

Experimentelle Untersuchung an einer offenen Absorptionsanlage zur Heutrocknung

Joseph Addy*, Mustafa Jaradat, Daniel Fleig, Klaus Vajen, Ulrike Jordan
Universität Kassel, FG Solar-und Anlagentechnik, 34125 Kassel, Deutschland
solar@uni-kassel.de

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Zur Trocknung von Heuballen mit einem offenen Absorptionsprozess wurde eine Demonstrationsanlage im Rahmen eines Feldversuchs in einem landwirtschaftlichen Betrieb installiert. Das System besteht aus einem Absorber für die Entfeuchtung und Erwärmung der Zuluft und einem Regenerator, welcher die verdünnte Lösung wieder aufkonzentriert. Der Absorber ist als Plattenwärme- und Stoffübertrager aus Polycarbonat mit einer Oberfläche von ca. 75 m² und der Regenerator als ein Kupferrohrbündel-wärme- und Stoffübertrager ausgeführt. In den Feldversuchen wurden der Absorber sowie der Regenerator vermessen. Die Ergebnisse aus den Absorptionsversuchen wurden mit Ergebnissen eines Finite Differenzen Modells verglichen. Hierbei wurden die Kenngrößen wie übertragener Dampfmassenstrom und die Effektivität betrachtet. Der gemessene Dampfmassenstrom lag zwischen 2,5 und 3 kg/h und war damit erwartungsgemäß niedriger als der berechnete Dampfmassenstrom. Grund hierfür sind die im Modell verwendeten idealisierten Annahmen.

Stichwörter: Absorber, Regenerator, Wärmeübertrager, Rohrbündel, offene Absorption

1 Einleitung

Die Trocknung von landwirtschaftlichen Produkten ist energieintensiv, da für die Trocknung üblicherweise Heizgebläse verwendet werden, die mit herkömmlichen Brennstoffen angetrieben werden. Daneben kommen vereinzelt Wärmepumpen zum Einsatz. Das Ziel bei der Trocknung von landwirtschaftlichen Produkten ist, den Feuchtegehalt zu reduzieren, um die Produkte über einen langen Zeitraum lagern zu können. Es wird geschätzt, dass ca. 20% der Weltgetreideproduktion nach der Ernte durch ineffiziente Behandlung und mangelhafte Umsetzung verloren geht [1].

Auch in Deutschland gibt es einen enormen Trocknungsbedarf, insbesondere in der Landwirtschaft. So werden beispielsweise allein für die Maistrocknung in Deutschland jährlich ca. 3400 GWh fossile Energieträger verbraucht.

Wird der Trocknungsprozess mit einem offenen Absorptionsprozess realisiert, kann Niedertemperaturwärme genutzt werden. Zudem können die Produkte bei einem niedrigen Feuchtegehalt der Prozessluft auf einem vergleichsweise niedrigem Temperaturniveau von z.B. 30°C schonend getrocknet werden.

Bild 1 zeigt eine Prinzipskizze eines offenen Sorptionssystems mit einer wässrigen LiCl-Lösung als Sorptionsmittel. Die LiCl - Lösung kommt im Absorber direkt in Kontakt mit der Umgebungsluft und nimmt den Wasserdampf aus der Luft auf. Dabei verringert sich die Luftfeuchtigkeit und es wird Energie in Form von Wärme frei gesetzt. Die durch die Wasseraufnahme im Absorber verdünnte Lösung kann in einem Regenerator wieder aufkonzentriert werden. Der Regenerator kann mit Hilfe von Solarthermie oder anderer Niedertemperaturwärme bei Temperaturen von ca. 60°C betrieben werden.

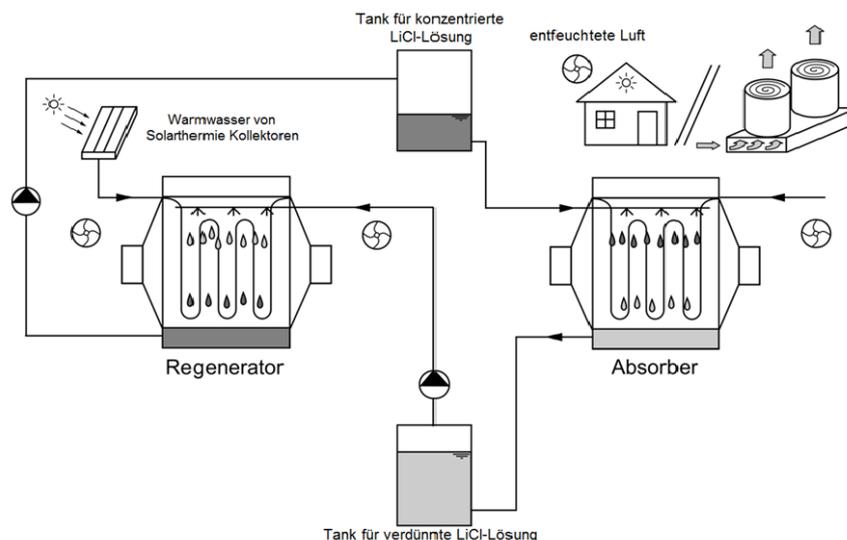


Bild 1: Funktionsweise offener Absorptionsanlagen.

Die Hauptkomponenten; Absorber und Regeneratoren einer offenen Absorptionsanlage können als Schüttungsreaktoren ausgeführt sein [3]. Desweiteren werden seit den 90er Jahren auch Plattenwärmeübertrager mit interner Beheizung bzw. Kühlung als Regenerator bzw. Absorber in der Literatur untersucht. Beispielsweise beschreiben Kipping und Bischoff [4] einen Plattenabsorber aus Kunststoff. Lävemann et al. [5] sowie Lävemann und Peltzer [6] untersuchen eine Platte mit interner Kühlung, wobei die Salzlösung und die Prozessluft im Kreuzstrom angeordnet sind. Die Absorberplatten sind mit Vlies abgedeckt und die Salzlösung wird über ein Membranrohr oberhalb der Absorberplatte verteilt. Weitere experimentelle Untersuchungen von Absorbern aus Kunststoff und beschichteten Aluminiumplatten werden von Löwenstein [7] diskutiert. Neben der Plattenbauweise werden in der Literatur auch Rohrbündel- oder Rohrwendel- Wärme- und Stoffübertrager beschrieben. Dabei dient die Rohroberfläche als Kontaktfläche zwischen der Luft und dem Sorbens. Bei der Regeneration strömt in den Rohren Warmwasser und bei der Absorption gegebenenfalls Kühlwasser. Diese Arten von Absorber und Regenerator werden von verschiedenen Autoren beschrieben. Zum

Beispiel untersucht Khan [8] die Leistungsfähigkeit von intern gekühlten Absorbieren. Jedoch führt die verwendete Lösungsverteilung (Einspritzung) zu Strömungsmittels (carryover).

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das Betriebsverhalten von Absorber und Regenerator einer offenen Absorptionsanlage für Trocknungsanwendungen experimentell zu untersuchen und die Messergebnisse des Absorbers mit einem idealisierten Modell zu vergleichen. Hierbei sollen möglichst niedrige relative Luftfeuchten bei niedrigen Lufttemperaturen nach dem Absorber erreicht werden.

Um Strömungsmittels (carry-over) möglichst zu verhindern, werden die Komponenten so ausgelegt, dass die maximale Luftgeschwindigkeit im Strömungsquerschnitt einen Wert von 2 m/s nicht überschreitet. Die Regeneration erfolgt bei möglichst niedrigen Temperaturen (50 - 70 °C), so dass Wärme von einer Solarthermieanlage genutzt werden kann.

2 Versuchsanlage

2.1 Systemverschaltung

Die mobile Versuchsanlage befindet sich auf dem Gelände der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen, welche als Lehr- und Versuchsbetrieb zur Universität Kassel gehört. Die Demonstrationsanlage ist mobil. Sie befindet sich in einem 20 Zoll (6,058m x 2,438m x 2,591m) Seecontainer. Bild 2 zeigt schematisch die Prozessleittechnik der offenen Absorptionsanlage. Die offene Absorptionsanlage besteht aus drei Kreisläufen:

- der Luftkreislauf (rote Linie)
- der Wasserkreislauf (blaue Linie)
- der Lösungskreislauf LiCl-H₂O (grüne Linie)

Der Absorberluftstrang besteht aus einem Filter, Durchflussmessgerät, Absorber, Ventilator und einem Nachheizregister. Die Luft strömt im Kreuzstrom zu der konzentrierten LiCl-Lösung im Absorber. Der Wasserdampf in der Luft wird vom Sorbens absorbiert. Die dadurch aufgewärmte und entfeuchtete Luft verlässt den Absorber und durchströmt den Ventilator. Anschließend durchströmt die Luft ein Nachheizregister, welches die Luft auf die gewünschte Endtemperatur bringt.

Der Regeneratorluftstrang besteht aus einem Filter und einem Durchflussmessgerät, sowie aus einem Luft-Luft Wärmeübertrager als Wärmerückgewinnungseinheit, dem Regenerator und einem Ventilator. Die Umgebungsluft strömt vorgewärmt durch die aus dem Regenerator ausströmende Luft zum Regenerator. Im Regenerator entzieht die vorgewärmte Luft der LiCl-Lösung Wasserdampf. Anschließend strömt die Luft über den Ventilator und den Wärmerückgewinner wieder in die Umgebung. Die Ventilatoren des Absorbers und Regenerators sind frequenzgesteuert und somit regelbar. Die elektrische Leistung der Ventilatoren und Pumpen ist im Verhältnis zum benötigten Wärmestrom für die Regeneration gering und wird hier nicht näher betrachtet.

Das Warmwasser wird benötigt, um die verdünnte Salzlösung und die Luft jeweils vor dem Eintritt in den Regenerator zu erwärmen. Außerdem wird das Nachheizregister im Absorberstrang, ein Radiator und der Rohrbündelwärmeübertrager (der Regenerator) mit warmem Wasser durchströmt. Der Wärmebedarf wird durch eine Solarthermieanlage bereitgestellt.

Der Salzlösungskreislauf enthält zwei Stränge, die konzentrierte Lösung und die verdünnte Lösung. Im Strang der konzentrierten Lösung wird die Lösung durch eine Membranpumpe und ein magnetisch induktives Durchflussmessgerät sowie über einen Filter zum Verteiler des Absorbers gepumpt. Hinter dem Absorber wird die verdünnte Lösung gesammelt und in einen Behälter für die verdünnte Lösung gepumpt. Die verdünnte LiCl - Lösung wird zuerst in einem Warmwasser – Lösungswärmeübertrager vorgewärmt und danach dem Regenerator zugeführt. Im Regenerator wird die Lösung durch ein Rohrbündelwärmeübertrager zusätzlich erwärmt. Die Temperatur der Lösung erhöht sich, was einen höheren Dampfdruck der Lösung zur Folge hat und somit die Wasserabgabe an die Luft ermöglicht. Daraus wird die Lösung wieder aufkonzentriert und der Prozess beginnt wieder von vorne.

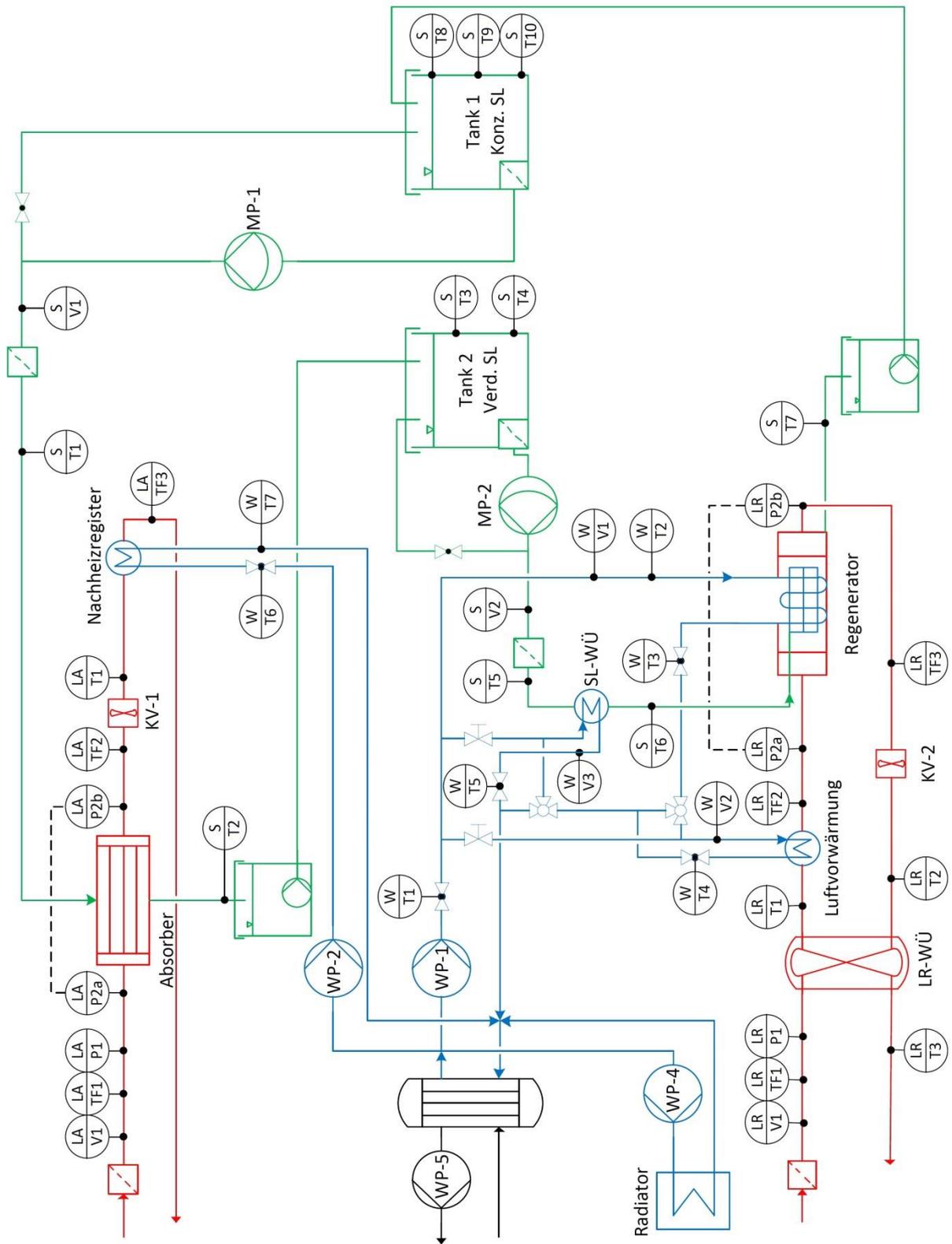


Bild 2: Schematische Darstellung der offenen Absorptionsanlage.

2.2 Komponenten

2.2.1 Absorber (Entfeuchter)

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

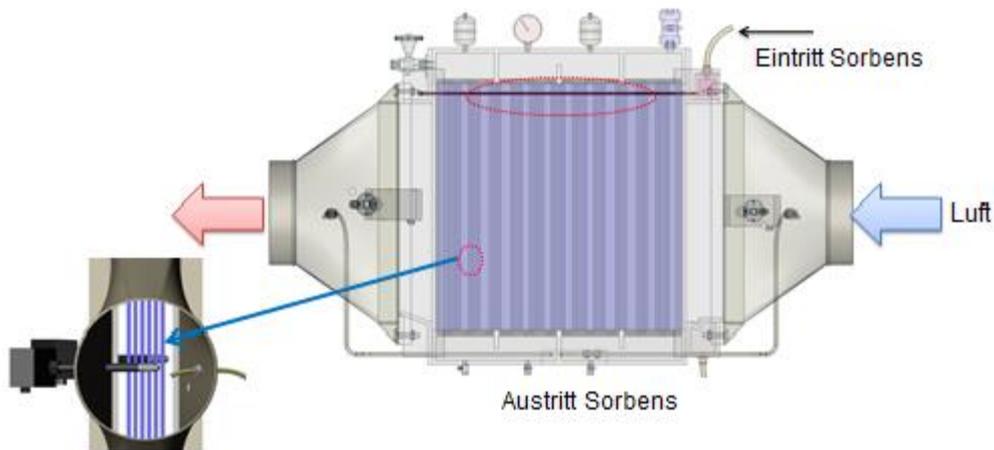


Bild 3: Absorber ausgeführt als Plattenwärmeübertrager.

2.2.1 Regenerator (Desorber)

Der Regenerator ist wie in Bild 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 Poly- Methylmethacrylat (PMMA) Rohren, welche die Lösung über das auf den Rohren aufgebrachte Textil verteilt. Die Herausforderung an das Verteilsystem besteht darin, eine gute Benetzung des Textils zu erreichen.

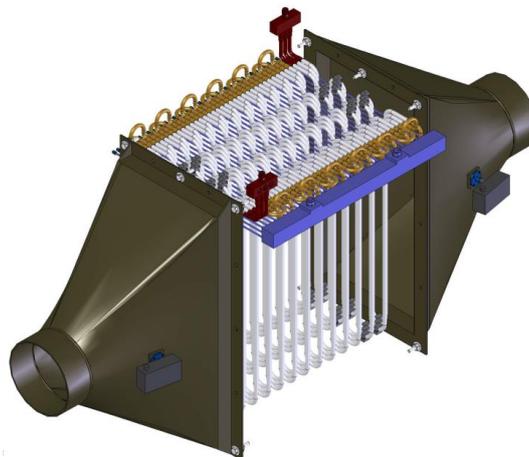


Bild 4: 3D Zeichnung des im Kreuzstrom betriebenen Regenerators (Rohrbündelwärmeübertrager).

2.3 Messtechnik

Zur Untersuchung der mobilen Versuchsanlage wurde diese mit Sensoren ausgestattet (siehe auch Bild 2 oben). Die Messdaten wurden durch Datenlogger erfasst und über die Software LabVIEW visualisiert und gespeichert. Der Luftvolumenstrom durch die Absorber- und Regeneratorstränge wurde mit einem Wirbelfrequenz-Durchflussmessgerät mit einer Messgenauigkeit von $\pm 2\%$ gemessen. Der Volumenstrom von Wasser und der LiCl Lösung wurden mit magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräten mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,5\%$ bestimmt. Der Wasserdampfgehalt der Luft am Ein- und Austritt des Absorbers sowie des Regenerators wurde durch die Messung der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit durch Rotronic HygroFlex mit Messgenauigkeiten von $< \pm 3\%$ für die Luftfeuchtigkeit und $\pm 0,3^\circ\text{C}$ für die Lufttemperatur bestimmt. Der ermittelte Wasserdampfgehalt ist ein wichtiger Parameter, um die Effektivität zu ermitteln. Die LiCl-Konzentration in der Lösung wurde durch die Messung der Temperatur und Dichte der LiCl-Lösung ermittelt. Hierzu wurde ein Anton Paar Dichtemessgerät (Coriolis) mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,001\text{g/cm}^3$ eingesetzt. Desweiteren wurden die Temperaturen an allen relevanten Positionen mittels Widerstandstemperaturfühlern (Pt100) erfasst.

2.3 Durchgeführte Versuche

Es wurden unter anderem drei Absorbermessreihen durchgeführt. Die Eingangsparameter sind in der Tabelle 1 aufgezeigt. Die Messungen wurden jeweils gestartet, sobald ein quasi-stationärer Zustand erreicht wurde. Die Daten wurden mit einem Zeitintervall von 10 s aufgezeichnet.

Tabelle 1: Eintrittsparameter für die Absorberversuche im Feldtest.

| Vers. | $\dot{m}_{\text{Lsg}}(\text{kg/h})$ | $\dot{m}_{\text{Luft}}(\text{kg/h})$ | $T_{\text{Luft}}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{\text{Lsg}}(^{\circ}\text{C})$ | $x_{\text{Luft,ein}}(\text{kg/kg})$ | $\xi_{\text{Lsg,ein}}(\text{kg/kg})$ |
|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 33 | 969 | 12 | 11 | 0,007 | 0,41 |
| 2 | 100 | 969 | 11 | 11 | 0,007 | 0,41 |
| 3 | 49 | 985 | 17 | 23 | 0,008 | 0,41 |

Die Leistungsfähigkeit für die Stoffübertragung des Absorbers wurde zum einen durch den übertragenen Wasserdampfmassenstrom

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{\text{tr}}(x_{\text{ein}} - x_{\text{aus}}) \quad (1)$$

und zum anderen durch die Effektivität bewertet:

$$\varepsilon = \frac{x_{\text{ein}} - x_{\text{aus}}}{x_{\text{ein}} - x_{\text{sat},T,\text{Lsg,ein}}} \quad (2)$$

Hierbei ist $x_{\text{sat},T,\text{Lsg,ein}}$ die Gleichgewichts-Wasserbeladung zwischen die Luft und LiCl-Lösung.

3 Modellierung

Die durchgeführten Absorbermessungen wurden mit Ergebnissen eines idealisierten Finite-Differenzen Modells für die Plattengeometrie verglichen. In diesem Modell wird die Wärme- und

Stoffübertragung in einem drei-dimensionalen Netzwerk in den Fluiden sowie an der Phasengrenze berechnet. Das Modell berücksichtigt jeweils den konvektiven Transport in Strömungsrichtung der Fluide und den diffusiven Transport senkrecht zur Strömungsrichtung. Es handelt sich um ein physikalisches Modell, das ausschließlich auf Stoff- und Transportgrößen basiert. Das Modell nimmt eine laminare Strömung aller Fluide an und ist somit in der vorliegenden Form nur für Plattengeometrien geeignet. Desweiteren wird eine gleichmäßige Strömungsverteilung in allen Fluiden und somit eine ideale Benetzung des Sorbens auf dem Textil vorausgesetzt.

Der reale Anwendungsfall in der mobilen Versuchsanlage weicht allerdings von diesen idealisierten Annahmen ab. Dementsprechend sind niedrigere Werte für den übertragenen Dampfmassenstrom und für die evaluierten Effektivitäten in den Versuchen im Vergleich zum Modell zu erwarten.

4 Ergebnisse

In Bild 5 ist die Erhöhung der Lufttemperatur und die Abnahme des Wassergehaltes der Luft beispielhaft im Verlauf eines Absorptionsprozesses dargestellt. Ein stationärer Zustand stellt sich nach ca. 1 bis 1,5 Stunden ein. Es ist zu erkennen, dass die Luft auf eine Wasserbeladung von ca. 4,5 g/kg getrocknet wird.

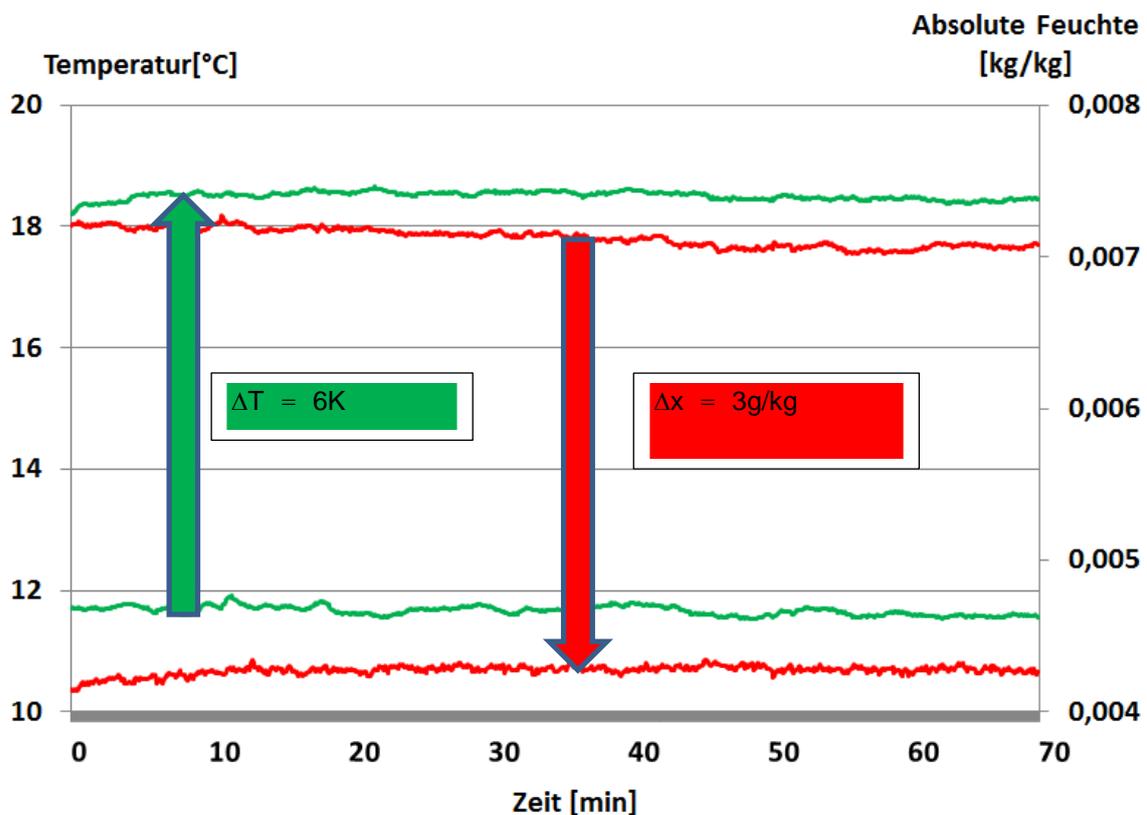


Bild. 5: Lufttemperaturen und Feuchten im zeitlichen Verlauf.

In Bild 6 ist der übertragene Dampfmassenstrom, der sich aus Messergebnissen der Lufttemperaturen, -volumenströme und -feuchten ergibt, für die drei Absorptionsversuche dargestellt (siehe auch Tabelle 1 oben). Die Eingangswerte der drei Messungen unterscheiden sich, da die Umgebungsluftzustände bei der Feldtestmessung witterungsbedingt jeweils unterschiedlich waren. Der übertragene Wasserdampfmassenstrom müsste unter gleichen Bedingungen mit zunehmendem LiCl-Lösungsmassenstrom ansteigen. Darüber hinaus sind in Bild 6 die berechneten Werte mit den gemessenen Werten verglichen. Aufgrund der idealisierten Modellannahmen sind die berechneten Werte für den Dampfmassenstrom erwartungsgemäß deutlich höher als die experimentell ermittelten Werte. In den vorliegenden Messungen erreicht der Dampfmassenstrom ca. 70% der jeweils unter idealisierten Bedingungen berechneten Werte. Damit wurden vorherige Labormessergebnisse bestätigt. Diese Abweichung kommt insbesondere einerseits durch die ungleichmäßige Strömung der Fluide (Benetzung des Textils durch die LiCl-Lösung) und andererseits durch die real bestehende Quervermischung der Fluide zur Strömungsrichtung zustande. Diese Effekte sollen zukünftig näher untersucht werden.

Bei Regenerationsversuchen wurde zum Beispiel bei Temperaturen des Heizwassers von 79°C ein Dampfmassenstrom von 1,6kg/h von der LiCl-Lösung an die Luft abgegeben.

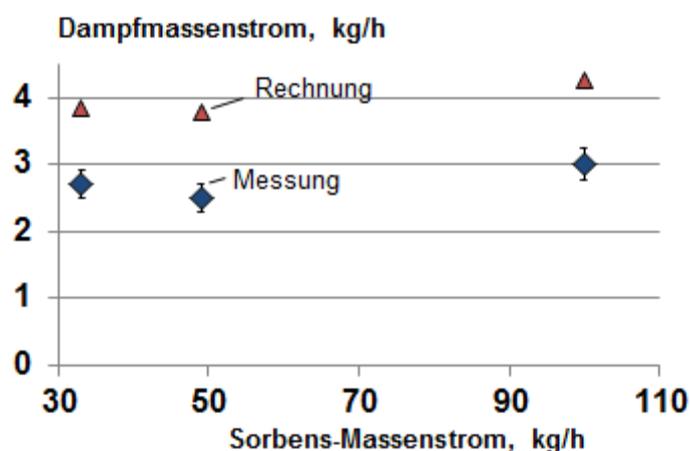


Bild. 6: Übertragener Wasserdampfmassenstrom als Funktion des LiCl-Lösungsmassenstroms.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Betriebsverhalten der Hauptkomponenten Absorber und Regenerator einer mobilen offenen Absorptionsanlage mittels Experimenten und Modellen untersucht. Sowohl der Absorber als auch der Regenerator wurden im Rahmen von Vorgängerprojekten sowie der aktuellen Arbeiten entwickelt. Der Absorber wurde hierbei als Plattenwärmeübertrager und der Regenerator als Rohrbündelwärmeübertrager mit interner Beheizung ausgeführt. Zur besseren Benetzung in diesen Apparaten wurden die Platten bzw. Rohrbündel mit einem Textil bespannt.

Der Absorber der mobilen Versuchsanlage wurde in dieser Arbeit vermessen. Hierbei standen die Kenngrößen übertragener Dampfmassenstrom sowie die Effektivität im Vordergrund. Der übertragene Dampfmassenstrom betrug zwischen 2,5 und 3 kg/h. Diese gemessenen Kenngrößen wurden mit den Ergebnissen eines Finite-Differenzen-Modells verglichen. Die idealisierten Annahmen im Modell

führen wie erwartet zu Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Werten. In den vorliegenden Messungen erreicht der Dampfmassenstrom ca. 70% der jeweils unter idealisierten Bedingungen berechneten Werte. Diese Abweichung lässt sich insbesondere einerseits durch die ungleichmäßige Strömung der Fluide sowie andererseits durch die real bestehende Quervermischung der Fluide zur Strömungsrichtung erklären. In Zukunft sollen weitere Messreihen durchgeführt und die Wärme- und Stoffübertragung für unterschiedliche Eingangsbedingungen und Konstruktionen (Geometrien und Materialien) untersucht werden. Zudem ist geplant, das FD-Modell so zu erweitern, dass auch reale Strömungsverteilungen und Benetzungen geeignet abbildet werden können.

Formel- und Abkürzungsverzeichnis

| | Bedeutung | Einheit |
|---------------|------------------|-------------------|
| LA | Absorberluft | |
| RA | Regeneratorluft | |
| \dot{m}_v | Dampfmassenstrom | kg/h |
| KV | Kanalventilator | |
| MP | Membranpumpe | |
| S | Sorbens | |
| T | Temperatur | °C |
| V | Volumenstrom | m ³ /h |
| WÜ | Wärmeübertrager | |
| ε | Effektivität | |

Literaturverzeichnis

- [1] Owen, B.J., The drying of agricultural products, transactions Institution of Chemical Engineers, Vol. 6, pp. 168-175, 1928.
- [2] Troger, J. M. and Butler, J. L., Solar drying of peanuts, Solar Crop Drying Conference Proceedings, Raleigh, N.C, pp. 32-43
- [3] S. Alizadeh, H. R. Haghgou, A. M. Goudarzi, O. Asgari A Study of Solar Crop Drying Systems Using Liquid Desiccant
- [4] Kipping, D. E., Bischoff, M., 1993. Entwicklung von umweltfreundlichen, langzeitstabilen, materialverträglichen Betriebsmedien für offene Raumklimaanlagen über Sorption als Ersatz für FCKW, Abschlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben Nr. 032 91 5 1 A, Solvay Deutschland GmbH, Hannover.
- [5] Lävemann et al., 1993. Klimatisierung über Sorption, Endbericht zur Phase I des Forschungsvorhabens Nr.: 032 9151 B des BMFT.
- [6] Lävemann, E. and Peltzer, M., 2005. Solar Air Conditioning of an Office Building in Singapore using Open Cycle Liquid Desiccant Technology, 1st International Conference on Solar Air Conditioning, Staffelstein.
- [7] Lowenstein A., Slayzak S., Kozubal E. (2006), A Zero Carryover Liquid Desiccant Air

Conditioner for Solar Applications, ASME/Solar06, Denver, USA

- [8] Khan, A.Y., 1998. Cooling and dehumidification performance analysis of internally-cooled liquid desiccant absorbers, *Applied Thermal Engineering* 19 (5): 265-281.
- [9] Khan, A.Y. and Sulsona, F. J., 1998. Modeling and parametric analysis of heat transfer performance of refrigerant cooled desiccant absorbers." *International Journal of Energy Research* 22 (9): 813-832
- [10] K.Gommed, G. Grossman, F. Ziegler Experimental investigation of a LiCl – water Open Absorption System for Cooling and Dehumidification
- [11] Jaradat et al., 2008. A novel Regenerator Design for a liquid Desiccant Air Conditioning System. EuroSun 2008, Lisbon, Portugal.
- [12] Lazzarin et al., 1996. Theoretical Analysis of an Open-Cycle Absorption Heating and Cooling System, *International Journal of. Refrigeration* 19 (3): 160-167.
- [13] Öberg, V. and Goswami, D., 1998. A Review of Liquid-Desiccant Cooling, in *Advances in Solar Energy*, American Solar Energy Society, Boulder, Colorado.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen der Förderinitiative Speicherforschung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03SF 0444 unterstützt.