

Vermessung von Komponenten einer Absorptionsanlage

M. Jaradat, D. Fleig, J. Addy, K. Vajen, U. Jordan
Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik
Mönchebergstr. 19, 34125 Kassel
Tel.: 0561 – 804 3890; Fax: 0561 – 804 3993
solar@uni-kassel.de
www.solar.uni-kassel.de

1. Einleitung

Am Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik der Universität Kassel werden von einer Nachwuchsgruppe offene Absorptionsprozesse zur Gebäudebeheizung, Klimatisierung sowie Lufttrocknungsanwendungen untersucht. Abb. 1 zeigt eine Prinzipskizze des offenen Absorptionssystems. Bei dem offenen Absorptionsprozess wird Luft durch eine hygroskopische Flüssigkeit im Absorber getrocknet und gleichzeitig erwärmt. Je nach Anwendung kann der frei werdende Wärmestrom abgeführt werden oder mit der Luft für Trocknungs- und Heizzwecke verwendet werden. Das im Sorbat absorbierte Wasser wird zeitversetzt im Regenerator z.B. mit Wärme aus einer thermischen Solaranlage ausgetrieben. In einem ersten Schritt wird als Sorptionsmittel eine wässrige LiCl Lösung eingesetzt. Zu einem späteren Zeitpunkt sollen auch andere Sorptionsmittel getestet werden.

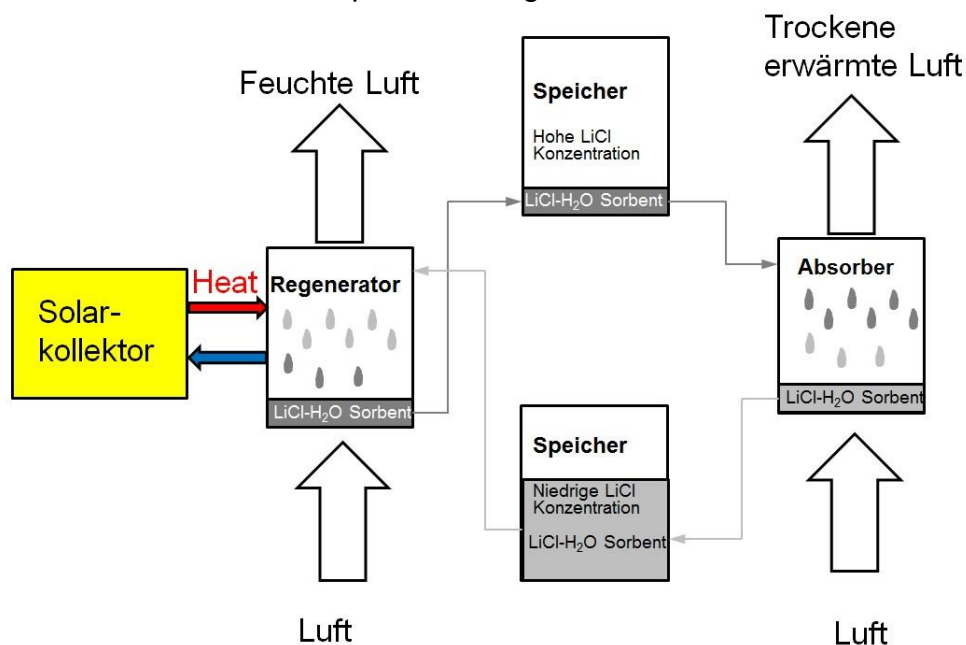


Abb. 1: Prinzip eines offenen Absorptionssystems mit LiCl als Sorbens.

Im Rahmen der Forschungstätigkeiten werden Absorber- und Regenerator-Prototypen, sowie weitere Komponenten (Befeuchter, Speicherbehälter) entwickelt, und im Labor vermessen. Darauf folgend werden die Komponenten miteinander

verschaltet und Systemuntersuchungen für die Anwendungsfälle Gebäudeheizung, Gebäudeklimatisierung und Lufttrocknung durchgeführt. Hierzu steht an der Universität Kassel eine solide Testumgebung bestehend aus einer Luft- und Wasserkonditionierungsanlage zur Verfügung. Des Weiteren sind alle Komponenten mit entsprechender Messtechnik ausgestattet. Eine Einzelplatte welche mittels Wärmebildkamera untersucht wird dient zur orts- und zeitaufgelösten Vermessung des Temperaturfeldes und somit des Wärme- und Stoffübergangs an der Grenzschicht. Die entwickelten Prototypen sollen mit leichten Modifikationen, für folgende Anwendungsbereiche geeignet sein:

- Beheizung von Niedrigenergiewohngebäuden durch den Absorptionsprozess
- Entfeuchtung der Luft bei konventionellen Klimaanlage für bestimmte Anwendungsbereiche durch den Absorptionsprozess mit dem Ziel Energie einzusparen da die energieintensive Taupunktunterschreitung und etwaige Nachheizung wegfällt
- Trocknung von industriellen und landwirtschaftlichen Produkten
- Komfort-Kühlanwendungen: Wiederbefeuchtung von trockener Luft durch direkte und indirekte Verdunstungskühlung

2. Laboreinrichtung

2.1. Luft- und Wasserkonditionierungsanlage

Zur Konditionierung der für die Vermessung der Komponenten benötigten Luft (Temperaturen, Feuchten, Volumenströme) wurde eine Anlage aufgebaut, die u.a. aus Heiz- und Kühlregistern, einem Luftbefeuchter sowie mehreren Anschlüssen zu den Untersuchungsobjekten besteht. Die Anlage ist in nachfolgender Abb. 2 dargestellt und die darin enthaltene Nummerierung wird in Tab. 1 erläutert. Die Anlage wurde so konzipiert, dass es möglich ist, unterschiedliche Prozessluftkonditionen, d.h. die benötigte Temperatur und Luftfeuchte der Prozessluft, zu erzeugen. Die Anlage wurde bei der Firma Imtech Deutschland GmbH & Co. KG in Auftrag gegeben, da diese über umfangreiche Erfahrungen in der Ausführung von raumluftechnischen Anlagen mit spezifischen Luftkonditionen verfügt.

Die Zuluft der Anlage wird über das Lüftungssystem des Gebäudes entnommen. Die Abluft der Anlage wird über das Oberlicht des Laborraums nach außen geleitet. Die Anlage ist so ausgelegt, dass Luftvolumenströme zwischen 20 und 2000 m³/h erreicht werden sowie Lufttemperaturen zwischen 10 und 70 °C eingestellt werden können. Die Zuluft wird über den Ventilator (5, siehe Abb. 2) angesaugt und im Luftherhitzer (4) oder Luftkühler (3) erwärmt bzw. gekühlt. Über das nachgeschaltete Elektroheizregister (6) lässt sich die Luft noch zusätzlich erwärmen. Durch den Luftbefeuchter (8) kann die Feuchte der Luft eingestellt werden. Der Luftvolumenstrom lässt sich mittels eines steuerbaren Ventilators sowie den Irisblenden der drei Ausgänge (10) voreinstellen.

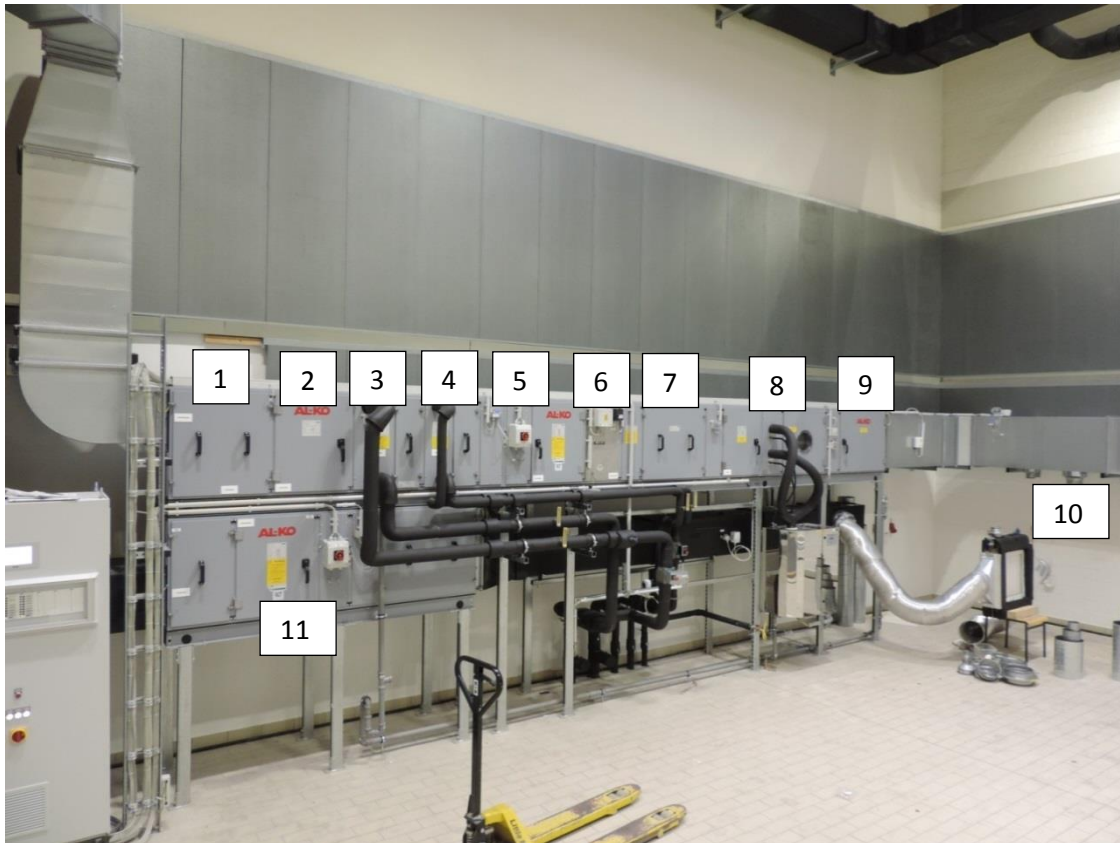


Abb. 2: Luftkonditionierungsanlage der Universität Kassel.

Tab. 1 Beschreibung der Nummerierung aus Abb. 2.

Nr.	Bezeichnung	Komponenten, Leistung, Dimension
1	Außenluftklappe, Umluftklappe	
2	Außenluftfilter	
3	Kühlregister	17,5 kW
4	Heizregister (Heißwasser)	13,4 kW
5	Zuluftventilator	2000 m ³ /h
6	Elektroheizregister	20 kW
7	Schalldämpfer	
8	Luftbefeuchter	60 kg/h
9	Mix. Ventilator	
10	3 Anschlüsse zu den Untersuchungsobjekten	DN 100, DN 160, DN 250
11	Abluftventilator	

Zusätzlich zur Luftkonditionierungsanlage befinden sich im Labor zwei Wasserkonditionierungsanlagen zur Bereitstellung eines definierten Kühlwasser- bzw. Heizwasserstroms. Die Anlagen können unabhängig voneinander betrieben werden und es handelt sich um geschlossene Kühl- bzw. Heizkreisläufe mit regelbaren Volumenströmen und Austrittstemperaturen.

2.2. Messtechnik

Zur Untersuchung der Komponenten sind verschiedene Messgeräte im Einsatz. Die Messdaten werden durch Datenlogger erfasst und über die Software LabVIEW eingelesen, visualisiert und gespeichert. Der Luftvolumenstrom am Eintritt der Komponenten wird mit einem Ultraschalldurchflussmessgerät mit einer Messgenauigkeit von $\pm 2\%$ gemessen. Der Wasserdampfgehalt der Luft am Ein- und Austritt der Komponenten wird mittels der Messung der relativen Feuchte und Temperatur der Luft durch Feuchtigkeitssensoren (testo 6610) ermittelt. Die Sensoren haben eine Genauigkeit von $\pm 1\%$ der relativen Feuchte sowie eine Temperaturgenauigkeit von $\pm 0,3\text{ °C}$. Der Volumenfluss und die Dichte des Sorptionsmittels am Eintritt wird durch ein Coriolismessgerätes (Promass von Endress + Hauser) mit einer Genauigkeit von $\pm 0,0005\text{ g/cm}^3$ der gemessenen Dichte ermittelt. Die Dichte des Sorptionsmittel am Austritt der Komponenten wird (diskontinuierlich) mit einem Coriolis Messgerät von Anton Paar mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,001\text{ g/cm}^3$ ermittelt. Der Volumenstrom von Kühl- bzw. Heizwasser wird mittels magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräten (OPTIFLUX 1050 von Krohne) mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,5\%$ vom Messwert bestimmt. Des Weiteren wird die Temperatur aller Fluide vor und nach jeder Komponente mit Widerstandstemperaturfühlern (Pt100 bzw. Pt1000) erfasst.

Eine Wärmebildkamera mit einer Auflösung von 640×480 Pixel wird dazu verwendet den Absorptionsprozess an einer Einzelplatte detailliert zu untersuchen. Hierbei soll die Temperatur an der Phasengrenze ermittelt werden. Das hierdurch ermittelte zweidimensionale Temperaturfeld der Grenzschicht kann anschließend mit den Ergebnissen eines Berechnungsmodells verglichen werden. Mit der Kamera können neben Wärmebildern auch Filmaufnahmen im Infrarotbereich mit bis zu 30 Bildern pro Sekunde z.B. zur Vermessung instationärer Absorptionsvorgänge aufgenommen werden. Die Luftgeschwindigkeit und somit die Strömungsverteilung im Plattenspalt der Einzelplatte wird mit einem Hitzdrahtanemometer der Firma DANTEC gemessen. Hierbei gibt ein elektrisch beheizter Draht je nach örtlicher Geschwindigkeit eine bestimmte Wärmemenge ab welche sich über die el. Leistung quantifizieren lässt. Mittels einer geeigneten Kalibrierung lässt sich daher ein Zusammenhang zwischen elektrischer Spannung und Strömungsgeschwindigkeit aufstellen.

2.3. Komponenten

Der Absorber ist wie in Abb. 3 dargestellt als Plattenwärmeübertrager ausgeführt. Die Luft strömt im Kreuzstrom zur LiCl-Lösung. Aufgrund der stark korrosiven Eigenschaften der zur Entfeuchtung eingesetzten wässrigen LiCl-Lösung gegenüber Metallen wurde für Bauteile, die in einem unmittelbaren Kontakt mit der LiCl-Lösung stehen, überwiegend handelsübliches Polycarbonat (PC) verwendet. Um eine bessere Benetzung der LiCl-Lösung auf den Platten zu erreichen und zudem durch Kapillareffekte die Geschwindigkeit der LiCl-Lösung zu senken, wurden die Absorberplatten zusätzlich mit einem Textil bespannt.

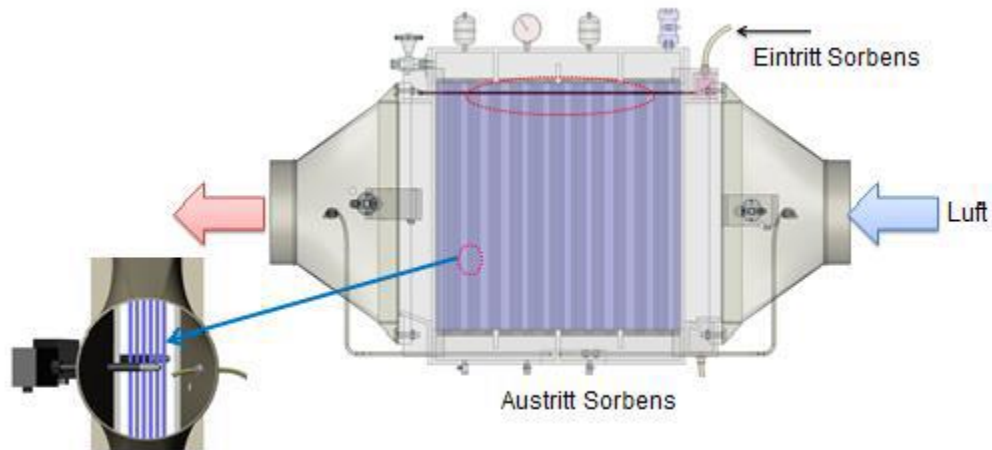


Abb. 3: Absorber ausgeführt als Plattenwärmeübertrager.

Der Regenerator ist wie in Abb. 4 dargestellt als Rohrbündelwärmeübertrager ausgeführt. Durch die Rohrbündel strömt Heißwasser und Luft strömt im Kreuzstrom zur LiCl-Lösung. Die Kupferrohrbündel haben eine korrosionsbeständige Pulverbeschichtung sowie einen Textilmantel. Die Wärme- und Stoffübertragungsfläche beträgt ca. 8 m². Der Verteiler für die LiCl-Lösung besteht aus parallelen horizontalen Polymethylmethacrylat (PMMA) Rohren, welche die LiCl-Lösung über das auf den Rohren aufgebrachte Textil verteilt.

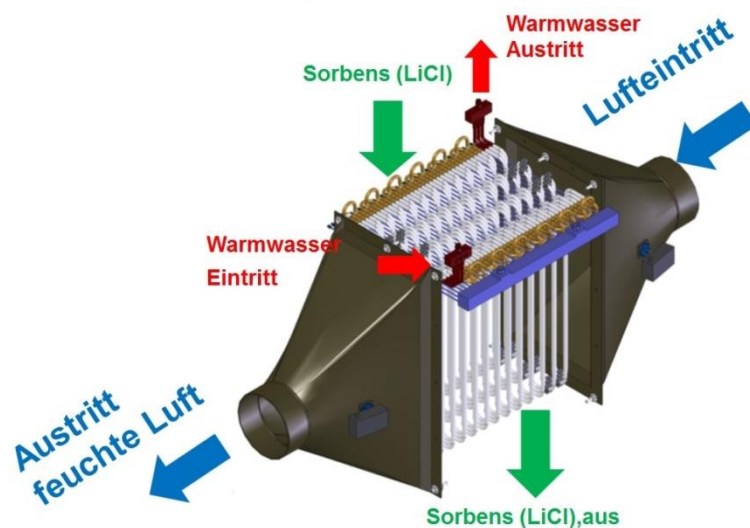


Abb. 4: Regenerator ausgeführt als Rohrbündelwärmeübertrager.

Der Versuchsaufbau zur Vermessung der zweidimensionalen Grenzschichttemperatur mit Hilfe einer Wärmebildkamera besteht aus einer Einzelplatte und ist in nachfolgender Abb. 5 dargestellt und wird als Absorber betrieben. Die Einzelplatte ist mit einem Textil beklebt welches von oben mit der LiCl-Lösung benetzt wird. Die zu trocknende Luft strömt zwischen der Einzelplatte und einer Polyethylen (PE) Folie (Spaltbreite 5 mm) im Kreuzstrom zur LiCl-Lösung. Hierbei dient die PE-Folie als Sichtfenster für die Wärmebildkamera da die Folie im

Wellenlängenbereich, der für die Kamera relevant ist, ausreichend transparent ist. Der Versuchsaufbau wird mit schwarzem Stoff von der Umgebung abgeschirmt um Störungen aufgrund von Wärmestrahlung von Personen im Raum oder anderen Wärmequellen zu minimieren.

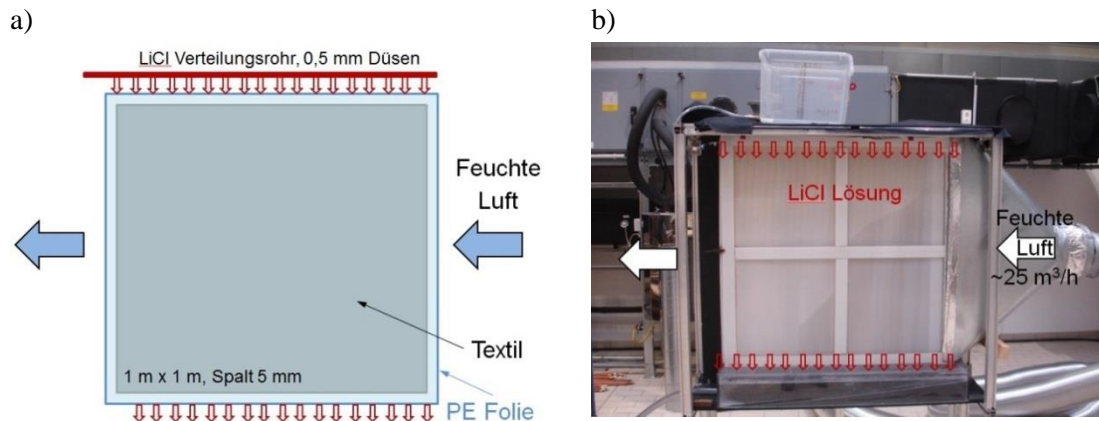


Abb. 5: Absorber: Versuchsaufbau zur Vermessung von Phasengrenztemperaturen an der Oberfläche eines Sorbensfilms; a) Prinzipskizze und b) Foto des Versuchsaufbaus.

2.4. Versuchsparameter

Beispielhaft sollen Ergebnisse von Messungen mit dem Regenerator in Rohrbündelausführung und Messungen mit der Wärmebildkamera bei welchem ein Absorber in Einzelplattenausführung untersucht wurde gezeigt werden. Der Regenerator wurde unter nicht adiabaten Bedingungen mit vorgewärmter Luft und Heizwasser vermessen. Insgesamt wurden 12 verschiedene Experimente durchgeführt welche sich in vier Testsequenzen unterteilen lassen bei welchen jeweils ein Parameter variiert wurde und die andern unverändert gelassen wurden. Die variierten Parameter, wie in nachfolgender Tab. 2 aufgelistet, waren LiCl-Lösungsvolumenstrom, Temperatur der LiCl-Lösung, Heizwassertemperatur sowie die Lufteintrittstemperatur. Die folgenden Parameter wurden in allen Experimenten konstant gehalten: Luftvolumenstrom $\dot{V}_{Luft,in} = 350 \text{ m}^3/\text{h}$, LiCl Massenanteil in der Lösung $\xi = 36 \%$, Lufteintrittsfeuchte $\omega_{in} = 10 \text{ g/kg}$ und der Heizwassermassenstrom $\dot{m}_{hw} = 420 \text{ kg/h}$. Jedes Experiment hatte eine Dauer von 90 Minuten und wurde gestartet sobald die Messdaten darauf schließen ließen dass ein quasistationärer Zustand erreicht war. Das Ziel der Messungen war es den Einfluss der variierten Parameter auf die Verdampfungsrate und den erreichten LiCl Massenanteil in der Lösung am Austritt zu ermitteln.

Tab. 2 Variierte Parameter bei der Vermessung des Regenerators in Rohrbündelausführung (siehe Abb. 4)

Testsequenz	LiCl-Lösungsstrom $\dot{V}_{sol,in}$ l/h	Temperatur LiCl-Lösung $\vartheta_{sol,in}$ °C	Temperatur Heizwasser $\vartheta_{Wasser,in}$ °C	Luft- temperatur $\vartheta_{Luft,in}$ °C	Massenstrom- verhältnis $\dot{m}_{Luft,in}$ / $\dot{m}_{sol,in}$
I	20	40	70	40	15,7
	40	40	70	40	8,6
	60	40	70	40	5,8
II	40	25	70	40	8,6
	40	40	70	40	8,6
	40	50	70	40	8,6
III	40	40	50	40	8,6
	40	40	70	40	8,6
	40	40	80	40	8,7
IV	40	40	70	28	8,6
	40	40	70	40	8,6
	40	40	70	50	8,6

Tab. 3 zeigt beispielhaft die eingestellten Parameter einer Testreihe bei den Absorptionsversuchen mit der Einzelplatte am Thermographiemessstand. Hierbei wurde der Luftvolumenstrom so gewählt dass die Geschwindigkeit im Plattenspalt örtlich ein Wert von 2 m/s nicht wesentlich übersteigt da in der Literatur dies als die kritische Geschwindigkeit angegeben wird ab welcher Strömungsmittels auftreten kann. In diesen Versuchen wurde das Massenstromverhältnis zwischen Luft und LiCl-Lösung variiert um die Benetzung der Einzelplatte zu untersuchen. Die Geschwindigkeitsverteilung am Eintritt, Mitte und Austritt der Platte wurde mittels eines Hitzdrahtanemometer für drei verschiedene Luftvolumenströme (20, 30 und 40 m³/h) gemessen.

Tab. 3 Parameter einer Testreihe zur Vermessung des zweidimensionalen Temperaturfeldes mittels einer Wärmebildkamera an der Einzelplatte.

Massenstrom- verhältnis $\dot{m}_{Luft,in}$ / $\dot{m}_{sol,in}$	Luftvolumen- strom $\dot{V}_{Luft,in}$ m ³ /h	Luft- temperatur $\vartheta_{Luft,in}$ °C	Wassergehalt der Luft ω_{in} $g_{H_2O}/kg_{L,tr}$	Temperatur LiCl-Lösung $\vartheta_{LiCl,in}$ °C	LiCl Massenanteil $\xi_{LiCl,in}$ kg_{LiCl}/kg_{sol}
5	25	23	12	23	0,416
10	25	23	12	23	0,416
15	25	23	12	23	0,416
20	25	23	12	23	0,416
25	25	23	12	23	0,416
30	25	23	12	23	0,416

2.5. Messdatenauswertung

Der von der Luft abgegebene bzw. aufgenommene Wasserdampfmassenstrom wird zum einen luftseitig über die gemessenen Wasserdampfgehalte am Ein- und Austritt der Luft bestimmt und zum anderen auch sorptionsmittelseitig über die gemessene Dichte am Ein- und Austritt des Sorptionsmittels. Der übertragene Dampfmassenstrom \dot{m}_{vap} lässt sich luftseitig nach folgender Gleichung:

$$\dot{m}_{vap,Luft} = \dot{m}_{Luft} (\omega_{ein} - \omega_{aus}) \quad (\text{Gl. 1})$$

und lösungsmittelseitig nach folgender Gleichung:

$$\dot{m}_{vap,sol} = \dot{m}_{LiCl} \left(\frac{1 - \xi_{aus}}{\xi_{aus}} - \frac{1 - \xi_{ein}}{\xi_{ein}} \right) \quad (\text{Gl. 2})$$

bestimmen. Der abgegebene bzw. aufgenommene Wassermassenstrom ist ein wichtiger Parameter, um die Leistungsfähigkeit der Komponenten zu beurteilen. Das Verhältnis

$$\kappa_m = \frac{\dot{m}_{vap,sol}}{\dot{m}_{vap,Luft}} \quad (\text{Gl. 3})$$

der beiden ermittelten Wasserdampfmassenströme ist ein gutes Kriterium um die Genauigkeit des durchgeführten Experiments zu beurteilen. Im Idealfall ist das Verhältnis 1. Zusätzlich werden Energiebilanzen für jede vermessene Komponente aufgestellt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Der von der LiCl-Lösung an die Regenerationsluft übertragene Dampfmassenstrom \dot{m}_{vap} sowie die erreichte Erhöhung des LiCl Massenanteils in der Lösung $\Delta\xi$ wurden in Abhängigkeit des LiCl-Lösungsmassenstroms und den Eintrittstemperaturen von Heizwasser, LiCl-Lösung und Luft untersucht. Die Ergebnisse werden in den Abb. 6 - Abb. 8 gezeigt. Der in den Experimenten maximal übertragene Dampfmassenstrom war 5,8 kg/h bei einem LiCl Massenanteil von knapp 39 % ($\Delta\xi = 3\%$) am Austritt des Regenerators (siehe Abb. 7). Dies wurde mittels einer relativ hohen Heizwassertemperatur von 80 °C erreicht. Die höchste LiCl Konzentration am Austritt des Regenerators ($\Delta\xi = 3,5\%$) wurde mit einem relativ kleinen LiCl-Lösungsmassenstrom erreicht (siehe Abb. 6b) was sich mit dem großen Massenstromverhältnis Luft/LiCl-Lösung und den damit verbundenen längeren Aufenthaltszeiten der LiCl-Lösung im Regenerator erklären lässt.

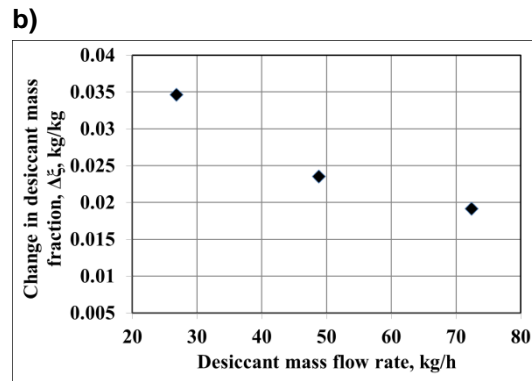
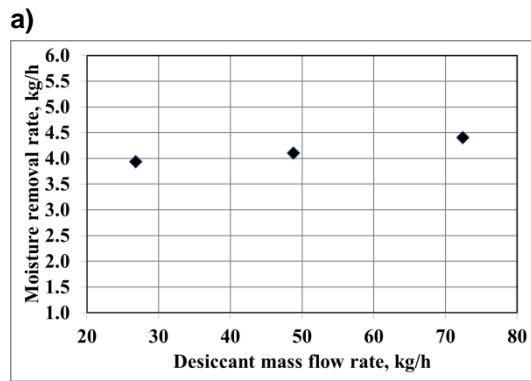


Abb. 6: Einfluss des LiCl-Lösungsmassenstroms bei der Regeneration auf; a) übertragener Dampfmassenstrom und b) Änderung des LiCl Massenanteils in der Lösung, siehe auch Testsequenz I aus Tab. 2.

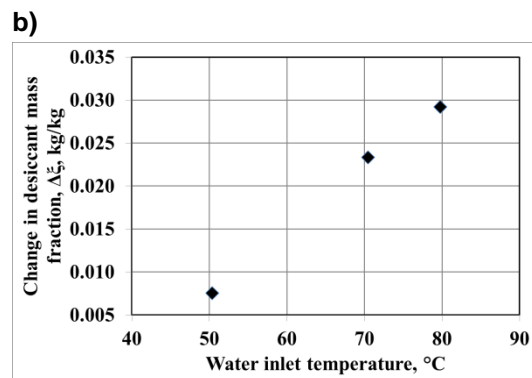
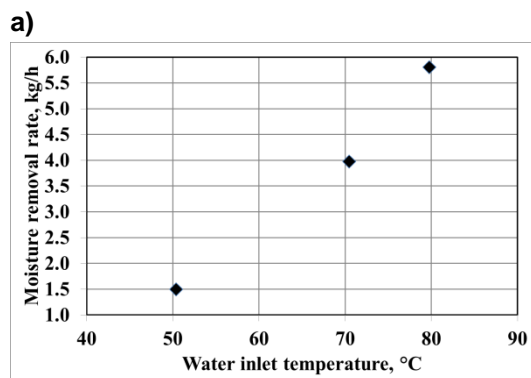


Abb. 7: Einfluss der Wassereintrittstemperatur bei der Regeneration auf; a) übertragener Dampfmassenstrom und b) Änderung des LiCl Massenanteils in der Lösung, siehe auch Testsequenz III aus Tab. 2.

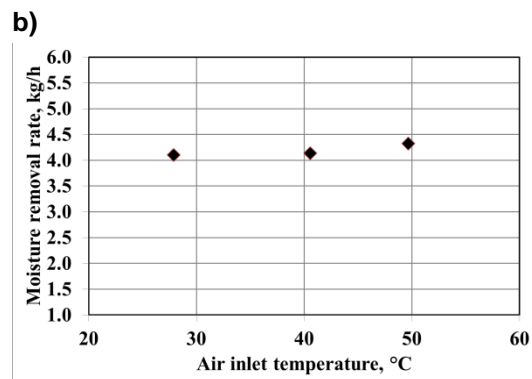
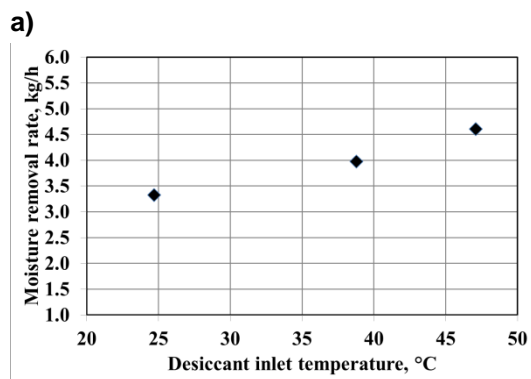


Abb. 8: Veränderung des übertragenen Dampfmassenstroms bei der Regeneration in Abhängigkeit von; a) LiCl-Lösungseintrittstemperatur und b) Lufteintrittstemperatur, siehe auch Testsequenz II und IV aus Tab. 2.

Abb. 9 zeigt ein mit der Wärmebildkamera aufgezeichnetes Temperaturfeld der Einzelplatte bei einem Massenstromverhältnis Luft zu LiCl-Lösung von 15/1 (siehe Tab. 3). Hierbei strömt die zu trocknende Luft von rechts nach links und die LiCl-Lösung im Kreuzstrom von oben nach unten. Das Infrarotbild zeigt eine maximale Temperatur von ungefähr 32°C bei der Absorption. Das Temperaturfeld ist relativ homogen was auf eine gleichmäßige Benetzung der Textiloberfläche schließen lässt. Die Verteilung der LiCl-Lösung auf dem Textil lässt sich im oberen Abschnitt des Wärmebildes noch gut erkennen. Abb. 10 zeigt den Temperaturverlauf entlang der in Abb. 9 horizontalen Linie. Die im Wärmebild dunkel erscheinenden Bauteile wurden der Anschaulichkeit halber herausgeschnitten. Hierbei wird deutlich, dass bei der Absorption die Grenzschichttemperatur am Luftertritt recht schnell ein Maximum erreicht und dann zum Luftaustritt hin leicht abfällt.

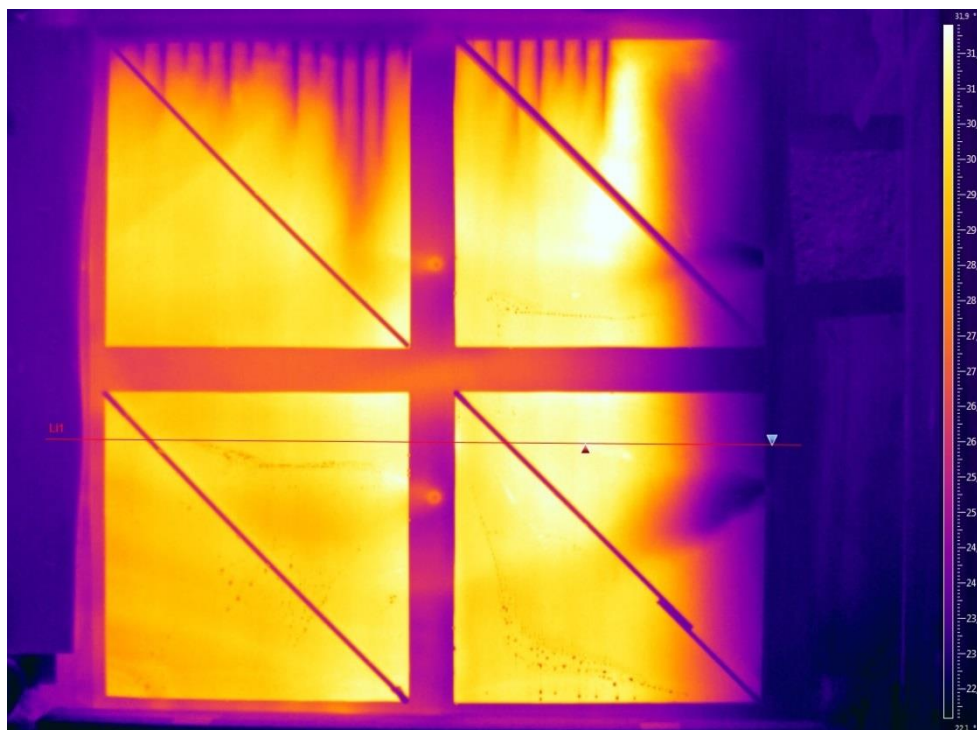


Abb. 9: Gemessenes Temperaturfeld der Grenzschicht zwischen Luft und LiCl-Lösung für ein Massenstromverhältnis von 15/1, siehe auch Tab. 3.

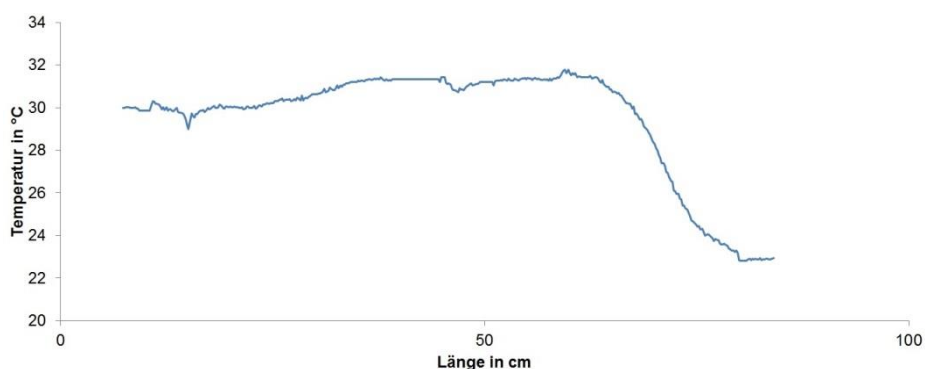


Abb. 10: Gemessener Temperaturverlauf entlang der in Abb. 9 eingezeichneten Linie.

4. Zusammenfassung

Am Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik der Universität Kassel werden von einer Nachwuchsgruppe offene Absorptionsprozesse zur Gebäudebeheizung, Klimatisierung sowie Lufttrocknungsanwendungen untersucht. Zur Konditionierung der für die Vermessung der Komponenten benötigten Luft wurde eine entsprechende Luftkonditionierungsanlage aufgebaut. Des Weiteren ist das Labor mit zwei Wasserkonditionierungsanlagen zur Bereitstellung eines definierten Kühlwasser- bzw. Heizwasserstroms ausgestattet. Im Labor werden unterschiedliche Bauarten von Absorbern und Regeneratoren mit einer umfangreichen Messtechnik experimentell untersucht. In diesem Tagungsband wurden beispielhaft Ergebnisse von Experimenten mit einem Regenerator in Rohrbündelausführung und thermographische Untersuchungen eines Absorbers in Einzelplattenausführung gezeigt. Der in den Regeneratorversuchen maximal übertragene Dampfmassenstrom betrug 5,8 kg/h bei einem LiCl Massenanteil im Austritt von knapp 39 %. Dies wurde mittels einer relativ hohen Heizwassertemperatur von 80 °C erreicht. Die Ergebnisse mit der Wärmebildkamera zeigen eine gute Benetzung des Textils was sich in einer relativ homogenen Temperaturverteilung äußert. In naher Zukunft soll das mit der Wärmebildkamera gemessene zweidimensionale Temperaturfeld mit einem Finiten-Differenzen Modell verglichen werden.

5. Danksagung

Das Forschungsprojekt „Offene Absorptions-Speichersysteme zur Beheizung von Wohngebäuden und für Lufttrocknungsanwendungen (OpenSorp)“ wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.