

Auslegung von solarthermisch unterstützten offenen Absorptionsanlagen zur Kondensatvermeidung

W. Mandow, D. Fleig, U. Jordan
Universität Kassel, Institut für thermische Energietechnik
34109 Kassel
Tel: +49 (0) 561 804 3890
E-Mail: solar@uni-kassel.de
Internet: www.solar.uni-kassel.de

1. Einleitung

Untersuchungsgegenstand ist der Einsatz eines offenen Flüssigsorptionssystems zur Raumluftentfeuchtung für die Kondensatvermeidung in industriellen Anwendungen. Das Flüssigsorptionssystem kann mit vergleichsweise niedrigen Regenerationstemperaturen ab ca. 50°C betrieben werden. Wegen der deutlich höheren Feuchtelasten in den Sommermonaten ergeben sich für solare Entfeuchtungsanlagen vergleichsweise hohe solare Deckungsraten.

In diesem Beitrag wird ein in TRNSYS implementiertes Systemmodell einer Flüssigsorptionsanlage beschrieben, das mit einer thermischen Solaranlage gekoppelt ist. Mithilfe von TRNSYS-Simulationen wurde die solare Deckungsrate zum Erreichen einer vorgegebenen Taupunkttemperatur bei Infiltrationsvolumenströmen in das Gebäude von 100 m³/h bis 1000 m³/h ermittelt. Es werden sowohl adiabate als auch intern gekühlte Absorptionsprozesse betrachtet. Die Kühlwassertemperatur wird vereinfacht als Funktion der Umgebungslufttemperatur abgebildet.

2. Untersuchte Absorptionsanlage

In der Absorptionsanlage wird Luft im Absorber an einer hygroskopischen Flüssigkeit, einer wässrigen LiCl-Lösung (Sorbens) entlang geleitet und dabei entfeuchtet. Ziel der Untersuchungen ist es, die Prozessluft auf einen vorgegebenen Wassergehalt (Taupunkt) zu entfeuchten. Der Absorptionsprozess wird durch niedrige Temperaturen begünstigt

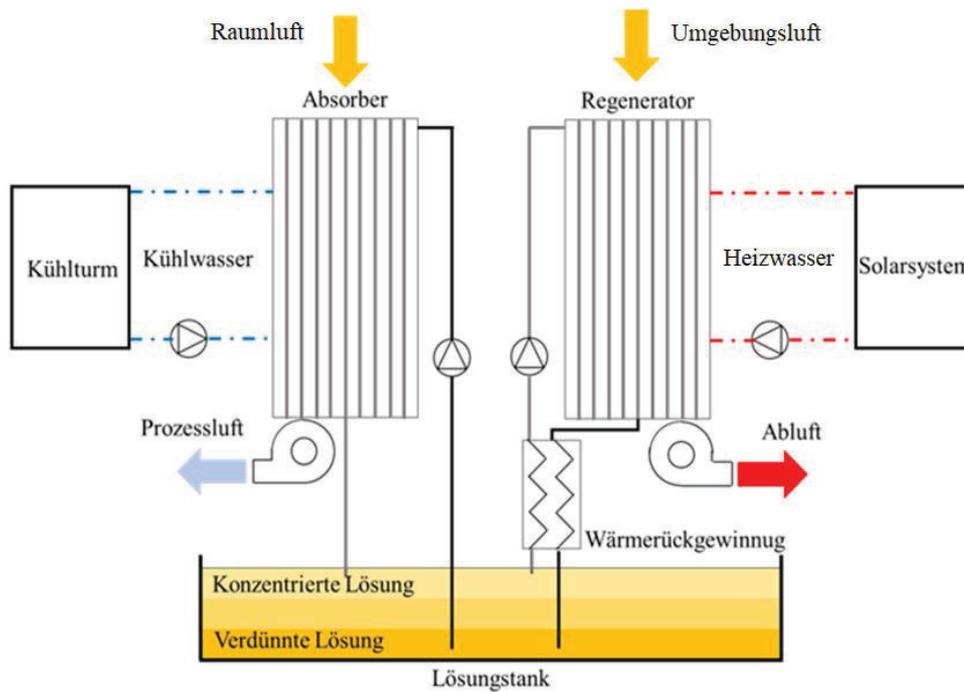


Abb. 1: Offenes Sorptionssystem mit Sorbensspeicher und internem Wärmeübertrager sowie intern gekühltem Absorptions- und intern erwärmten Regenerationsprozess.

Tab. 1: Volumina der Komponenten (Absorber und Regenerator) und Nennvolumenströme

Komponente	Volumen	Nennluftvolumenstrom	LiCl _{aq} -Volumenstrom
Absorber	105 Liter	2000 m ³ /h	320 l/h
Regenerator	40 Liter	600 m ³ /h	230 l/h

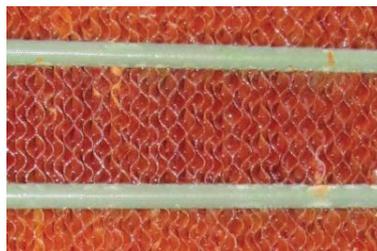


Abb. 2: Struktur der Stoffübertragungsfläche mit Wärmeübertragungsrohren

und daher ggf. intern gekühlt. Das während des Absorptionsprozesses verdünnte Sorbens wird anschließend mit Niedertemperaturwärme im Regenerator aufkonzentriert. Die Flüssigsorptionsanlage (AIL Research, USA) besteht aus einem Absorber, einem baugleichen, aber deutlich kleineren Regenerator, einem internen Wärmeübertrager zur

Wärmerückgewinnung und einer Sammelwanne (Sorbensspeicher), die sich unterhalb der Komponenten befindet (Abb. 1). Im internen Wärmeübertrager wird das in den Regenerator strömende Sorbens von dem dort austretenden Sorbens vorerwärmt. Der Wärmeübertrager befindet sich in der Sammelwanne und trennt dort die beiden Bereiche mit höherem bzw. geringerem Salzmassenanteil des Sorbens voneinander ab.

Einige Maße der Komponenten sind in Tab.1 zusammengestellt.

Der Absorber und der Regenerator bestehen aus einem Glasfasermaterial in Wabenstruktur, das vom Sorbens überströmt wird (Abb. 2)

3. Modellierung

3.1 Flüssigsorptionsanlage

Zur Beschreibung der Wärme- und Stoffübertragung im Absorber und Regenerator der Flüssigsorptionsanlage wurde ein TRNSYS-Komponentenmodell entwickelt [1]. Das zugrundeliegende Effektivitätsmodell basiert auf semi-empirischen Ansätzen zur Berechnung der Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten an der Phasengrenze zwischen Luft und Sorbens. Die Temperatur und der LiCl-Massenanteil des Sorbens an der Phasengrenzen werden iterativ berechnet.

Die Komponentenmodelle von Absorber und Regenerator sowie Speicher und Wärmerückgewinnung wurden in TRNSYS 16 zunächst zu einem Systemmodell der Flüssigsorptionsanlage verschaltet. Der Sorbensspeicher wird mit jeweils homogener Temperatur und homogenem Massenanteil der Salzlösung in den beiden Speicherbereichen (als zwei getrennte Speicher) abgebildet. Das Systemmodell der Sorptionsanlage wurde anhand von Labormessungen validiert.

Abb. 3 zeigt beispielhaft gemessene und simulierte Werte für die Temperaturerhöhung sowie die Entfeuchtungsbreite der Luft im Absorber ($\Delta T_{L,abs}$: blaue Kurven, Δx_{abs} : braune Kurven) und die Temperaturabsenkung des Heizwassers im Regenerator ($\Delta T_{hw,reg}$: rote Kurven). Eintrittswerte für die Simulationsrechnung sind neben der Umgebungstemperatur und der Wasserbeladung der Luft, die Heiz- und Kühlwasser-Eintrittstemperaturen, sowie Massenströme der Luft, des Heizwassers und des Kühlwassers. Die Eintrittswerte für die in Abb. 3 gezeigte Messung sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Tab. 2: Eintrittswerte für Messung und Simulation. T: Temperatur, x: Wasserbeladung der Luft; $\xi = m_{\text{LiCl}}/m_{\text{Sor}}$: Massenanteil LiCl im Sorbens. Indizes: L: Luft, Sor: Sorbens, W: Wasser

	$T_{L,\text{in}}$	$x_{L,\text{in}}$	$\dot{m}_{L,\text{in}}$	$T_{\text{Sor},\text{in}}$	$\xi_{\text{Sor},\text{in}}$	$\dot{m}_{\text{Sor},\text{in}}$	$T_{W,\text{in}}$	\dot{m}_W
	°C	kg _w /kg _{trL}	kg/h	°C	%	kg/h	°C	kg/h
Absorber	25	0.0139	1183	22	29	322	25	2000
Regenerator	25	0.0116	358	26	28	230	60	984

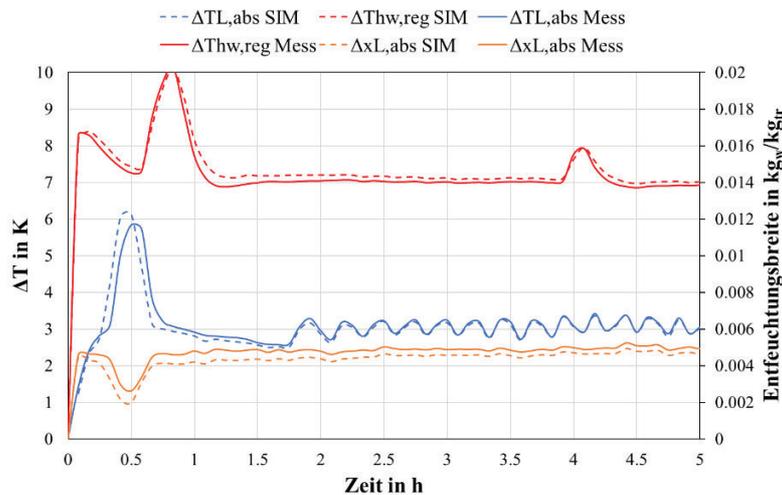


Abb. 3: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen. Temperaturerhöhung der Luft sowie Entfeuchtungsbreite im Absorber und Temperaturabsenkung des Heizwassers im Regenerator.

In Abb. 3 ist zu erkennen, dass die Heizwassertemperatur während der Messung zweimal kurzzeitig erhöht und der Kühlwassermassenstrom einmal kurzzeitig unterbrochen wurde. Der gemessene Verlauf der entsprechenden Temperaturänderungen und der Entfeuchtungsbreite der Luft im Absorber wird vom Simulationsmodell gut abgebildet. Die Abweichung der berechneten Entfeuchtungsbreite vom Messwert liegt unter 5,5%.

Die Entfeuchtungsbreite der Luft beträgt ca. 0,005 kg_w/kg_{tr}, was bei dem gegebenen Prozessluftvolumenstrom von 1000 m³/h einer Entfeuchtungsleistung von 5,9 kg_w/h entspricht. Die Regenerationstemperatur beträgt $T_W = 60$ °C.

3.2. Gesamtsystemsimulation: Gebäude mit Sorptions- und Solaranlage

Das oben beschriebene Systemmodell für die Flüssigsorptionsanlage wurde in das TRNSYS IEA-SHC Task 32-Modell [2] einer Solaranlage implementiert. Das Gebäude

wurde zudem als einfaches Ein-Zonen-Modell ($V = 1000 \text{ m}^3$, Standort: Stuttgart) abgebildet.

Die Sorptionsanlage entfeuchtet die Raumluft im Umluftbetrieb mit einem Luftvolumenstrom im Absorber von $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer konstanten Infiltrationsrate in das Gebäude. Die Infiltrationsrate wurde zwischen $0,1 \text{ h}^{-1}$ und 1 h^{-1} variiert. Die Wasserbeladung der Raumluft dieser Anwendung soll $x = 0,006 \text{ kg}_w/\text{kg}_{\text{trL}}$ (Taupunkttemperatur: T_{tau} ca. $6,6^\circ\text{C}$) nicht überschreiten. Diese Taupunkttemperatur der Umgebungsluft wird ohne Luftkonditionierung am Standort Stuttgart an ca. einem Drittel der Stunden im Jahr überschritten. Das Sorbens wird mit einem Volumenstrom $300 \text{ m}^3/\text{h}$ regeneriert. Der Sorbensmassenstrom beträgt 340 kg/h im Absorber und 230 kg/h im Regenerator.

In Abb.4 sind Monatssummen der Einstrahlung auf die geneigte Fläche ($\beta=30^\circ$) und des Regenerationswärmebedarfs im Jahresverlauf dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Regenerationswärmebedarf ganz überwiegend im Sommerhalbjahr auftritt. Der maximale monatliche Regenerationswärmebedarf der untersuchten Anlage liegt bei einem Infiltrationsvolumenstrom von $500 \text{ m}^3/\text{h}$ bei 1750 kWh/Monat , der jährliche Regenerationswärmebedarf liegt bei ca. $6,6 \text{ MWh/a}$.

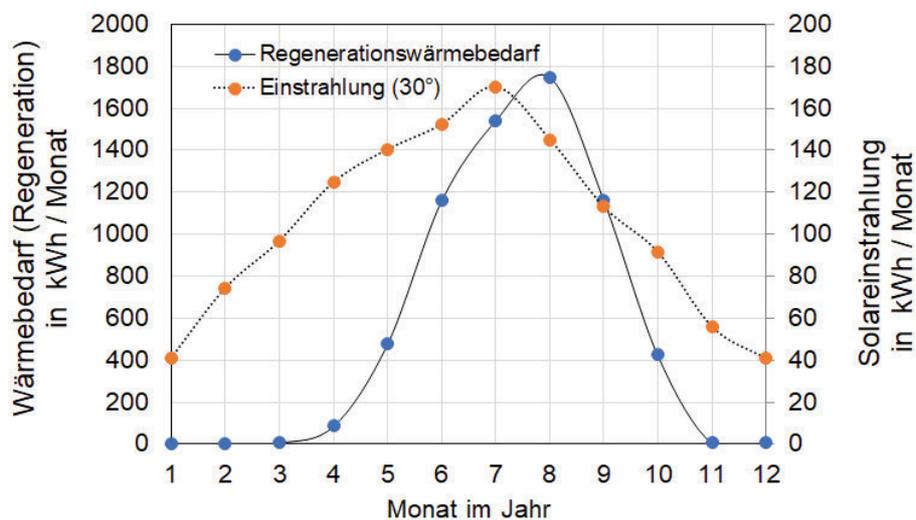


Abb. 4: Einstrahlung auf die geneigte Fläche ($\beta=30^\circ$, Stuttgart) und Regenerationswärme für einen Infiltrationsvolumenstrom von $500 \text{ m}^3/\text{h}$; $x_{\text{sol}} = 0,006 \text{ kg}_w/\text{kg}_{\text{trL}}$.

Die Regenerationsluft wird im Modell solarthermisch erwärmt. Eine elektrische Nachheizung der Luft wurde nicht in TRNSYS modelliert. Zur Berechnung der Solaren Deckungsrate wurde jedoch der elektrische Energiebedarf, der zum Erwärmen der Regenerationsluft notwendig ist, um die Soll-Taupunkttemperatur der Raumluft zu erreichen, bilanziert.

Die Solare Deckungsrate wurde definiert als Quotient der vom Solarspeicher bereitgestellten Wärme und der insgesamt solarthermisch und zur elektrischen Nachheizung der Luft bereitgestellten Energie:

$$f_{sol} = Q_{\text{Speicher,aus}} / (Q_{\text{Speicher,aus}} + E_{el,\text{Luft}})$$

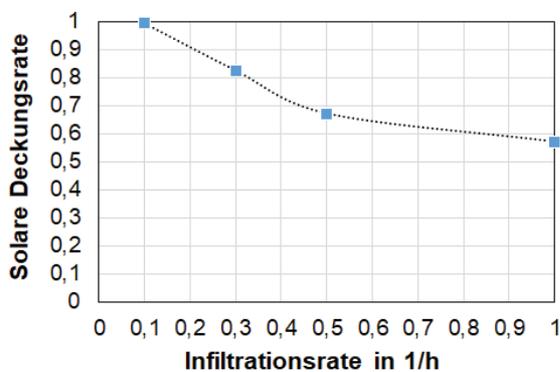


Abb. 5: Solare Deckungsrate in Abhängigkeit von der Infiltrationsrate, $A_{\text{Kol}} = 20 \text{ m}^2$, $V_{\text{Sp}} = 1,2 \text{ m}^3$.

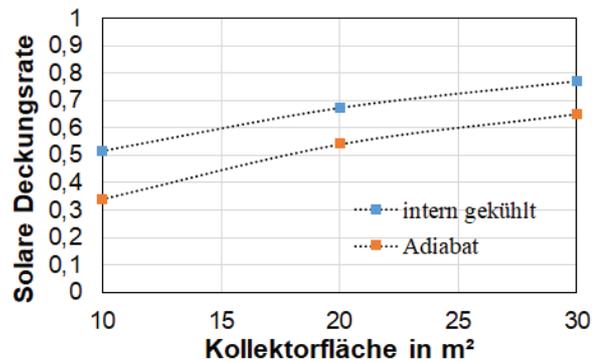


Abb. 6: Solare Deckungsrate in Abhängigkeit von der Kollektorfläche mit und ohne interne Kühlung, Kühlwasserleistung: $Q_{\text{max}} = 20 \text{ kW}$, mit $T(\text{Kühlwasser}) = T_{\text{amb}} - 3 \text{ K}$, $V_{\text{Sp}} = 1,2 \text{ m}^3$, Infiltrationsvolumenstrom: $500 \text{ m}^3/\text{h}$.

Zur vereinfachten Modellierung der internen Kühlung des Sorptionsprozesses wurde angenommen, dass die Eintrittstemperatur des Kühlwassers 3K unterhalb der Umgebungstemperatur liegt.

Abb. 5 zeigt Ergebnisse von Simulationsrechnungen mit einer Kollektorfläche von 20 m^2 und einem Speichervolumen von $1,2 \text{ m}^3$. Die Solare Deckungsrate ist in Abhängigkeit von der Infiltrationsrate dargestellt. Bei sehr geringen Infiltrationsraten von $n_{inf} = 0,1 \text{ h}^{-1}$ (Infiltrationsluftvolumenstrom: $100 \text{ m}^3/\text{h}$, $x_{\text{sol}} = 0,006 \text{ kg}_w/\text{kg}_{tr}$) wird nahezu vollständige Solare Deckung erreicht ($f_{sol} > 99\%$). Für $n_{inf} = 1 \text{ h}^{-1}$ sinkt die Solare Deckungsrate auf $f_{sol} = 57\%$.

Ohne Sorptionsanlage wird der Taupunkt der Raumluft in 2775 Stunden im Jahr überschritten. Dieser Zeitraum wird bei den in Abb. 5 dargestellten Infiltrationsraten ohne elektrische Nachheizung um 33% ($n_{inf} = 1 \text{ h}^{-1}$) bis 99% ($n_{inf} = 0,1 \text{ h}^{-1}$) durch die Flüssigsorptionsanlage reduziert. Mit elektrischer Nachheizung wird die Taupunktüberschreitung vollständig unterbunden.

Darüber hinaus wurde die Kollektorfläche zwischen 10 und 30 m² variiert und der Einfluss der internen Kühlung untersucht, siehe Abb. 6. Die Solare Deckungsrate steigt von ca. 50% auf 78% für den intern gekühlten und von ca. 32% auf 65% für einen adiabaten Absorptionsprozess. Die spezifische Kollektorerträge liegen im Bereich von 244 bis 423 kWh/m²a.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird eine Flüssigsorptionsanlage zur Raumluftentfeuchtung für industrielle Anwendungen beschrieben. Die Anlage wurde experimentell und mithilfe von TRNSYS-Simulationen untersucht. Mit Systemsimulationen wurde z.B. bei einem Infiltrationsvolumenstrom von 500 m³/h, $A_{Kol} = 20 \text{ m}^2$, $V_{Sp} = 1,2 \text{ m}^3$ und einem intern gekühlten Absorptionsprozess eine Solare Deckungsrate von 67% ermittelt. Eine Überschreitung der Taupunkttemperatur im Raum kann mit der untersuchten Anlage mit einer elektrischen Nachheizung vollständig unterbunden werden.

Die interne Kühlung hat einen großen Einfluss auf die Effektivität des Absorptionsprozesses. Bei den oben genannten Randbedingungen verringert sich die Solare Deckungsrate ohne interne Kühlung um ca. 12-17 %-Punkte. Bei einem Infiltrationsvolumenstrom von 100 m³/h wird bei einem intern gekühlten Absorptionsprozess eine nahezu vollständige Solare Deckung mit nur 36 h/a Taupunktüberschreitung (ohne den Einsatz einer elektrischen Nachheizung) erreicht.

Ausblick: In zukünftigen Untersuchungen soll die Nachheizung in das TRNSYS-Modell implementiert werden und es sollten weitere Sensitivitätsanalysen zur Auslegung der Flüssigsorptionsanlage sowie der Solaranlage und zum Einfluss der Regelung der Regenerationstemperatur durchgeführt werden. Außerdem sollen verschiedene Varianten der internen Kühlung untersucht werden.

Danksagung

Das Forschungsprojekt wird durch ein Promotionsstipendium der DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprojekts OpenSorp (AZ 03SF 0444) gefördert.

Literaturverzeichnis

1. Mandow, W.; Mützel, M.; Fleig, D.; Lowenstein, A.; Jordan, U.: Comparison of Modelled and Measured Heat and Mass Transfer in a Liquid Desiccant Air-Conditioning System, Eurosun2018, submitted.
2. Richard, H.; Haller, M.: The Reference Heating System, the Template Solar System of Task 32, Report A2 of Subtask A.