind Temperaturen von $> 60^{\circ}\text{C}$ erforderlich. Trocknungssektor und Regenerationssektor sind durch Dichtungen voneinander getrennt.

Da das Speichermaterial des Rotors während der Regeneration erwärmt wird, findet neben der Feuchteübertragung auch eine Wärmeübertragung statt. Die sogenannte Schleppwärme aus dem Regenerationssektor führt zu einer Aufheizung der Luft im Trocknungssektor um 7 bis 11 K je nach Regenerationstemperatur [7]. Die Zustandsänderung im Trockner verläuft daher nicht isenthalp, wie es bei der Adsorption annähernd der Fall ist. Da der Adsorptionsprozeß nicht direkt gekühlt werden kann, läuft der Trocknungsvorgang bei recht ungünstigen Temperaturen ab. Die mit einem Rotationsentfeuchter erreichbaren Entfeuchtungsleistungen sind dadurch begrenzt.

Entfeuchter mit flüssigen Sorptionsmitteln

Entfeuchter mit flüssigen Sorptionsmaterialien, die sogenannten Absorber, werden bis heute hauptsächlich zu industriellen Zwecken und in Krankenhäusern eingesetzt. In jüngster Zeit wird der Einsatz von flüssigen Systemen bei der Komfortklimatisierung in aussichtsreichen Forschungsvorhaben untersucht. In den USA wurden in der Vergangenheit zu dieser Thematik die verschiedensten Entfeuchter entwickelt. Man kann die Entfeuchter grob in Packungsentfeuchter und Plattenentfeuchter einteilen. Bild 8 zeigt vereinfacht deren Aufbau.

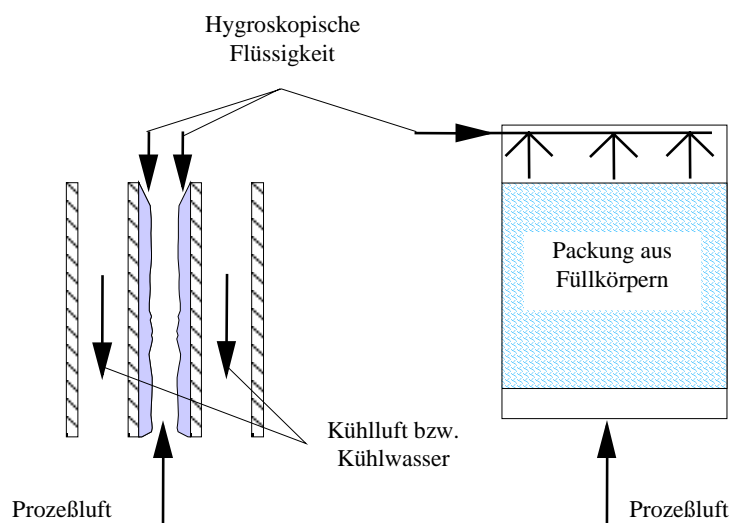


Bild 8: Entfeuchtungsapparate die mit flüssigen Sorptionsmitteln arbeiten

Die Zustandsänderung bei der absorptiven Trocknung verläuft annähernd isenthalp. Daher steigt die Lufttemperatur bei der Entfeuchtung an, wenn der Adsorptionsprozeß nicht gekühlt wird. Die Kühlung wird konstruktiv über Rohrwendel, Rohrbündel oder parallele Platten realisiert, wobei auf der einen Seite das Kühlmedium fließt.

Die Bereitstellung des Kühlmediums kann auf verschiedene Weise erfolgen. Dabei ist auch der Einsatz einer Kältemaschine zur Rückkühlung des Prozesses möglich. Bei Verbindung von sorptiver Luftentfeuchtung und mechanischer Kühlung kann die Kältemaschine bei höheren Verdampfungstemperaturen arbeiten, als bei der Entfeuchtung durch Taupunktunterschreitung. Dadurch ist es möglich höhere Leistungszahlen zu erreichen. Die Kühlung des Sorptionsprozesses kann auch durch Verdunstungskühlung, zum Beispiel in Verbindung mit einem Kühlturm erfolgen. Durch den Verzicht auf eine Kältemaschine stellt diese Variante die umweltfreundlichere Prozeßführung dar.

Das Sorptionsmittel läuft im Entfeuchter entlang der Oberfläche auf der Luftseite und tritt dort in direkten Kontakt mit der zu entfeuchtenden Luft. Das Sorptionsmittel kann über Düsen eingesprüht oder über ein Verteilsystem in den Reaktionsraum eingerieselt werden. Dabei gilt es immer das Sorptionsmittel so zu verteilen, daß eine möglichst große Oberfläche für den Stoffaustausch zur Verfügung steht. Aerosolbildung muß auf jeden Fall vermieden werden, da ein Mitreißen der hoch korrosiven Salzlösungen zur Schädigung nachgeschalteter Bauteile und Kanäle führen kann.

Der Aufbau von Regeneratoren für die Desorption eines flüssigen Trockenmittels kann prinzipiell wie der des Absorbers gestaltet werden. Dabei wird anstatt des Kühlmittels, Heißwasser durch den Absorber geführt. Die feuchtebeladene Flüssigkeit wird dadurch erwärmt und das Wasser wird ausgetrieben. Für die Regeneration des Sorptionsmittels sind Temperaturen von $> 50^{\circ}\text{C}$ erforderlich.

Die ökonomischen Vorteile der sorptiven Entfeuchtung können bei der Nutzung von Solarenergie zur Regeneration voll ausgeschöpft werden. Dazu müssen Solarkollektoren entwickelt werden, durch die das feuchtebeladene Sorptionsmittel laufen und direkt regeneriert werden kann.

Systeme der sorptionsgestützten Klimatisierung

Die Vielzahl der Komponenten, die zur Verdunstungskühlung in Verbindung mit sorptionsgestützter Luftentfeuchtung eingesetzt werden können, schaffen eine Reihe von Möglichkeiten, Verdunstungskühlsysteme innerhalb einer Klimaanlage zu konzipieren. Bei der Auswahl der Komponenten ist dabei immer die gestellte Klimatisierungsaufgabe zu berücksichtigen. Die Einbindung aller erforderlichen Komponenten zu einem wirtschaftlichen und konstruktiv lösbaren Gesamtkonzept ist daher eine wichtige Grundvoraussetzung.

Systeme mit festen Sorptionsmitteln

Ein typisches sorptionsgestütztes Klimatisierungssystem, auch häufig als "DEC"-System (Dessicative and Evaporative Cooling) bezeichnet, das mit festen Sorbentien arbeitet, besteht aus folgenden Hauptkomponenten: Entfeuchter, Luft/Luft - Wärmeübertrager, Verdunstungskühler, Lufterhitzer. Desweiteren werden gebräuchliche Komponenten eingesetzt, die in Lüftungs- und Klimaanlage zur Luftförderung und zur Regelung verwendet werden.

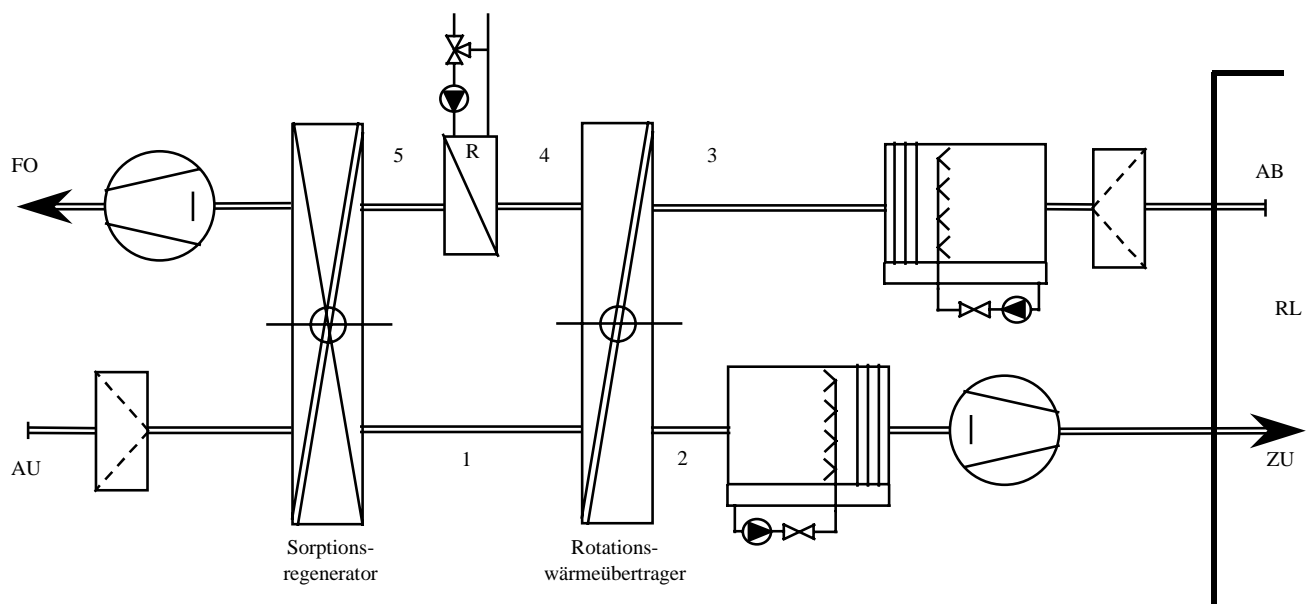


Bild 9: Vereinfachte Darstellung der sorptionsgestützten Klimatisierung

Eine vereinfachte Darstellung von dem Funktionsprinzip einer sorptionsgestützten Klimaanlage mit einem Sorptionsregenerator ist in Bild 9 dargestellt. Die gefilterte Außenluft wird zunächst in einem Sorptionsregenerator entfeuchtet (1), wobei durch die freiwerdende Kondensations- und

Bindungswärme die Luft dabei erwärmt wird. Die Luft wird dann durch einen Wärmeübertrager vorgekühlt (2), wobei die Wärme von der Zu- an die Abluft übertragen wird. Die weitere Kühlung der Luft auf das Zuluftniveau erfolgt in einem regelbaren Verdunstungskühler. Bei der Ermittlung der Zulufttemperatur ist in jedem Fall die Leistungsaufnahme des Zuluftventilators mit zu berücksichtigen.

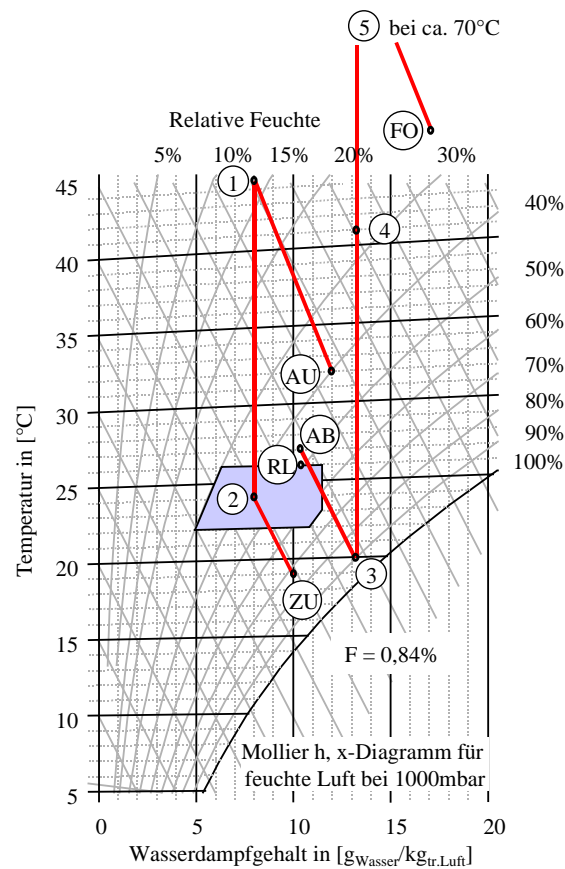


Bild 10: Zustandsänderung der Luft im Sommerbetrieb einer sorptionsgestützten Klimatisierung

Für den im Gegenstrom zur Zuluft geführten Regenerationsluftstrom wird in der Regel die Abluft verwendet. Die Abluft wird in einem zweiten Verdunstungskühler abgekühlt und befeuchtet (3). Sie durchströmt anschließend den Wärmeübertrager (4) und sorgt so für die bereits erwähnte Vorkühlung der Zuluft. Zur Regeneration des Sorptionsmaterials im Sorptionsregenerator wird die Luft in einem Erhitzer (5) auf die entsprechende Temperatur erwärmt. Nach Durchströmen des Sorptionsregenerators fördert der Fortluftventilator die Luft in die Umgebung.

Die Zustandsänderungen der Luft im Sommer des im Bild 9 dargestellten Prozesses sind im Bild 10 in einem h, x-Diagramm dargestellt.

Es sind zwar alle Komponenten für ein gut funktionierendes System verantwortlich, wobei allerdings der sorptive Entfeuchter einen großen Einfluß auf die Leistung und die Kosten des Gesamtsystems einnimmt.

Systeme mit flüssigen Sorptionsmitteln

Die im folgenden beschriebene sorptionsgestützte Klimazentrale ist im Bild 11 vereinfacht dargestellt. Die Anordnung der Ventilatoren ist so gewählt, daß im Sommer geringe Zulufttemperaturen mit Hilfe der Verdunstungskühler garantiert sind. Ist die Entfeuchtung der Außenluft nicht erforderlich, so kann die Trocknungseinheit umgangen werden. Dadurch verringert sich die Strömungsarbeit zu Luftförderung für die Zeiten, in denen die Außenluftfeuchte kleiner beziehungsweise gleich der Zuluftfeuchte ist. Das Kernstück der Trocknungseinheit bildet der Entfeuchter. Die Lufttrocknung wird mit im Kühlturm erzeugtem Kaltwasser auf einem niedrigem Temperaturniveau gehalten. Über einen

weiteren Anschluß wird die hygroskopische Salzlösung in den Entfeuchter geleitet und dort in Kontakt mit der Außenluft gebracht.

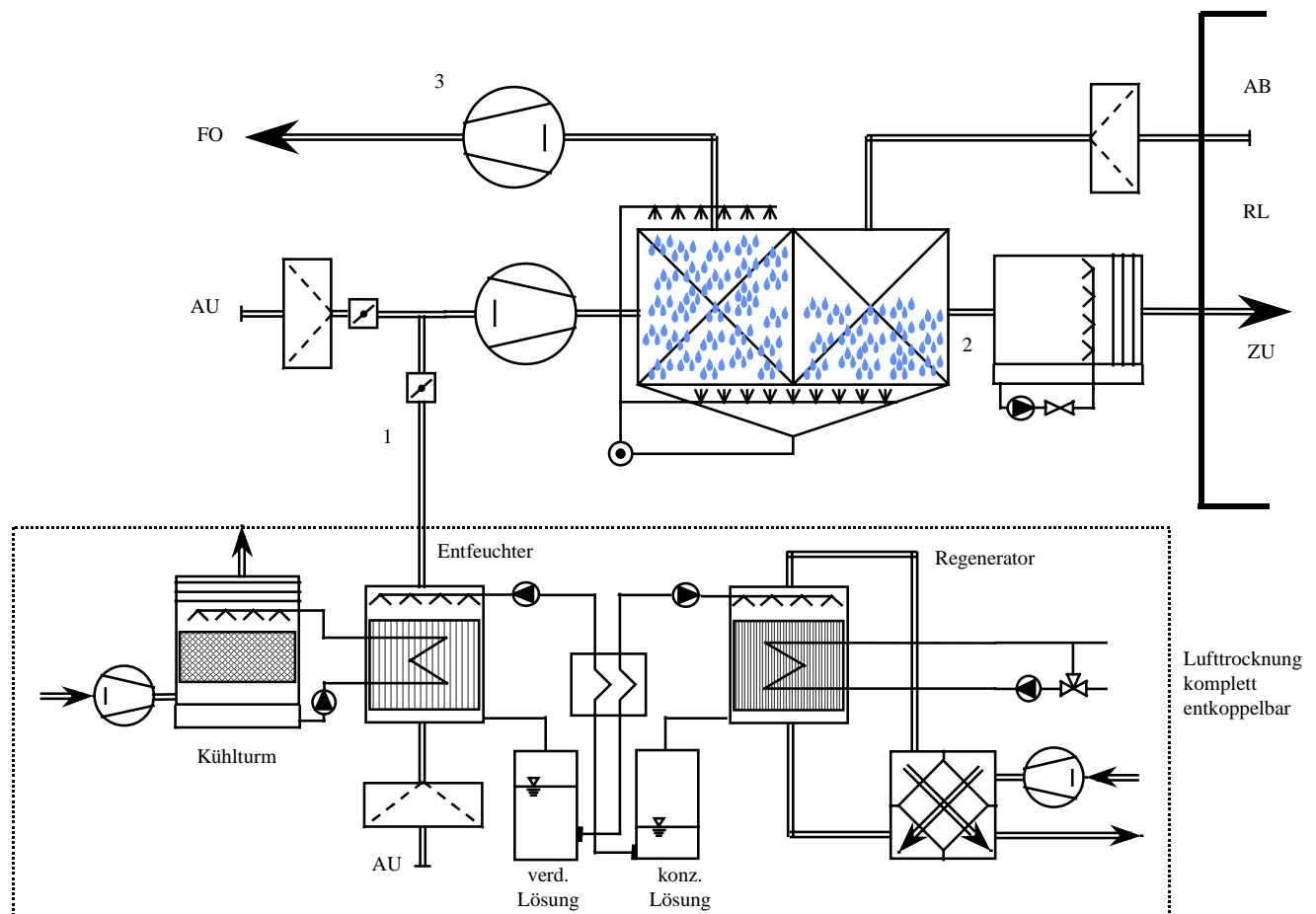


Bild 11: Absorptive Entfeuchtung und Verdunstungskühlung

Der Regenerationsprozeß findet in einem separaten Regenerator statt. Die hygroskopische Salzlösung kann bei Stillstand der Anlage und zur Vorratsspeicherung in Behältern gelagert werden. Bei ausreichend großer Bemessung können diese als Puffer dienen, so daß Absorption und Regeneration nicht zeitgleich stattfinden müssen.

Die Außenluft die zunächst im Entfeuchter getrocknet wurde (1), gelangt in einen rekuperativen Wärmeübertrager und wird dort vorgekühlt (2). Durch den Plattenwärmeübertrager ist es möglich die Luft im Abluftkanal zu übersättigen und somit das Potential der Verdunstungskühlung zu erhöhen. Der im Zuluftkanal installierte Befeuchter ist entsprechend der Anforderungen bei der Verdunstungskühlung stufenlos regelbar. Der Zuluftbefeuchter übernimmt die Befeuchtungsaufgabe bei trockenen Außenluftzuständen, sowie einen Teil der Kühlaufgabe im Sommer durch direkte Zuluftbefeuchtung. Der Abluftbefeuchter wird ausschließlich zur indirekten Verdunstungskühlung (3) eingesetzt. Die Zustandsänderungen der Luft sind im Bild 12 in einem h, x-Diagramm eingezeichnet.

Systeme zur Wärmerückgewinnung ohne vorgeschaltete oder integrierte Verdunstungskühler haben keinen großen Einfluß auf die Temperaturabsenkung der Außenluft. Da die Abluft im Sommer meist mit einer Temperatur über 25°C in den Wärmeübertrager geleitet wird, ist das Rückkühlpotential bei diesen Systemen nicht sehr groß. Um mit der unbehandelten Abluft einen Rückkühleffekt zu erreichen, sind Außentemperaturen über 27°C notwendig. Da diese Außenluftzustände in Deutschland jedoch selten sind, trägt der alleinige Einsatz eines Wärmerückgewinners nur wenig zur Temperaturabsenkung der Außenluft im Sommer bei.

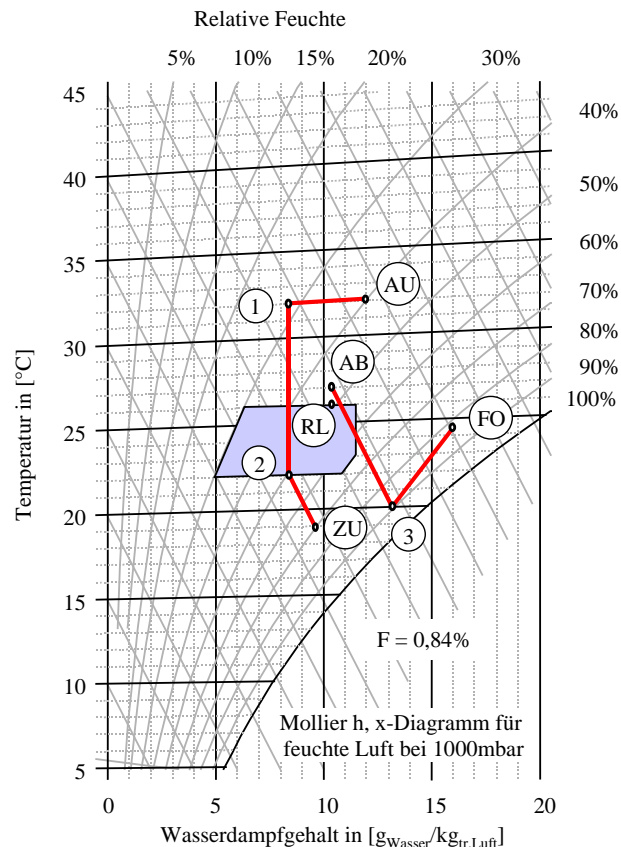


Bild 12: Darstellung der absorptiven Entfeuchtung und Verdunstungskühlung im h, x -Diagramm (Sommerbetrieb)

Zu dem Thema der sorptionsgestützten Klimatisierung ist am Institut für Angewandte Thermodynamik und Klimatechnik der Universität Gesamthochschule Essen ein umfangreiches Forschungsvorhaben durchgeführt worden. In einigen Teilen des Artikels befinden sich Informationen, die aus dem Abschlußbericht von F. Steimle, S. Biel und J. Röben [8] entnommen wurden.

Literaturhinweise

- [1] DIN 1946 Teil 2: Raumluftechnik; Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln). Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1994.
- [2] DIN 4710: Meteorologische Daten zur Berechnung des Energieverbrauchs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1982.
- [3] U. Franzke, Klimakühlung ohne Kälteanlage, in Luft- und Kältetechnik Nr. 3, 1992, Seite 103 – 105.
- [4] J. Röben, Sorptionsgestützte Klimatisierung mit verschiedenen wäßrigen Salzlösungen, Aachen: Shaker Verlag, 1998.
- [5] H. Steinacher, Theorie und Praxis der VVS-Anlagen, Karlsruhe: Verlag C.F. Müller, 1981, Seite 25.
- [6] VDI-2071 Blatt 2: Wärmerückgewinnung in Raumluftechnischen Anlagen, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 1983.
- [7] F. Reinmuth, Lufttechnische Prozesse, Karlsruhe: Verlag C.F. Müller, 1992, Seite 199.
- [8] F. Steimle, S. Biel, J. Röben, Sorptive Entfeuchtung und Temperaturabsenkung bei der Klimatisierung, BMBF-Abschlußbericht Band A bis F, 1998.

Bildverzeichnis

Bild 1: Darstellung von ca. 95% aller am Standort Essen auftretenden Außenluftzustände

Bild 2: Sensible und latente Kühllasten für ausgewählte Orte der Bundesrepublik Deutschland

Bild 3: Sorptionsmechanismen

Bild 4: Zustandsänderungen der Luft bei der Entfeuchtung

Bild 5: Modernes Ventilatorsystem (MENERGA)

Bild 6 Direkte Verdunstungskühlung in einem rekuperativen Wärmeübertrager

Bild 7: Mit hygroskopischem Material beschichteter Rotor

Bild 8: Entfeuchtungsapparate die mit flüssigen Sorptionsmitteln arbeiten

Bild 9: Vereinfachte Darstellung der sorptionsgestützten Klimatisierung

Bild 10: Zustandsänderung der Luft im Sommerbetrieb einer sorptionsgestützten Klimatisierung

Bild 11: Absorptive Entfeuchtung und Verdunstungskühlung

Bild 12: Darstellung der absorptiven Entfeuchtung und Verdunstungskühlung im h, x -Diagramm (Sommerbetrieb)