

Entwicklung einer 1 kW Flüssigsorptions-DCS-Prototypanlage

D. PIETRUSCHKA, U. EICKER, M. HUBER, J. SCHUMACHER

University of Applied Sciences, HfT Stuttgart
Schellingstraße 24, D-70174 Stuttgart, Germany,
dirk.pietruschka@hft-stuttgart.de,
Tel.: +49.711.8926.2674, Fax: +49.711.8926.2698

1. Einleitung

Der Einsatz von Kälteanlagen zur Klimatisierung von Wohn- und kleineren Bürogebäuden stellt insbesondere in den südlichen Klimaregionen aber auch in Deutschland einen stetig wachsenden Markt dar, der derzeit fast ausschließlich durch kleine elektrisch betriebene Kompressionskälteanlagen abgedeckt wird. Um dieses Marktsegment mit nachhaltigen Technologien versorgen zu können, ist die Entwicklung von kostengünstigen solar- oder abwärmebetriebenen Kälteanlagen im kleinen Leistungsbereich (<10 kW) erforderlich. Da moderne Niedrigenergie- und Passivgebäude in der Regel bereits mit einer Lüftungsanlage zur Reduktion der winterlichen Lüftungswärmeverluste ausgestattet werden, ist der Einsatz luftgeführter Systeme in Form von offenen sorptionsgestützten Kälteanlagen (DCS) im kleinen Leistungsbereich zur unterstützenden Kühlung solcher Gebäude nahe liegend. Sorptionsräder, Wärmetauscher und Befeuchter sind in der erforderlichen Baugröße für typische Wohnhauslüftungsgeräte mit einem Luftvolumenstrom von ca. 300 m³/h auf dem Markt bereits erhältlich. Darüber hinaus wurden bereits einige Systeme patentiert [1], die zur Luftentfeuchtung flüssige Absorbentien wie z.B. konzentrierte LiCl- oder CaCl₂-Lösungen einsetzen. Messergebnisse zum Betriebsverhalten solcher System liegen bislang jedoch nur in geringem Umfang vor [2]-[4].

Sowohl in konventionellen DCS Anlagen als auch in Flüssigsorptionssystemen wird in der Regel die Außenluft entfeuchtet, anschließend mit maximal befeuchteter Gebäudeabluft vorgekühlt und schließlich durch Befeuchtung in einer Befeuchtereinheit auf die gewünschte Zulufttemperatur abgekühlt. Die direkte Befeuchtung der Zuluft ist aus hygienischer Sicht insbesondere in unregelmäßig gewarteten Wohnhauslüftungsgeräten als kritisch einzustufen. Daher wurde an der Hochschule für Technik in Stuttgart eine Systemkonfiguration entwickelt, welche die gesamte Luftbehandlung mit Entfeuchtung, Vorkühlung und Befeuchtung auf die Abluftseite verlagert. Die als Zuluft angesaugte Außenluft wird in diesem Fall rein sensibel in einem Wärmetauscher durch die vorbehandelte Gebäudeabluft gekühlt. Der wesentliche Nachteil dieser Systemkonfiguration liegt im zusätzlichen Wärmetauscher, der zur Übertragung der auf der Abluftseite erzeugten Kälteleistung an die Gebäudezuluft erforderlich wird. Auf Grund der begrenzten Übertragungsleistung des Wärmetauschers wird die erreichbare Kälteleistung reduziert. Außerdem erhöht sich durch die zusätzlichen Druckverluste die erforderliche Ventilatorleistung. Um mit dieser Systemkonfiguration im Vergleich zu

Standardsystemen eine ähnlich hohe Kälteleistung zu erreichen, wird eine hocheffiziente Entfeuchtung der Abluft in Verbindung mit einer effektiven Abfuhr der freiwerdenden Sorptionsenthalpie (Verdampfungsenthalpie) erforderlich. Da das Partialdampfdruckgefälle zwischen der Prozessluft und dem Sorptionsmittel die treibende Kraft für den Wasserdampftransport von der Luft in die Ad-/Absorbenzien darstellt, sollte der Partialdampfdruck des Sorptionsmittels über den gesamten Absorptionsprozess einen möglichst niedrigen Wert aufweisen, um eine möglichst hohe Entfeuchtungsleistung zu erreichen. Der Partialdampfdruck der Sorptionsmittel, wie Silikagel oder konzentrierter Salzlösung nimmt mit steigender Temperatur deutlich zu. Für eine Steigerung der Sorptionsleistung ist es daher extrem wichtig, dass die im Sorptionsprozess frei werdende Sorptionswärme (Verdampfungsenthalpie) unmittelbar und möglichst effizient abgeführt wird. Im Falle von mit Silikagel beschichteten Sorptionsrädern ist eine unmittelbare Abfuhr der Sorptionswärme technisch nicht umsetzbar, wodurch deren Sorptionsleistung begrenzt bleibt. Im Falle flüssiger Absorbenzien in Form von konzentrierten Salzlösungen, ist eine Abfuhr der freiwerdenden Sorptionswärme z.B. durch Kontaktflächen, die durch einen geschlossenen Wasserkreislauf gekühlt werden möglich. Zur Kühlung des Wasserkreislaufes solcher Systeme wird jedoch in der Regel ein Kühlturm o. ä. erforderlich. Für das angestrebte, rein luftgeführte System stellt unter diesen Gesichtspunkten ein Kreuzstromwärmetauscher, eingesetzt als direkte Kontaktfläche zwischen flüssigem Sorptionsmittel und zu entfeuchtender Abluft, eine optimale Lösung dar. Die Kanäle des Kreuzstromwärmetauschers werden zur Luftentfeuchtung auf der Abluftseite mit konzentrierter Salzlösung und auf der Gegenseite zur Verdunstungskühlung mit Wasser besprüht. Auf der wasserbesprühten Seite wird Außenluft eingeblasen, die anschließend als Fortluft nach außen abgeführt wird. In einem zweiten auf der Abluftseite zur Verdunstungskühlung mit Wasser besprühten Kreuzstromwärmetauscher wird schließlich Außenluft durch die vorbehandelte Abluft sensibel gekühlt und als Zuluft dem Gebäude zugeführt. Neben diesem sehr integrierten System werden im Rahmen dieser Arbeit drei weitere Systemvarianten, ein System ohne Luftentfeuchtung, ein System mit einem marktgängigen Sorptionsrad und ein einfacheres Flüssigsorptionssystem ohne integrierte Kühlung betrachtet (vgl. Abbildung 1). Neben den Ergebnissen der Gesamtsysteme werden detaillierte Messergebnisse zu den entwickelten Flüssigsorptionseinheiten inklusive zweier Regeneratoren dargestellt und mit den Simulationsergebnissen der erstellten Simulationsmodelle verglichen.

2. Untersuchte Systemkonfigurationen

Es werden insgesamt vier verschiedene Systemkonfigurationen zur Abluftkühlung experimentell und theoretisch untersucht die in Abbildung 1 dargestellt sind. System 1 und 2 dienen im wesentliche als marktverfügbare Referenzsystem zu den beiden Flüssigsorptionssystemen 3 und 4. Die untersuchten Systeme sind nachfolgend im Detail beschrieben:

- **System 1:** Einfachstes System; die Zuluft wird lediglich durch die Gebäudeabluft in einem Kreuzstromwärmetauscher (300 x 300 x 250 mm mit je 54 Kanälen auf der Zu- und Abluftseite und einem Wirkungsgrad von ca. 70%) gekühlt, dessen Kanäle zur Verdunstungskühlung auf der Abluftseite direkt mit Wasser besprüht werden. (HES: Heat exchanger sprayed with water).
- **System 2:** Basis System mit sorptionsgestützter Klimatisierung; DCS mit einem marktgängigen Sorptionsrad (AWheel: $\phi = 350$ mm, 20 Umdrehungen pro Stunde) und zwei wasserbesprühten Wärmetauschern (HES), einer zur Vorkühlung der entfeuchteten Abluft und einer zur Zuluftkühlung.
- **System 3:** Einfaches Flüssigsorptionssystem; das Sorptionsrad von System 2 wird durch eine Rieselentfeuchtereinheit ersetzt, in der ein flüssiges Sorptionsmittel auf eine mit der Abluft durchströmte Rieselmatrix aus Zellulosematerial verrieselt wird (CMAU: 300 x 200 x 150 mm, spezifische Oberfläche der Matrix $A = 650$ m²/m³). Eine Regenerationseinheit (RG) für flüssige Sorptionsmittel ersetzt den Regenerationslufferhitzer von System 2.
- **System 4:** Kompaktestes System; das flüssige Sorptionsmittel wird direkt in die Abluftkanäle einer Kreuzstromwärmetauschereinheit (HEAU: 300 x 300 x 250 mm mit je 54 Kanälen auf der Primär- und Sekundärseite und einem Wirkungsgrad von ca. 70%) gesprüht, die auf der Gegenseite (zweiter Außenluftstrom) zur Verdunstungskühlung mit einem Sprühbefeuchter ausgestattet ist. Mit der Regenerationseinheit und dem zweiten wasserbesprühten Wärmetauscher (HES) beinhaltet diese Systemkonfiguration nur noch drei Komponenten.

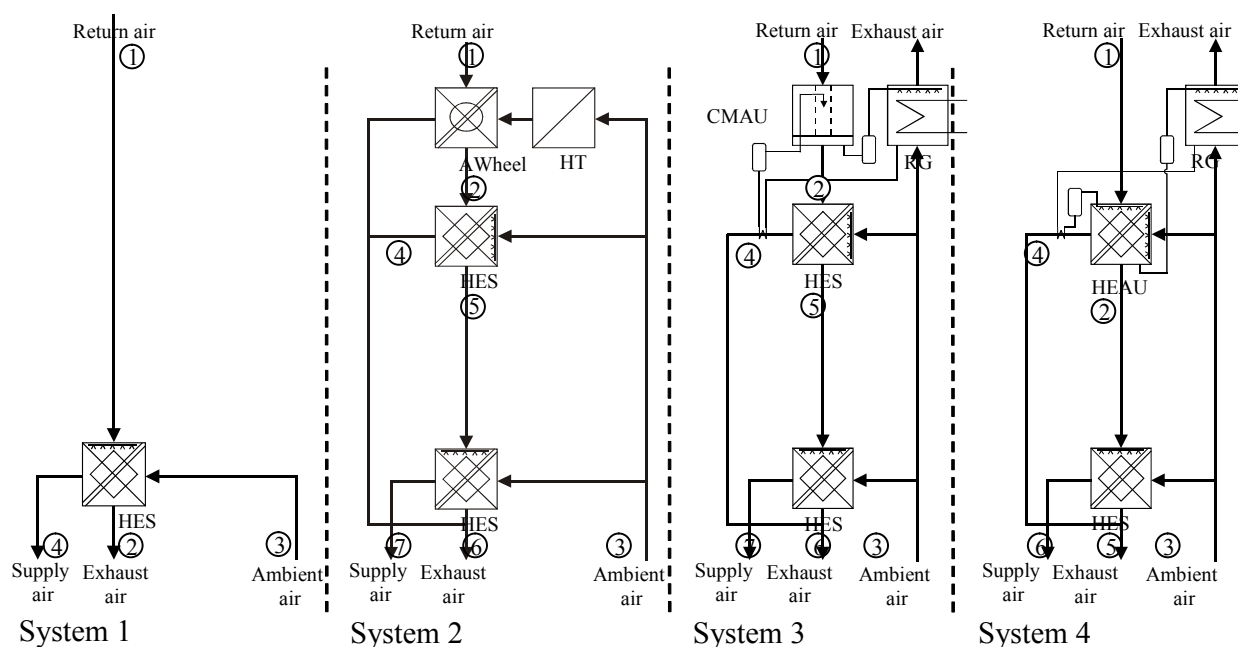


Abbildung 1: Untersuchte Systemkonfigurationen, *System 1:* Nur HES. *System 2:* AWheel mit zwei HES. *System 3:* CMAU und zwei HES. *System 4:* HEAU und ein HES.

Das Konstruktionsprinzip der untersuchten Flüssigsorptionseinheiten (einfache Rieselentfeuchtereinheit (CMAU) und besprühte Wärmetauschereinheit (HEAU)) sind in Abbildung 2 dargestellt.

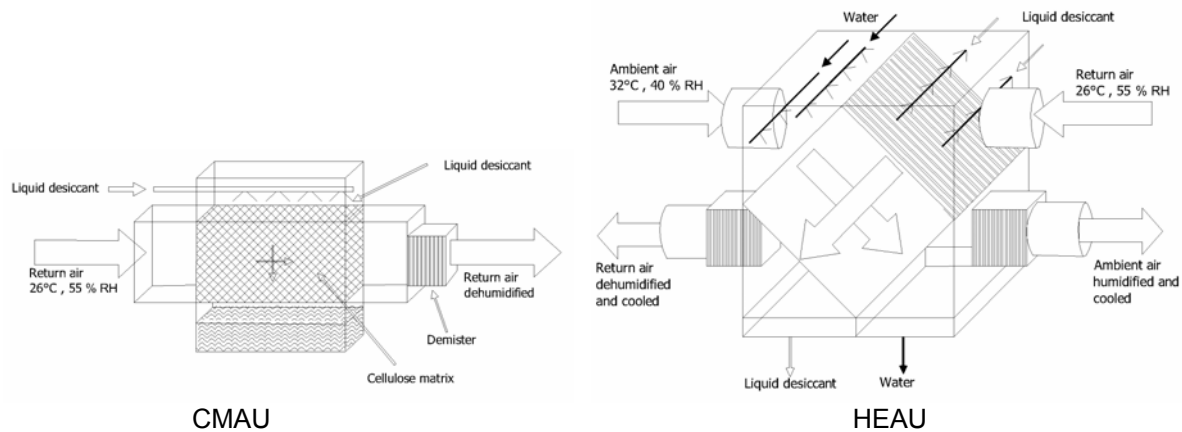


Abbildung 2: Konstruktionsprinzip der Flüssigsorptionseinheiten, CMAU: Rieselentfeuchtereinheit; HEAU: besprühte Wärmetauschereinheit

Zur Regeneration der Salzlösungen wurden zwei Anlagenvarianten entwickelt und untersucht. Ein einfacher Rieselregenerator, der baugleich ist mit der Rieselentfeuchtereinheit (CMAU), nur dass diese anstatt mit der Abluft mit stark erhitzter Außenluft zur Regeneration durchströmt wird. Die zweite Regenerationseinheit besteht aus zwei nebeneinander liegenden Rohrwendeln mit je 25 Windungen und einem Rohrdurchmesser von 20 mm sowie einem Wendeldurchmesser von 200 bzw. 260 mm. Die flüssigen Sorbenzien werden von oben gleichmäßig auf die Rohrwendeln verrieselt und durchströmen den Regenerator von oben nach unten im Gleichstrom mit der ebenfalls von oben eingeblasenen Regenerationsluft (nicht vorgeheizte Außenluft). Die Rohrwendeln werden zur Regeneration der flüssigen Sorbenzien von unten nach oben mit erhitztem Wasser (300 l/h) durchströmt. Das Konstruktionsprinzip des Rohrwendelregenerators ist in Abbildung 3 dargestellt.

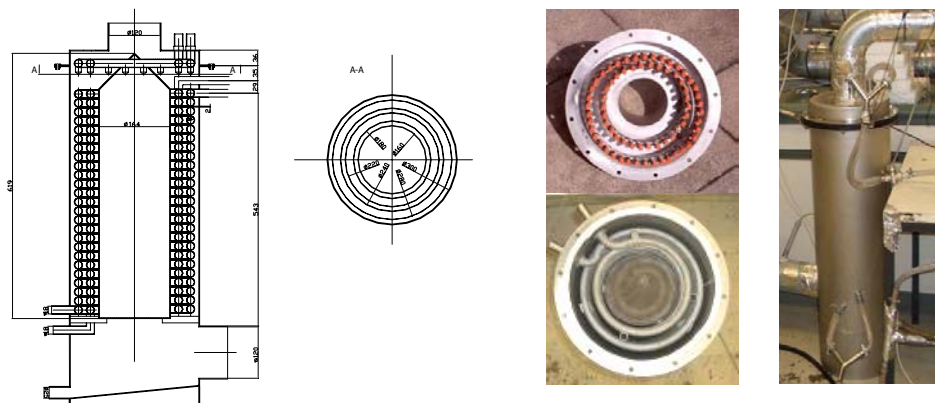


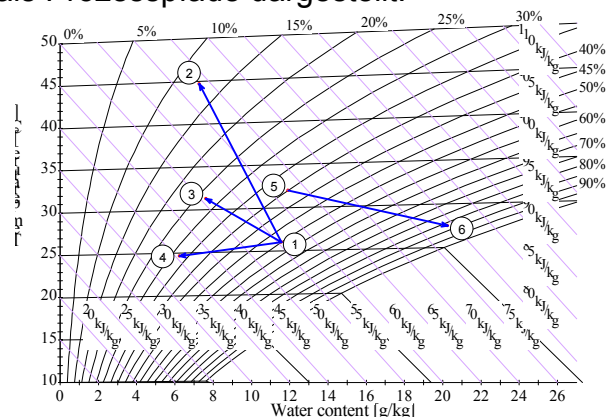
Abbildung 3: Konstruktionsprinzip des Rohrwendelregenerators

Die Entfeuchtung der Abluft im eingesetzten Sorptionsrad und in den entwickelten Flüssigsorptionsystemen sowie die Regeneration der flüssigen Absorbentien in den Regenerationseinheiten wurden messtechnisch für unterschiedliche Randbedingungen untersucht. Darüber hinaus wurden für die Flüssigsorptionsanlagen und die Regeneratoren Simulationsmodelle in der Simulationsumgebung INSEL entwickelt und anhand der Messergebnisse validiert. In den Flüssigsorptions- und den Regenerationseinheiten wurden als flüssige Sorptionsmittel sowohl eine konzentrierte wässrige Lithiumchlorid- (LiCl) als auch eine Calciumchloridlösung (CaCl₂) mit einer Anfangskonzentration von jeweils 43 % eingesetzt. Der umgesetzte Solevolumenstrom betrug in den Absorptionseinheiten 100 l/h und in den Regeneratoren 40 l/h.

3. Ergebnisse der untersuchten Systemkonfigurationen

Die drei untersuchten Entfeuchtungsprozesse wurden vergleichend jeweils für konstante Abluftkonditionen mit 26°C und 55% relativer Feuchte sowie einem Abluftvolumenstrom von 200 m³ h⁻¹ messtechnisch untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 in einem Mollier-Diagramm als Prozesspfade dargestellt.

Abbildung 4: Prozesspfade der Abluftentfeuchtung, Pfad 1-2: AWheel; Pfad 1-3: CMAU; Pfad 1-4: HEAU; Pfad 5-6: Befeuchtung im HEAU (Abluftkonditionen: 26°C, 55%RF, 200 m³ h⁻¹; Außenluftkonditionen (HEAU): 32°C, 40%RH, 200 m³ h⁻¹).



Wie in Abbildung 4 zu erkennen, wird der Wassergehalt der Abluft im untersuchten Sorptionsrad (AWheel) um 4.3 g kg⁻¹ entfeuchtet, wobei die Temperatur der Abluft um rund 19 K (Pfad 1-2) ansteigt. Zur Regeneration des Sorptionsrades wurde Außenluft mit einem Wassergehalt von 12 g kg⁻¹ und einer Temperatur von 70°C eingesetzt. In der Rieselentfeuchtereinheit (CMAU) reduziert sich der Wassergehalt der Abluft mit 4.2 g kg⁻¹ annähernd in gleichem Maße wie im Sorptionsrad. Die Ablufttemperatur steigt in der Rieselentfeuchtereinheit jedoch nur um rund 5 K an (Pfad 1-3). Die höchste Abluftentfeuchtung von 5.7 g_{Water} kg_{Air}⁻¹ wird in der besprühten Wärmetauschereinheit (HEAU) erreicht, gleichzeitig wird die Temperatur der Abluft um 1 K gesenkt (Pfad 1-4). Pfad 5-6 beschreibt den Befeuchtungs- und Verdunstungskühlungsprozess auf der mit Wasser besprühten Seite der Wärmetauschereinheit, die zur Kühlung des Absorptionsprozesses mit Außenluft durchströmt wird.

Für die Bewertung der betrachteten Systeme und Systemkonfigurationen ist

letztendlich die mit den einzelnen Systemen zu erreichende Kälteleistung maßgeblich, welche sich aus den erreichbaren Zulufttemperaturen und dem jeweiligen Luftvolumenstrom ergibt. Zur Ermittlung der erreichbaren Zulufttemperaturen wurden die an den betrachteten Sorptionseinheiten gewonnenen Messergebnisse sowie ein validiertes Simulationsmodell für den jeweils anschließenden wasserbesprühten Wärmetauscher (HES) herangezogen.

In den Mollier-Diagrammen in Abbildung 5 - Abbildung 8 sind die innerhalb der einzelnen Komponenten der vier betrachteten Systemkonfigurationen stattfindenden Prozesse dargestellt.

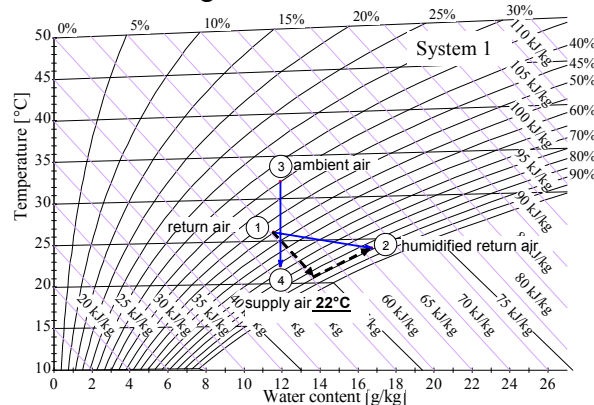


Abbildung 5: System 1: *Pfad 1-2:* Befeuchtung der Abluft im HES(---> Dieser Prozess kann als isenthalpe Befeuchtung mit anschließender Erhitzung und Befeuchtung bei konstant bleibender relativer Feuchte beschrieben werden); *Pfad 3-4:* Kühlung der Zuluft im HES.

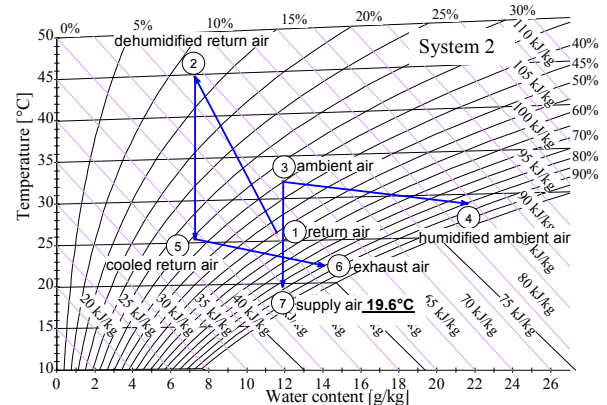


Abbildung 6: System 2, *Pfad 1-2:* Entfeuchtung der Abluft im AWheel; *Pfad 3-4:* Befeuchtung der Außenluft im HES; *Pfad 2-5:* Vorkühlung der Abluft im HES; *Pfad 5-6:* Befeuchtung der Abluft im HES; *Pfad 3-7:* Kühlung der Zuluft im HES.

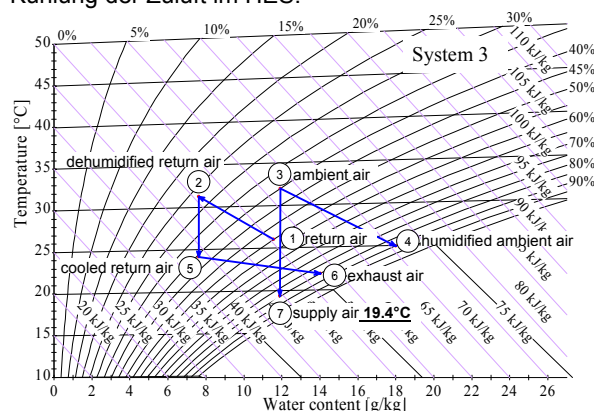


Abbildung 7: System 3: *Pfad 1-2:* Entfeuchtung der Abluft im CMAU; *Pfad 3-4:* Befeuchtung der Außenluft im HES; *Pfad 2-5:* Vorkühlung der Abluft im HES; *Pfad 5-6:* Befeuchtung der Abluft im HES; *Pfad 3-7:* Kühlung der Zuluft im HES.

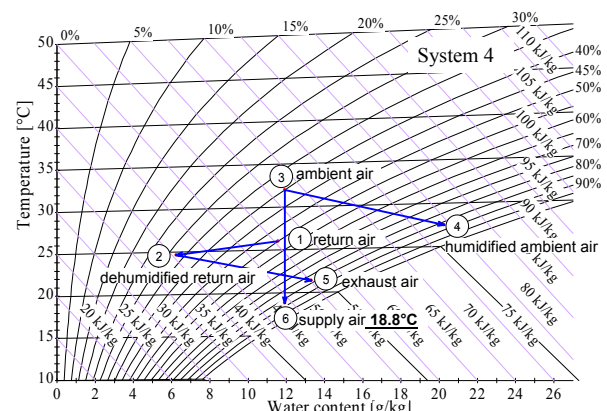


Abbildung 8: System 4, *Pfad 1-2:* Entfeuchtung der Abluft im HEAU; *Pfad 3-4:* Befeuchtung der Außenluft im HEAU; *Pfad 2-5:* Befeuchtung der Abluft im HES;; *Pfad 3-6:* Kühlung der Zuluft im HES.

Wie die in den Mollier-Diagrammen abgebildeten Prozesse zeigen, wird die niedrigste Zulufttemperatur von 18.8°C mit der besprühten Wärmetauschereinheit in System 4, gefolgt von der Rieselentfeuchtereinheit in System 3 mit 19.4°C und dem Sorptionsrad in System 2 mit 19.6 °C erreicht. Die einfachste untersuchte Form der Zuluftkühlung, mit nur einem wasserbesprühten Wärmetauscher in System 1, erreicht eine Zulufttemperatur von 22°C. Neben der höheren Kälteleistung zeichnet

sich die besprühte Wärmetauschereinheit (HEAU) gegenüber der dem Sorptionsrad und der Rieselentfeuchtereinheit insbesondere dadurch aus, dass sie die Funktion des Absorbers, des Wärmetausches und des Luftbefeuchters in einer Einheit vereinigt, was eine sehr kompakte Konstruktion des Systems erlaubt. Darüber hinaus bieten Flüssigsorptionsysteme die Möglichkeit einer verlustfreien Speicherung der konzentrierten Salzlösung, wodurch eine Kälteerzeugung ermöglicht wird, die weitgehend unabhängig von der momentanen Sonneneinstrahlung ist, so dass eine Nachheizvorrichtung bei einem ausreichend großen Solespeicher praktisch nicht mehr notwendig ist. Die für den sommerlichen Auslegungspunkt mit 32°C Außenlufttemperatur und 40% relativer Feuchte sowie Abluftkonditionen von 26°C und 55% relativer Feuchte ermittelten Ergebnisse für die erreichbaren Zulufttemperaturen und Kälteleistungen sind für alle betrachteten Systemkonfigurationen zusammenfassend in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Systemkonfigurationen für 200 m³h⁻¹ Zu- und Abluftvolumenstrom.

Systembeschreibung	t _{Supply} [°C]	Q _{Cool} [W]
System 1: Wasserbesprühter Wärmetauscher (HES)	22.0	671
System 2: Sorptionsrad (AWheel) mit zwei HES	19.6	832
System 3: Rieselentfeuchtereinheit (CMAU) mit zwei HES	19.4	846
System 4: Besprühte Wärmetauschereinheit (HEAU) mit einem HES	18.8	886

Demnach ergibt sich bei einem Luftvolumenstrom von 200 m³ h⁻¹ auf der Zu- und Abluftseite für das kompakteste System 4 eine maximal erreichbare Kälteleistung von 886 W.

Ergänzende Analysen mit Hilfe der entwickelten Simulationsmodelle (vgl. Abschnitt 4) für die besprühte Wärmetauschereinheit (HEAU) und den wasserbesprühten Wärmetauscher zeigen, dass eine um 15% höhere Entfeuchtungsleistung bei deutlich geringeren Solevolumenströmen zu erreichen ist, wenn sich die Oberflächenbenetzung im HEAU durch eine Beschichtung der Oberflächen von derzeit ca. 35% auf 60 % erhöhen lässt. Eine weitere Verbesserung des Systems ließe sich erreichen, wenn der Wirkungsgrad des mit Wasser besprühten Wärmetauschers durch Integration von Rippen zur Steigerung der Wärmeübertragungsleistung von 70% auf ca. 76% erhöht wird. Mit den genannten Verbesserungen können die erreichbaren Zulufttemperaturen auf unter 18°C gesenkt werden, was einer Kälteleistung von rund 1 kW entspricht.

4. Mess- und Simulationsergebnisse der untersuchten Einzelkomponenten der Flüssigsorptionsysteme

Neben der in Abschnitt 3 beschriebenen Analyse von unterschiedlichen

Systemkonfigurationen, wurden detaillierte messtechnische Untersuchungen zum Betriebsverhalten der entwickelten Absorber- und Regeneratoreinheiten der Flüssigsorptionskomponenten durchgeführt und mit den Ergebnissen der in INSEL entwickelten Simulationsprogramme verglichen. Nachfolgend werden die Ergebnisse für die untersuchten Absorptions- und Regenerationseinheiten für einen Luftvolumenstrom der Abluft von $200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ dargestellt und diskutiert. Weitere Ergebnisse für andere Luftvolumenströme sowie Einzelheiten zu den erstellten Simulationsprogrammen können [5] und [6] entnommen werden.

4.1 Ergebnisse der Untersuchungen an den entwickelten Absorbereinheiten

Die für die besprühte Wärmetauschereinheit und die Rieselehtfeuchtereinheit aus den Untersuchungen gewonnenen Mess- und Simulationsergebnisse können Abbildung 9 entnommen werden. In diesen Grafiken sind die messtechnisch (durchgezogene Linien) und über die Simulationsrechnungen (gestrichelte Linien) ermittelten Austrittstemperaturen und Entfeuchtungen der Abluft für unterschiedliche Betriebszustände und Luftkonditionen vergleichend dargestellt.

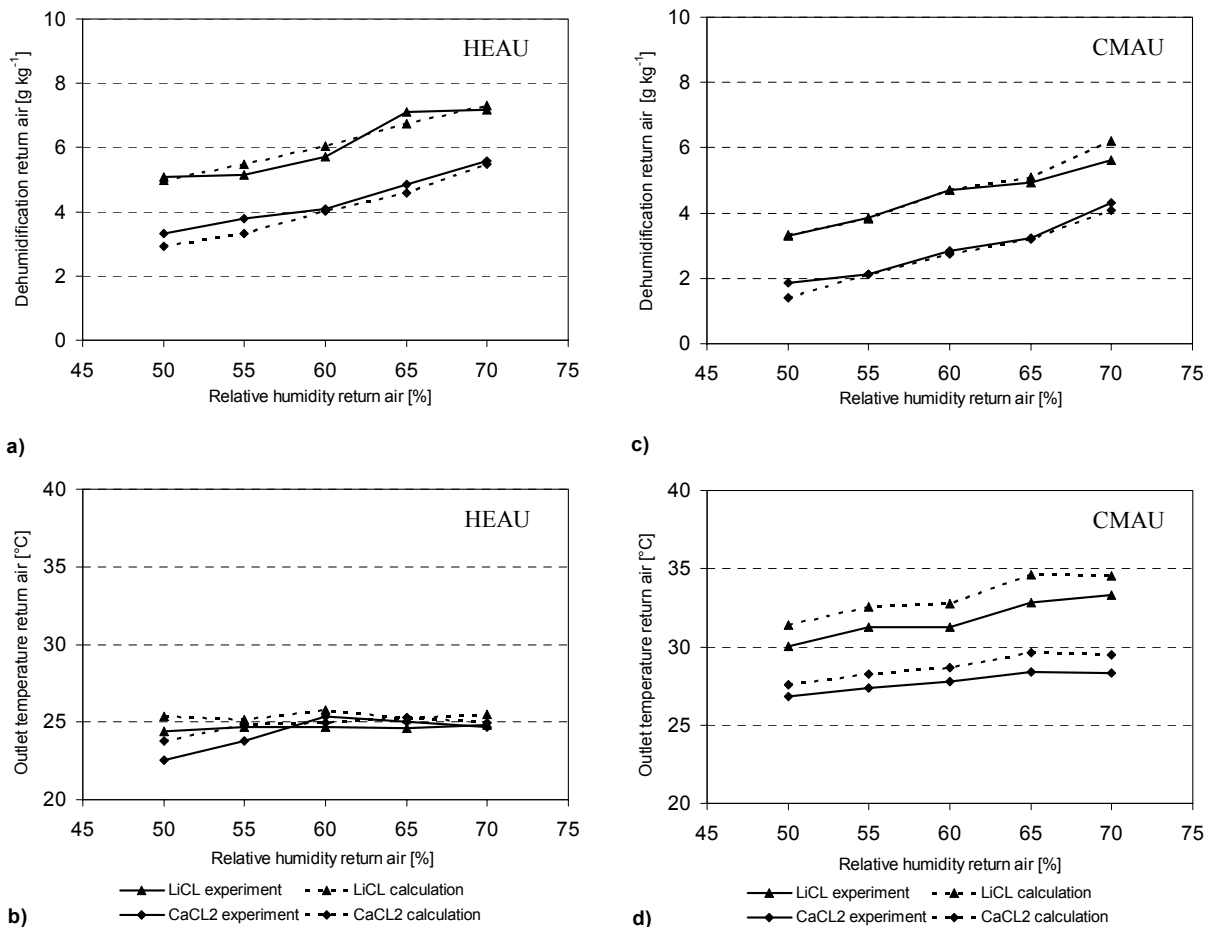


Abbildung 9: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen der erreichten Abluftentfeuchtung in Abhängigkeit von der relativen Feuchte der Abluft. (Abluftkonditionen am Absorbereintritt: 26°C, 50 bis 70% relative Feuchte, 200 m³h⁻¹; Außenluftkonditionen am Absorbereintritt (nur HEAU): 32°C, 40% relative Feuchte, 200 m³h⁻¹). a) + b): Abluftentfeuchtung und Austrittstemperaturen HEAU: c) + d): Abluftentfeuchtung und Austrittstemperaturen CMAU

Die in Abbildung 9 dargestellten Messergebnisse zeigen, dass für den Betrieb der Rieselentfeuchtereinheit mit einer ca. 43%igen LiCl-Lösung in Abhängigkeit von der relativen Feuchte der Abluft eine respektable Entfeuchtung von $\Delta x_{LP} = 3,3$ bis 5,6 g/kg erreicht wird. Die Prozessluft wird durch die dabei frei werdende Absorptionswärme um rund 4 - 7 K von 26°C auf annähernd 30 - 33°C erwärmt. Der Anstieg der erreichten Entfeuchtung mit der relativen Feuchte der Prozessluft erklärt sich durch das gleichzeitig ansteigende Partialdampfdruckgefälle zwischen dem Salzlösungsfilm und der Prozessluft. Das Partialdampfdruckgefälle stellt die antreibende Kraft des Absorptionsprozesses dar, so dass mit ihrem Anstieg pro Zeiteinheit mehr Wasserdampf übertragen werden kann.

Durch die in die Wärmetauschereinheit integrierte Kühlung kann die erreichte Entfeuchtung über die LiCl-Lösung in Abhängigkeit von der relativen Feuchte der Prozessluft noch deutlich auf $\Delta x_{LP} = 5,2$ bis 7,2 g kg⁻¹ (vgl. Abbildung 6.2) gesteigert werden. Diese Steigerung wird durch die integrierte Kühlung erreicht, wodurch die Absorptionswärme abgeführt wird. Der Salzlösungsfilm bleibt dadurch in der Wärmetauschereinheit deutlich kühler als in der Rieselentfeuchtereinheit. Dies wiederum hat ein deutlich höheres Partialdampfdruckgefälle zwischen Salzlösung und Prozessluft zur Folge. Durch die integrierte Kühlung wird gleichzeitig eine Erwärmung der Prozessluft verhindert und diese im Vergleich zum Ausgangszustand sogar um rund 1 K abgekühlt.

Für die ebenfalls untersuchte 43%ige Calciumchloridlösung ergeben sich in beiden Fällen um ca. 1 – 1,5 g kg⁻¹ geringere Entfeuchtungen der Abluft. Dies ist auf den deutlich höheren Dampfdruck der CaCl₂-Lösung im Vergleich zur LiCl-Lösung zurückzuführen.

In Zuge der Simulationsrechnungen stellte sich heraus, dass hinsichtlich der Benetzung der Rieselentfeuchtermatrix und der Wärmetauscheroberflächen mit den Salzlösungen die korrekte Wahl des Benetzungsgrads entscheidend für die Genauigkeit der Nachbildung der Messergebnisse ist. Für die Rieselentfeuchtereinheit korrelieren die Ergebnisse der Simulationsrechnungen bei Benetzungsgraden von 90% für Calciumchlorid und 80% für Lithiumchlorid sehr gut mit den Messwerten. Diese hohen Benetzungsgrade decken sich mit den Beobachtungen an der porösen Cellulosematrix der Rieselentfeuchtereinheit. Im Fall der Wärmetauschereinheit führten dagegen deutlich geringere Benetzungsgrade von 45% bei Calciumchlorid und 35% bei Lithiumchlorid zu einer guten Korrelation zwischen Simulation und Messung, was zum Teil auf die Schrägstellung (45°) des Wärmetauschers zurückzuführen ist.

Da mit sinkendem Benetzungsgrad auch eine deutliche Verringerung der erreichten Entfeuchtung zu verzeichnen ist, zeigen die ermittelten niedrigen Benetzungsgrade der Wärmetauschereinheit von 45 % bei Calciumchlorid und 35 % bei Lithiumchlorid,

dass bezüglich der erreichbaren Entfeuchtung der Wärmetauschereinheit noch ein erhebliches Verbesserungspotential gegeben ist. Außerdem sind die mit den eingesetzten Düsen einstellbaren Volumenströme der Salzlösungen von $V_{SL} \geq 80 - 120$ l/h noch deutlich zu hoch. Der Salzgehalt der Salzlösungen wird bei einmaligem Durchlauf durch die Einheiten und 100 l/h Solestrom lediglich um ca. $\Delta\xi_{SL} = 0,74 - 0,76$ % reduziert. Diese geringen Änderungen des Salzgehalts ermöglichen zwar einen mehrfachen Durchsatz der Salzlösungen vor ihrer Regeneration ohne nennenswerte Verringerung der erreichten Entfeuchtung, es muss jedoch gleichzeitig deutlich mehr Transportenergie aufgewandt werden als eigentlich notwendig wäre. Eine gute Ausnutzung des Entfeuchtungspotentials der Salzlösungen wäre erreicht, wenn es gelänge die Salzkonzentration der Lösungen bei einmaligem Durchgang um ca. 2 % zu reduzieren. Dies erfordert eine deutliche Verringerung der Solevolumenströme bei höchstmöglichem Benetzungsgrad der Oberflächen. Zur Veranschaulichung dieser Effekte wurden für die Wärmetauschereinheit ergänzende Simulationsrechnungen durchgeführt, wobei die Benetzungsgrade und Solevolumenströme variiert wurden. Die hierbei ermittelten Entfeuchtungen Δx_{LP} der Prozessluft und die damit erreichbaren Zulufttemperaturen sind in Abbildung 10 dargestellt. Diese Berechnungen wurden für Prozessluft mit 26°C und 55% relativer Feuchte bei Entfeuchtung durch eine Lithiumchloridlösung mit einem Salzgehalt von 43% und 28°C Eintrittstemperatur durchgeführt.

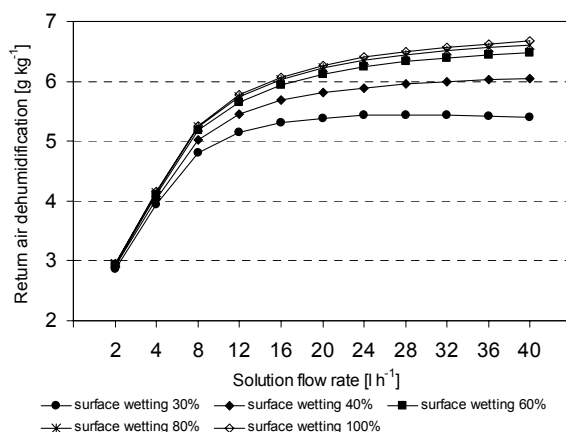


Abbildung 10: Berechnete Entfeuchtung der Abluft im HEAU bei Variation des Volumenstroms der LiCl-Lösung und des Benetzungsgrades der Wärmetauscher-oberflächen. (Abluft: 26°C, 55%RH, 200 m³ h⁻¹; Außenluft: 32°C, 40%RH, 200 m³ h⁻¹).

Anhand der Simulationsergebnisse zeigt sich, dass Solevolumenströme unter 8 l/h für die untersuchte Wärmetauschereinheit hinsichtlich der erreichten Entfeuchtung unter den genannten Betriebsbedingungen und Luftkonditionen nicht sinnvoll sind. Durch eine weitere Erhöhung des Solestroms kann eine Steigerung der Entfeuchtung und gleichzeitig eine Reduktion der Zulufttemperaturen erreicht werden. Mit zunehmendem Solevolumenstrom nimmt diese Steigerung bzw. Reduktion jedoch deutlich ab, so dass die erreichte Entfeuchtung bzw. die erreichbare Zulufttemperatur einem Grenzwert entgegen strebt, dessen Wert vom Grad der Benetzung der Oberflächen abhängt. Als Optimum zwischen der aufgewandten Energie zum Transport der LiCl-Lösung, der Ausnutzung der Absorptionseigenschaften der LiCl-Lösung, der Entfeuchtung und der damit erreichbaren Zulufttemperatur kann aus den ermittelten Kurven ein Mindestsolevolumenstrom von ca. 20 l/h bei einem Benetzungsgrad von mindestens 60% abgeleitet werden. Dies entspricht nur rund einem Viertel des Mindestvolumenstroms, der mit den eingebauten Düsen der untersuchten Anlage umsetzbar war. Bezogen auf die besprühte Kantenlänge der

Wärmetauscherbleche ergibt sich daraus ein längenbezogener Volumenstrom von mindestens 0,62 Litern pro Stunde und Meter Kantenlänge ($V'_{SL}=20 \text{ l/h} / (54 \cdot 0,3 \text{ m}^2) = 0,62 \text{ l/hm}$).

4.2 Ergebnisse der Untersuchungen an den entwickelten Regeneratoren

Zur Bewertung der Effizienz der untersuchten Regeneratoren ist im Wesentlichen die erreichte Austrittskonzentration der eingesetzten Salzlösungen von Bedeutung. In Abbildung 11 sind die Mess- und Simulationsergebnisse zur erreichten Austrittskonzentration der eingesetzten Salzlösungen für unterschiedliche Betriebszustände des Riesel- und Rohrschlangenregenerators für einen Solevolumenstrom von 40 l h^{-1} vergleichend dargestellt.

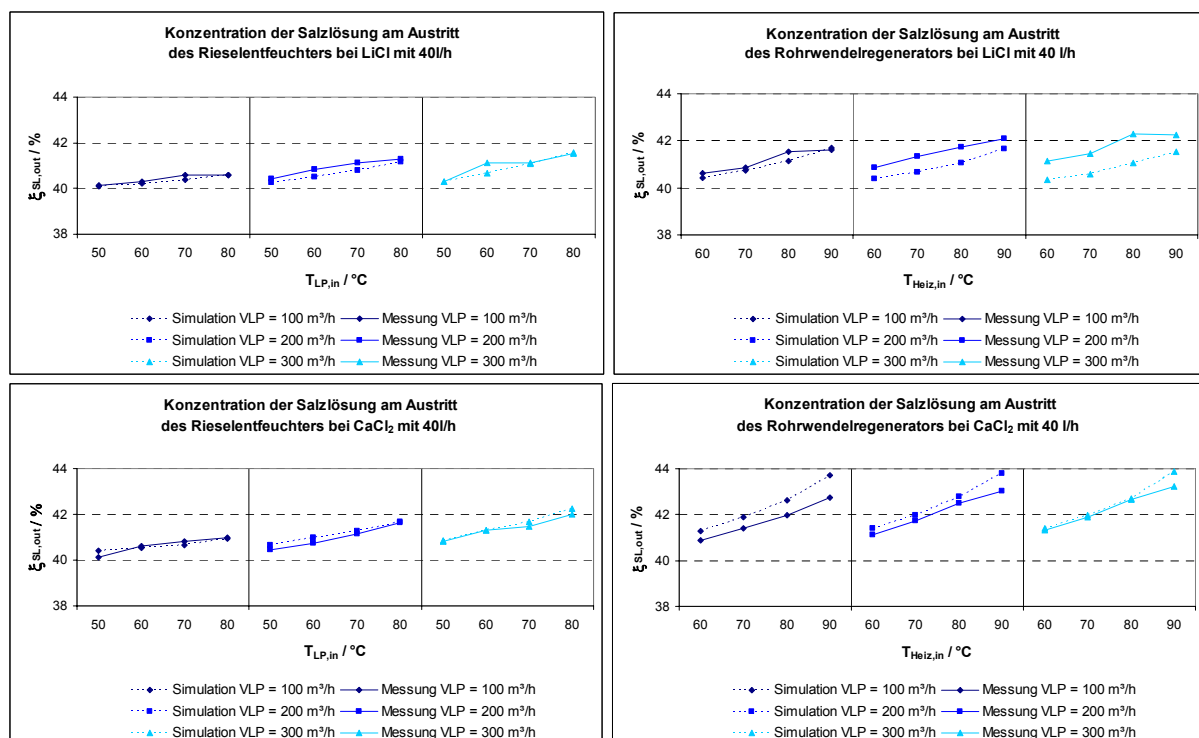


Abbildung 11: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen der erreichten Austrittskonzentration in Abhängigkeit vom Luftvolumenstrom und der Regenerationsluft- bzw. Heizwassertemperatur (Regenerationsluftkonditionen: 32°C , 40% relative Feuchte, vor Eintritt in den Rieselregenerator erhitzt auf 50 bis 80°C , $100 - 300 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$; Konzentration der Salzlösung am Regeneratoreintritt: 40 %. Konditionen des Heizwassers am Eintritt des Rohrschlangenregenerators: 60 bis 90°C , 300 l h^{-1})

Die unter den angegebenen Randbedingungen gewonnenen Messergebnisse zeigen, dass für den Rieselregenerator mit einer ca. 40%igen Anfangskonzentration der Salzlösungen, einem Luftvolumenstrom von $300 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ und einem Salzlösungsvolumenstrom von 40 l h^{-1} , in Abhängigkeit von der Regenerationslufttemperatur, ein Salzgehalt von $\xi = 40,8$ bis 42% für Calciumchlorid (CaCl_2) und von $\xi = 40,3$ bis $41,5 \%$ für Lithiumchlorid (LiCl) zu erreichen ist.

Für die gleichen Betriebsbedingungen ergeben sich für den Rohrwendelregenerator deutlich höhere Austrittskonzentrationen von $\xi = 41,5$ bis $43,4$ % für Calciumchlorid (CaCl_2) und von $\xi = 41,3$ bis $42,3$ % für Lithiumchlorid (LiCl). Dies ist auf eine deutliche effizientere Erhitzung der Salzlösung über das Heizwasser in den Rohrwendeln zurückzuführen. Ursächlich hierfür sind die deutlich höheren Wärmeübergangskoeffizienten, die sich für die Übertragung vom Heizwasser auf die Rohrwendel und von der Rohrwendel auf die Salzlösung ergeben. Bei reiner Wärmeübertragung über die Regenerationsluft (Rieselregenerator) sind die Wärmeübergangskoeffizienten deutlich kleiner, außerdem ist die Wärmekapazität der Luft deutlich geringer.

Die Lithiumchloridlösung weist auf Grund ihres niedrigen Dampfdrucks, im Vergleich zum Calciumchlorid ein deutlich höheres Absorptionspotential auf. Im Regenerationsvorgang sind die Verhältnisse jedoch genau umgekehrt. Calciumchloridlösung ist auf Grund ihres vergleichsweise höheren Dampfdrucks bei gleicher Konzentration deutlich leichter zu regenerieren als Lithiumchlorid. Dieser Zusammenhang spiegelt sich deutlich in den gewonnenen Mess- und Simulationsergebnissen wieder.

Die in den Grafiken gestrichelt dargestellten Simulationsergebnisse, stimmen mit den am Austritt messtechnisch ermittelten Salzgehalten relativ gut überein. Teilweise zeigen sich etwas größere Abweichungen zwischen Simulation und Messung, die auf Messungenauigkeiten und die sehr schlechte Regulierbarkeit des im Regenerationsluftstrang eingesetzten Dampfbefeuchters zurückzuführen sind.

Da bei guter Ausnutzung des Entfeuchtungspotentials der Salzlösung und hohem Wassergehalt der Außenluft deren Konzentration bei einfachem Durchsatz durch die optimierten Absorptionseinheiten lediglich um maximal $1,5 - 2$ % reduziert wird, kann mit den entwickelten Regeneratoren bei einem Solevolumenstrom 40 l/h und entsprechend hoher Regenerationsluft- bzw. Heizwassertemperatur ein kontinuierlicher Betrieb der Absorptionseinheit sichergestellt werden.

Zur weiteren Optimierung der Regeneratoren ist eine Reduktion der umgesetzten Solevolumenströme bei möglichst gleichzeitiger Erhöhung der Oberflächenbenetzung durch Beschichtungen zur Reduktion der Oberflächenspannung anzustreben.

5. Zusammenfassung

Es wurde ein neues Konzept zur sorptionsgestützten Klimatisierung vorgestellt, in dem der gesamte Lufttrocknungs- und Befeuchtungsprozess im Gegensatz zu Standardsystemen nicht auf der Zuluftseite, sondern auf der Abluftseite erfolgt. Die Zuluft wird bei diesem Konzept rein sensibel über einen effizienten Wärmetauscher durch die vorbehandelte Abluft gekühlt, wodurch Probleme hinsichtlich der Hygiene vermieden werden. Für dieses System werden hocheffiziente Sorptionsprozesse erforderlich, um die im zusätzlichen Wärmetauscher entstehenden Übertragungsverluste auszugleichen und so eine zu Standardsystemen vergleichbare Kälteleistung zu erreichen. Zur Lufttrocknung wurden verschiedene Technologien untersucht. Neben einem mit Silikagel beschichteten Sorptionsrad wurden mit einer einfachen Rieselentfeuchtereinheit und einer besprühten Wärmetauschereinheit zwei Flüssigsorptionssysteme analysiert, in denen 43%ige LiCl- und CaCl₂-Lösungen als Sorptionsmittel eingesetzt wurden.

Das Sorptionsrad kann die Abluft bestenfalls in einem isenthalpen Prozess mit einem entsprechenden Lufttemperaturanstieg und einer Entfeuchtungsleistung von rund 4 g kg⁻¹ entfeuchten. Für die Rieselentfeuchtereinheit ergeben sich ähnlich hohe Entfeuchtungsleistungen, Der Temperaturanstieg der Abluft fällt hier jedoch deutlich geringer aus, da hier ein Teil der freiwerdenden Absorptionswärme durch den Volumenstrom der Salzlösung abgeführt wird. Die mit Abstand höchste Absorptionsleistung wird von der besprühten Kreuzstromwärmetauschereinheit mit annähernd 6 g kg⁻¹ ohne Temperaturanstieg der Abluft erreicht. Grundsätzlich ergaben sich mit der eingesetzten LiCl-Lösung im Vergleich zur CaCl₂-Lösung in beiden Einheiten um ca. 30 – 40% höhere Absorptionsleistungen.

Für die kompakteste Systemkonfiguration (System 4), mit der besprühten Wärmetauschereinheit als Luftentfeuchter, werden für die sommerlichen Außenluftbedingungen von 32°C und 40% relativer Feuchte Zulufttemperaturen von 18,8°C erreicht, was bei dem vorhandenen Luftvolumenstrom von 200 m³h⁻¹ einer Kälteleistung von 886 W entspricht. Damit ist im Vergleich zu einer einfachen Kühlung der Zuluft mit der Gebäudeabluft in einem auf der Abluftseite mit Wasser besprühten Wärmetauscher (System 1), eine um 32% höhere Kälteleistung zu erreichen.

Die für die Flüssigsorptionssysteme in INSEL entwickelten Simulationsprogramme wurden anhand der gewonnenen Messergebnisse validiert. Mit Hilfe des Simulationsmodells für die besprühte Wärmetauschereinheit (HEAU) wurde deren Optimierungspotential analysiert. Demnach kann eine um 15% höhere Entfeuchtungsleistung bei deutlich geringeren Solevolumenströmen erreicht werden, wenn es gelingt gleichzeitig den Benetzungsgrad der Wärmetauscheroberflächen von derzeit ca. 35% auf 60% zu erhöhen. Eine weitere Verbesserung des kompaktesten Systems 4 kann erreicht werden, wenn der Wirkungsgrad des wasserbesprühten Wärmetauschers (HES) durch Integration von Rippen zur Steigerung der Wärmeübertragung von derzeit ca. 70% auf 76% erhöht wird. Mit diesen Verbesserungen von System 4 werden Zulufttemperaturen von unter 18°C möglich, was einer Kälteleistung bei einem Luftvolumenstrom von 200 m³h⁻¹ von rund 1 kW entspricht.

Mit dem entwickelten Riesel- bzw. Rohrschlangenregenerator kann die Salzlösung von einer Anfangskonzentration von 40% je nach Regenerationstemperatur auf ca. 41-42 % bzw. 41-43 % konzentriert werden. Da bei guter Ausnutzung des Entfeuchtungspotentials der Salzlösung und hohem Wassergehalt der Außenluft deren Konzentration bei einfachem Durchsatz durch die optimierten Absorptionseinheiten lediglich um maximal 1,5 - 2 % reduziert wird, kann mit den entwickelten Regeneratoren bei einem Solevolumenstrom 40 l/h und entsprechend hoher Regenerationsluft- bzw. Heizwassertemperatur ein kontinuierlicher Betrieb der Absorptionseinheit sichergestellt werden. Zur weiteren Optimierung der Regeneratoren ist eine Reduktion der umgesetzten Solevolumenströme bei möglichst gleichzeitiger Erhöhung der Oberflächenbenetzung durch Beschichtungen zur Reduktion der Oberflächenspannung anzustreben.

References

- [1] **Bachofen, F.** European Patent Office, patent number: EP 0 959 307 A1, declaration number: 9881042.5, declarant: POLYBLOCK AG 8404 Winterthur (CH), publication day 24.11.1999, Patent Paper 1999/47.
- [2] **Saman, W. Y.;** Alizadeh, S. An experimental study of a cross-flow type plate heat exchanger for dehumidification/cooling. *Solar Energy*, Vol. 73, No. 1, 2002, p. 359-371.
- [3] **Saman, W. Y.;** Alizadeh, S. Modelling and performance analysis of a cross-flow type plate heat exchanger for dehumidification/cooling. *Solar Energy*, Vol. 70, No. 4, 2001, p. 361-372.
- [4] **Lävemann, E.;** W. Keßling, B. Röhle, C. Kink, Klimatisierung über Sorption, Endbericht Phase I des Forschungsvorhabens Nr. 032 9151 B des BMFT, Sektion Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, Lehrstuhl Prof. Dr. R. Sizmann, Amalienstr. 54, 80799 München, 1993.
- [5] **Pietruschka, D.;** Eicker, U.; Huber, M. Schumacher, J. Experimental performance analysis and modelling of liquid desiccant cooling systems for air conditioning in residential buildings, *International Journal of Refrigeration* 29, 2006, p. 110-124.
- [6] **Frank, W.;** **Sobota, K.** Entwicklung einer Desorptionseinheit für den Einsatz in einem Wohnhauslüftungsgerät, Masterarbeit an der HfT-Stuttgart, Studiengang SENCE, 2006.

Development of a 1 kW Liquid Desiccant DCS Prototype

D. PIETRUSCHKA, U. EICKER, M. HUBER, J. SCHUMACHER

University of Applied Sciences, HfT Stuttgart
Schellingstraße 24, D-70174 Stuttgart, Germany,
dirk.pietruschka@hft-stuttgart.de,
Tel.: +49.711.8926.2674, Fax: +49.711.8926.2698

Abstract

Air conditioning in residential buildings is a large and growing market, almost exclusively covered by electrical compression systems. In order to supply this market with sustainable technologies the development of cost-effective solar or waste heat driven cooling systems is necessary. As buildings with low energy demand are often equipped with mechanical ventilation systems, it is obvious to consider air based thermal cooling technologies, such as open desiccant cooling systems (DCS), for low power applications. Small desiccant rotors, heat exchangers and humidifiers are market available for volume flows in the range of typical mechanical ventilation systems (around $300 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ fresh air supply for single family houses). Liquid sorption systems have also been patented for such applications [1], but there is no system yet on the market and only limited experimental results are available [2]-[4].

To avoid any hygienic problems, a new system configuration is proposed in this work, which shifts the whole air treatment to the exhaust air side and only uses sensible cooling for the outside air stream. As the cooling power is generated on the exhaust air side, the dehumidification process needs to be highly efficient to provide low supply air temperatures. Four different technological options for return air cooling were experimentally and theoretically investigated, with increasing integration of components and improvement of performance. System 1 and 2 are used as market available reference systems for the developed liquid desiccant systems 3 and 4. System 1 is the simplest reference cooling process with just one cross flow heat exchanger which is sprayed with water on the return air side for evaporative cooling. In system 2 the return air is dehumidified by a solid desiccant rotor, pre cooled in a water sprayed heat exchanger by ambient air before it enters another water sprayed heat exchanger to cool the supply air. In system 3 the solid desiccant rotor is replaced by a simple liquid desiccant contact matrix absorber unit (CMAU), while all other components remain the same. In the most integrated system 4, the liquid desiccant is directly sprayed into a cross flow heat exchanger absorber unit (HEAU), which also integrates a spray humidifier on the secondary side. For the given design conditions of $200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ volume flow, a maximum of 886 W cooling power can be achieved using the most integrated liquid desiccant system 4.

Additional analyses with the developed theoretical model of the HEAU and HES show, that if the surface wetting in the HEAU can be improved from currently only 35% to 60%, about 15% higher dehumidification rates can be achieved at significantly lower solution flow rates. A further improvement of system 4 can be reached, if the efficiency of the water sprayed cross flow heat exchanger is increased from 70% to about 76%, by the implementation of heat transfer ribs between the heat exchanger walls. With these improvements the supply air temperatures could be reduced to 18°C .

