

Jahresbericht 2005, 15. Dezember 2005

# Sorptionsspeicher

Temperaturprofile / Leistung und Energiedichte

Autor und Koautoren	P. Ganterbein, A. Luzzi
beauftragte Institution	Institut für Solartechnik SPF, HSR Hochschule für Technik Rapperswil
Adresse	Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil
Telefon, E-mail, Internetadresse	055 222 48 21, <a href="mailto:info@solarenergy.ch">info@solarenergy.ch</a> , <a href="http://www.solarenergy.ch">www.solarenergy.ch</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100809, 150938
Dauer des Projekts	1. 7. 2003 - 31. 12. 2006

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Leistung eines thermisch getriebenen Wärmepumpen-Sorptionsspeichers hängt von angeschlossenen Wärmequellen und der konstruktiven Gestaltung des korreliert ablaufenden Stoff- und Wärmetransportes ab. Dazu wurden zwei neue Sorptionsmodule hergestellt und ein System eingebaut. Eines der Module besteht aus 6 parallel geschalteten, zylindrischen Wärmetauscher-Patronen und das andere aus einem Lamellenwärmetauscher. Die Wärmetauscher nehmen den Feststoff-Sorbent auf. Die Wärmetauscher-Patronen haben eine Anströmfläche von  $0.55 \text{ m}^2$  und nehmen 7 kg Sorbent Molekularsieb Zeolith 13 X auf. Der Lamellenwärmetauscher hat eine Anströmfläche von  $0.43 \text{ m}^2$  und kann 10.8 kg Zeolith 13 X aufnehmen. Als Sorbat wird Wasser bzw. Wasserdampf eingesetzt. Zur Reduktion der Wärmeverluste durch Wärmeleitung und Wärmekonvektion wurde ein Hüllrohr aus dünnwandigem, rostfreiem Stahl gefertigt. Zwischen diesem und dem äusseren Schutzrohr ist Vakuum. Der Kondensator besteht aus einem Plattenwärmetauscher mit einer Oberfläche von  $1.6 \text{ m}^2$ .

In der Adsorption von Wasserdampf auf trockenem Molekularsieb Zeolith 13 X wurden im Leerlaufbetrieb im Glykolkreislauf eine Temperaturerhöhung von  $24.4^\circ\text{C}$  auf  $66.4^\circ\text{C}$  bzw. von  $22.4^\circ\text{C}$  auf theoretisch  $82.4^\circ\text{C}$  erreicht. Diese Erhöhung liegt zwar im nutzbaren Bereich, sinkt aber bei Entnahme von Wärmeenergie ab, weil die Leistung durch den tiefen Wärmeübergang limitiert ist. Mit dem Lamellenwärmetauscher wurde eine Heiz-Leistung von 800 W erreicht. Die Energiedichte ist von Temperatur und Sättigungszustand des Molekularsieb Zeolith 13 X, sowie vom Dampfdruck des Sorbates abhängig. In den durchgeführten Versuchen lag sie, bezogen auf das Sorptionsmodul, mit  $60.5 \text{ kWh/m}^3$  im Bereich des Wassers.

Der Kühleffekt im Wassertank wird durch die Reduktion der Austrittstemperatur des zu kühlenden Wassers sichtbar. Diese Austrittstemperatur erreicht  $10^\circ\text{C}$  bis  $11.2^\circ\text{C}$ , nachdem sie am Anfang  $20^\circ\text{C}$  betragen hat und liegt ebenfalls im zur Kühlung nutzbaren Bereich. Der bereits nach einer Betriebszeit von 250 s bis 300 s einsetzende Anstieg dieser Austrittstemperatur des Wassers ist auf die Sorbent-Stoffeigenschaften sowie die gewählte Betriebsart zurück zu führen. Das System strebt einen stabilen Zustand an.

Die Kühlleistungsdichte des Zylinder-Patronen Moduls, bezogen auf die Anströmfläche des Sorptionsmoduls, steigt (in Abhängigkeit von der Wassertemperatur im Wassertank) von  $1.8 \text{ kW/m}^2$  bei  $10^\circ\text{C}$  auf  $2.8 \text{ kW/m}^2$  bei  $20^\circ\text{C}$  bis  $30^\circ\text{C}$ .

Die erreichten Resultate wurden am IEA Task 32 Treffen im Mai 2005 in Lleida (Spanien) und im November 2005 in Fontainebleau (Frankreich) publiziert.

In den folgenden Versuchen werden Zyklen mit vordefinierten Temperaturniveaus gemessen.

## Projektziele

Der solare Deckungsgrad des thermischen Energiebedarfs eines Hauses soll mit einem solar betriebenen Sorptionsspeicher / Wärmepumpenspeicher erhöht werden.

Die Leistung eines Sorptionsspeichers hängt von den verwendeten Materialien, den zur Verfügung stehenden Wärmequellen, der Wahl des Systemtyps und der Gestaltung der Systembauteile ab. In Fig. 1 ist eine thermische Solaranlage mit integriertem Sorptionsspeicher schematisch dargestellt.

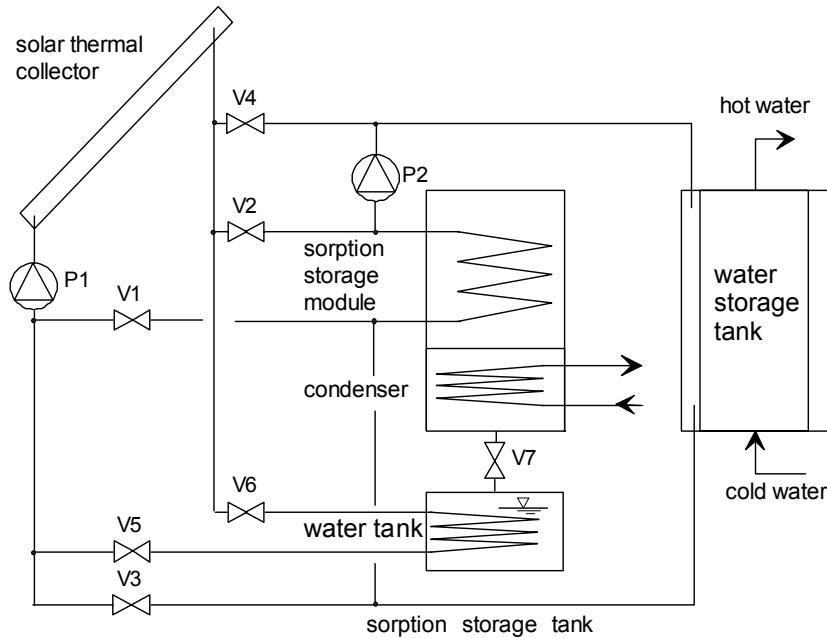


Fig. 1: Schematische Darstellung eines geschlossenen Sorptionsspeichers, der in eine thermische Solaranlage integriert ist.

Der Sorptionsspeicher besteht aus einem Sorptionsmodul, einem Kondensator und einem Wassertank mit integriertem Wärmetauscher. In Fig. 2: sind die für den Aufbau eines Sorptionsspeichers notwendigen Apparate abgebildet. Dabei handelt es sich um Beispiele, welche zum Verständnis der folgenden Ausführungen dienen.

Der Wärmetauscher im Wassertank des Speichers kann über die Ventile V5 und V6 auch an einer anderen Wärmequelle als dem Sonnenkollektor angeschlossen werden. Diese Wärmequelle kann z.B. auch ein zu kührender Raum eines Gebäudes sein.

Da der Prozess beim Partialdruck des Wassers abläuft, sind die Bauteile des Systems in Vakuumausführung gebaut. Die Leckrate der Vakuumapparatur muss so klein wie möglich sein. Bei Verwendung fester Sorptionsmaterialien ist der Druckverlust des durch das Sorptionsmaterial strömenden Wasserdampfs zu berücksichtigen. Der maximal zur Verfügung stehende Druckunterschied entspricht dem Wasserdampfdruck.

Zur Steigerung der Systemleistung wurden zwei Sorptionsmodule hergestellt und in die Apparatur eingebaut, sowie Messungen durchgeführt. Zur Dimensionierung dieser Labor-Sorptionsmodule und um eine Skalierung machen zu können, wurden die im vergangenen Berichtsjahr erreichten Resultate genutzt, sowie eine Druckverluststrecke aufgebaut.

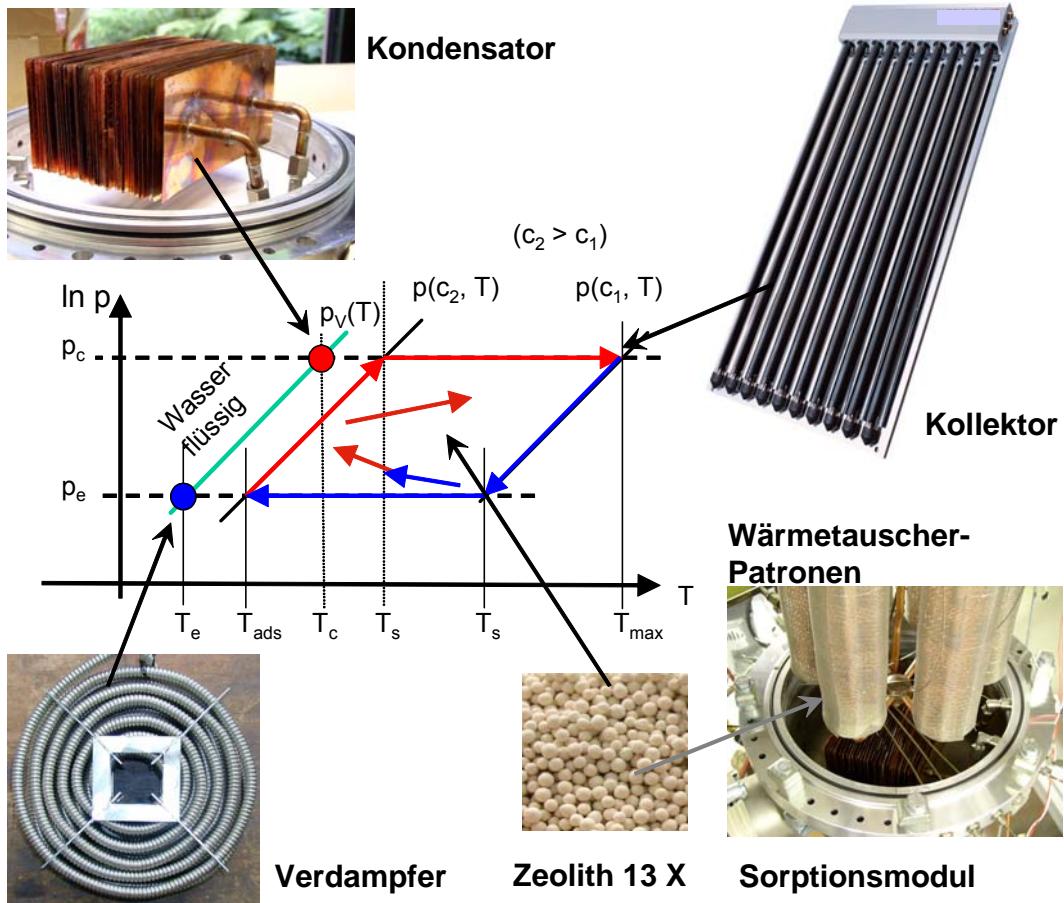


Fig. 2: Fotos der Apparate zum Aufbau eines Sorptionsspeichers. Die von den Apparaten ausgehenden Pfeile deuten auf den Arbeitspunkt bzw. Bereich (Temperatur T, Druck p) im schematischen T-In(p) Diagramm des verwendeten Stoffpaars hin.

Die Hauptarbeiten in der Berichtsperiode wurden am Feststoff-Sorptionsmodul, dem Herzstück des Systems geleistet. Dazu ist in Fig. 3 eine vereinfachte schematische Darstellung der Geometrie dieses Moduls abgebildet. Der granulare Feststoff besteht aus Zeolith oder Silicagel Partikel, welche durch einen grossen Parametersatz wie Form, Größenverteilung, Oberfläche, Porosität, Porengrößenverteilung, Dichte, Sorbenskapazität, Wärmeleitfähigkeit usw. charakterisiert werden (in Fig. 3 als kugelförmige Partikel dargestellt). Die tiefe Wärmeleitfähigkeit von Zeolith und Silicagel muss durch eine kurze Wärmetransportlänge oder durch ein Compositmaterial (z.B. aus Zeolith und einem gut wärmeleitenden Material) kompensiert werden.

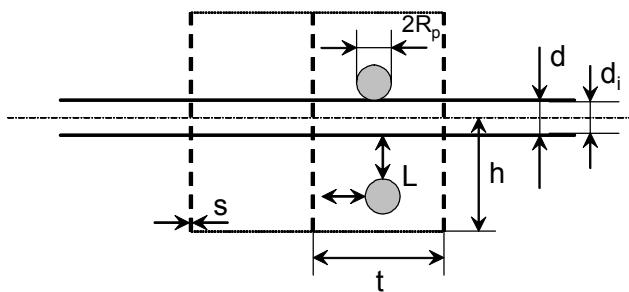


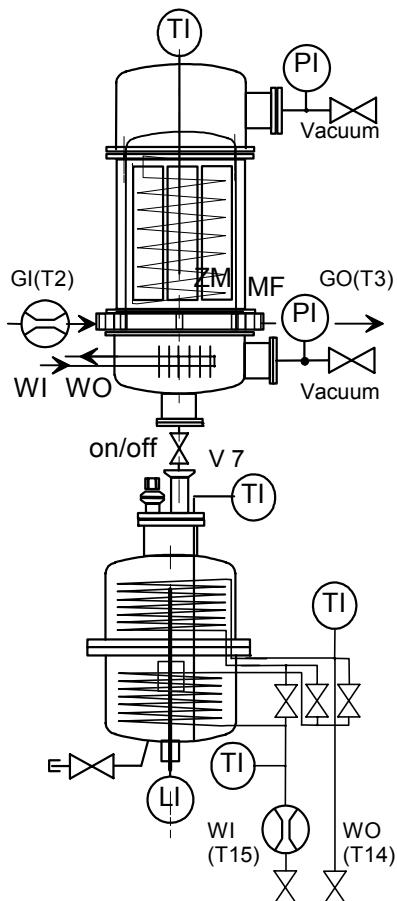
Fig. 3: Schematische Darstellung der Geometrie eines Feststoff-Sorptionsmoduls. Ein kugelförmiges Partikel mit dem Durchmesser  $2R_p$  hat z.B. den Abstand  $L$  von den notwendigen Wärmeleitern.

Weiterhin wird in regelmässig durchgeföhrten Literaturrecherchen nach neuen Sorptionsmaterialien, Komponenten und Systemkonfigurationen gesucht, sowie die Aktivitäten im Bereich der Sorptionswärmepumpen und der Sorptionswärmespeicher von Instituten und Firmen verfolgt.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### Experimenteller Aufbau

In Fig. 4: ist eine schematische Darstellung des Labor-Sorptions- bzw. Wärmepumpenspeichers. Mit diesem Aufbau können die Temperaturverläufe  $T(t)$  in der Adsorption und Desorption am Sorptionsmodul (GI T2, GO T3) im oberen Tank sowie am Ein- (WI T15) und Austritt (WO T14) am

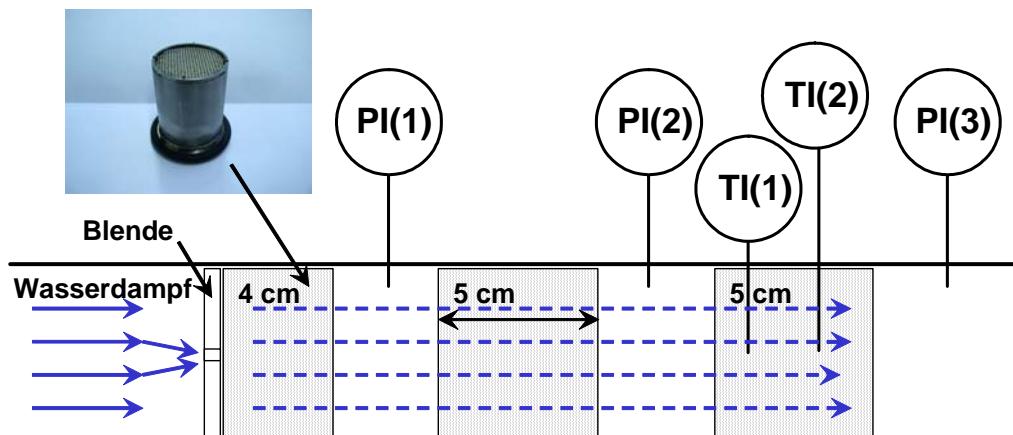


Wassertank unten ermittelt werden. Für die Versuche wurden im oberen Tank zur Aufnahme des Sorbens zwei unterschiedliche Sorptions-Speichermodule, bestehend aus total 3.7 kg schweren Wärmetauscher-Patronen für 7 kg Zeolith, oder einem 3.8 kg schweren Lamellenwärmetauscher für 10.8 kg Zeolith, eingebaut. Bei den Versuchen in dieser Apparatur wurden Zeolith Kugeln mit 1 mm mittlerem Durchmesser eingesetzt. Zur Wasserdampf Kondensation ist ein neuer Plattenwärmetauscher mit den Anschlüssen WI und WO eingebaut worden [1]. Der Tank unten enthält das Wasser bzw. den Wasserdampf. Diesem Tank ist ein zweiteiliger Spiralschlauch Wärmetauscher mit den Anschlüssen WI (T15) und WO (T14) eingebaut. Die beiden Tanks sind über das Ventil V7 verbunden. Dieses dient zum Starten (offen) und Stoppen (geschlossen) des Sorptionsprozesses. Zur Durchführung der Versuche wurde die Anlage evakuiert. Der Plattenwärmetauscher wurde bei der Adsorption nicht betrieben. Während der Desorption wurde dieser mit Wasser aus einem Thermostatbad mit einer Temperatur von 20°C durchströmt.

Fig. 4: Schematische Darstellung des experimentellen, thermisch getriebenen Sorptionsspeichers. Der obere Tank enthält den Kondensator und das Sorptionsmodul zur Aufnahme des Sorbens. Der untere Tank enthält das Sorbat Wasser.

TI, PI, LI: Temperatur-, Druck-, Niveaufühler.  
 GI, GO: Glykolvorlauf / Glykolrücklauf.  
 WI, WO: Wasservorlauf / Wasserrücklauf  
 MF: Messflansch.

Die Leistung des Systems wird entscheidend durch die Eigenschaften des Stoffpaars Sorbens - Sorbat und durch die Geometrie des Sorptionsmoduls beeinflusst. Aus früheren  $\delta m/\delta t$  Messungen [1] sind für Silikagel und Zeolith die Massentransferzonen zu 5 cm bis 6 cm bestimmt worden. Dies führte beim Bau des Sorptionsmoduls zur Konstruktion von Wärmetauschern mit 4 bzw. 6 parallel geschalteten, zylindrischen Patronen mit einem Durchmesser von 7 cm und 10 cm (Fig. 2). Um aber eine gute Nutzung des Raumes und ein optimales Gewichtsverhältnis von Wärmeübertragenden Bauteilen und Sorptionsmaterial zu haben – sowie Anhaltspunkte zur Skalierung zu bekommen, wurde ein weiteres Experiment mit einer Druckverluststrecke aufgebaut. In Fig. 5 ist eine schematische Darstellung der Druckverluststrecke mit den Positionen für die Druck- und Temperatursensoren dargestellt. Die Länge der Druckverlustelemente zwischen denen der Druck gemessen wurde ist verschieden. Es wurden mehrere Druckverlustelemente mit Längen von 3 cm, 4 cm und 5 cm hergestellt um unterschiedliche Festbett-Gesamtlängen zu untersuchen.



**Zeolith Festbett – Länge: 4 cm, 9 cm, 14 cm. PI, TI = Druck-, Temperatursensor.**

Fig. 5: Schematische Darstellung der Druckverluststrecke mit Druck- (PI) und Temperatursensoren (TI). Das kleine Bild links oben zeigt stellvertretend ein Beispiel einer mit Zeolith Kugelchen gefüllten Patronen. Die ganze Strecke kann mit maximal drei Patronen aufgebaut werden. Je nach Versuch wurde zusätzlich vor die Patronen eine Blende eingebaut. Das Sorbat Wasserdampf strömt von links in die Messanordnung ein.

Um den Einfluss der Verfügbarkeit von Sorbat zu messen, wurden Blenden mit einem Durchmesser von 1.6 mm, 2.3 mm und 3.2 mm hergestellt und eingesetzt. In den durchgeföhrten Versuchen wurden Zeolith 13 X Kugeln eingesetzt mit einem mittleren Durchmesser von 1.0 mm und 2.5 mm. Die Versuche wurden unter Vakuum durchgeföhr.



Die Ergebnisse aus den Versuchen mit der Druckverluststrecke führten zum Bau eines Lamellenwärmetauschers zur Aufnahme des Zeolith-Granulates. Das Leergewicht des Wärmetauschers beträgt 3.8 kg. Für die Versuche konnten dem Wärmetauscher 10.8 kg Zeolith Kugeln mit 1 mm Durchmesser eingefüllt werden. In Fig. 6 ist ein Foto mit dem leeren Lamellenwärmetauscher zu sehen.

Fig. 6: Foto des Lamellenwärmetauschers zur Aufnahme des Sorptionsmaterials. Unten ist der Messflansch sichtbar, mit den Durchführungen für die Wärmeträgerfluide (Wasser und Glykol) und die Temperaturfühler. Vier einzelne Module mit  $B \times H = 4.5 \times 21.0 \text{ cm}^2$  und einer Länge von 46 cm sind parallel geschaltet, wobei jedes Modul drei Rohre zur Wärmeabfuhr hat. Die Rohre dienen auch zur mechanischen Stabilität des Wärmetauschers. Die Rohre sind aus rostfreiem Stahl mit einer Wandstärke von 0.5 mm. Die Lamellen sind aus halbhart gewalztem Aluminium mit einer Dicke von 0.3 mm.

## Messungen und Resultate

### Druck- und Temperaturverlauf in der Druckverluststrecke

In Fig. 7 sind die Druck-  $p(t)$  und Temperaturverläufe  $T(t)$  in der Druckverluststrecke von 14 cm Länge, ohne Blende und mit 1mm Zeolith 13 X Kugeln dargestellt. Die Temperatur im Wassertank hat  $T = 25.8^\circ\text{C}$  und damit hat der Druck  $p = 31$  mbar betragen. Dieser wird nach einer Zeit von  $\Delta t > 70$  s erreicht, nach Öffnen des Ventils (s. Pfeil) zwischen Wassertank und Druckverluststrecke. Deutlich sichtbar sind die zeitlich verschobenen Druck- und Temperaturanstiege in Funktion des Ortes. Die Zeitverzögerung  $\Delta t$ , bis PI(3) gleich PI(1) ist, beträgt 18 s.

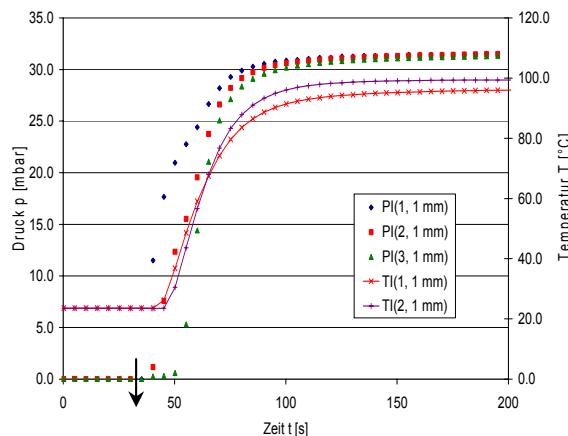


Fig. 7: Druck- und Temperaturverlauf in der Druckverluststrecke ohne Blende mit Zeolith Kugeln von 1 mm Durchmesser. Der Pfeil zeigt den Zeitpunkt der Öffnung des Ventils an.

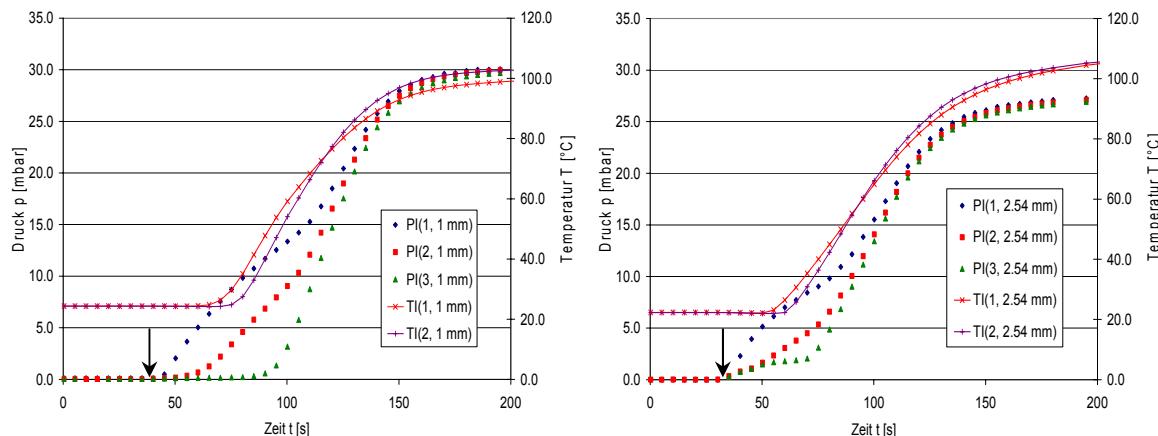


Fig. 8: Druck- und Temperaturverlauf in der Druckverluststrecke mit einer Blende von 3.2 mm Durchmesser sowie mit Zeolith Kugeln von 1 mm (Bild links) und 2.54 mm (Bild rechts) Durchmesser. In den Grafiken zeigt der Pfeil den Zeitpunkt des Öffnens des Ventils zwischen Wassertank und Messanordnung an.

In Fig. 8 sind die Druck-  $p(t)$  und Temperaturverläufe  $T(t)$  in der Druckverluststrecke von 14 cm Länge, mit einer Blende von 3.2 mm Durchmesser und mit 1 mm Zeolith 13 X Kugeln (links) und mit 2.5 mm Zeolith 13 X Kugeln (rechts) dargestellt. Die Temperatur bzw. der Druck im Wassertank hat  $(T, p) = (25.3^\circ\text{C}, 30 \text{ mbar})$  bei den Versuchen mit 1 mm Zeolith Kugeln und  $(T, p) = (23.8^\circ\text{C}, 27.5 \text{ mbar})$  bei jenen mit 2.5 mm Zeolith Kugeln betragen. Deutlich sichtbar sind die zeitlich verschobenen Druck- und Temperaturanstiege in Funktion des Ortes sowie in Funktion der Größenverteilung der Zeolith Kugeln. Bei beiden Messungen wird der maximale Druck nach Öffnen des Ventils (zwischen Wassertank und Messanordnung) nach einer Zeit von  $\Delta t > 120$  s erreicht. In

einem Festbett mit 1 mm Zeolith Kugeln bildet sich eine Massentransferzone aus. Die Zeitverzögerung  $\Delta t$  bis  $PI(3)$  etwa gleich  $PI(1)$  ist, beträgt 100 s im Fall der 1 mm Kugeln und 75 s bei der Messung mit den 2.5 mm Kugeln. Haben die Zeolith Kugeln einen mittleren Durchmesser von 2.5 mm, dann steigt der Wasserdampfdruck im gesamten Raum des Festbettes auf rund 2 mbar an. Dadurch besteht für alle Sorbent Teilchen ein Angebot an Sorbat und die Adsorption kann im gesamten Festbett beginnen. Eine Massentransferzone bildet sich auch bei diesem Versuch aus. Bei gleicher Masse Zeolith ist zwar die Summe der Oberflächen der einzelnen 1 mm Kugeln 2.5 mal grösser als jene der Summe der Kugeln mit 2.5 mm Durchmesser, die kleineren Zwischenräume im Falle der 1 mm Kugeln lassen aber keine Wasserdampfausbreitung im gesamten Festbett zu.

### Temperaturprofile im Labor-Wärmepumpenspeicher

Zur Messung der Temperaturprofile  $T(t)$  im Sorptionsmodul und der Temperatur im Wassertank bei der Adsorption und der Desorption, wurden mit den Wärmetauscher-Patronen (s. Fig. 2) die vollständigen Zyklen durchlaufen.

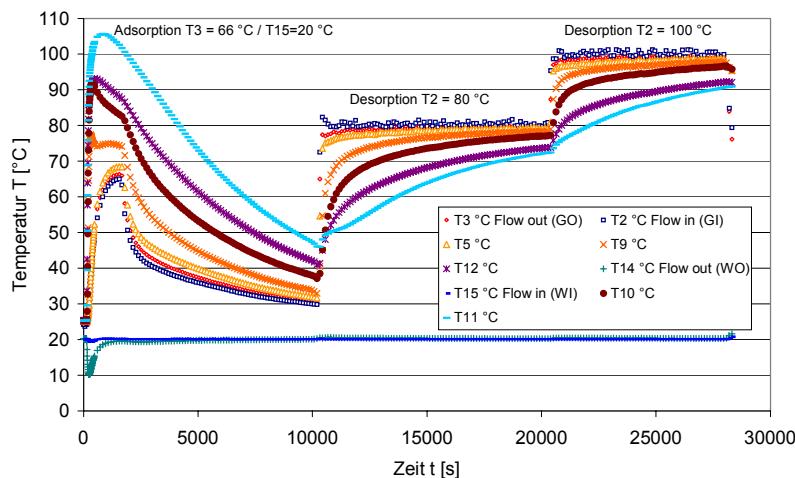


Fig. 9: Temperaturverläufe  $T(t)$  im Wärmetauscher-Patronen Sorptionsmodul und im Wassertank während der Adsorption und Desorption von Wasserdampf an Molekularsieb Zeolith 13 X mit 1 mm Kugeln.

Die Temperaturen im Wassertank wurden mit einem Thermostatbad auf 10 °C, 20 °C und 30 °C gehalten. In Fig. 9 ist ein Adsorptions-Desorptions-Zyklus für die Temperatur 20 °C im Wassertank dargestellt. Deutlich sichtbar ist die Umkehrung der Reihenfolge der Temperaturkurven in der Adsorption und in der Desorption von den an verschiedenen Positionen angebrachten Temperaturfühlern. So ist beim aussen auf einer Wärmetauscher Patrone montierten Temperaturfühler bei der Adsorption die höchste Temperatur von  $T11 = 105$  °C messbar. Bei der Desorption ist  $T11$  hingegen die tiefste Temperatur.

Die Zeitkonstanten für den Temperaturanstieg in den zwei Zyklusschritten Adsorption und Desorption sind sehr unterschiedlich. So ist in der Adsorption, wegen des Dampftransports durch die Festbettschüttung, der maximale Temperaturanstieg, im für die Nutzung gebauten externen Kreislauf (s. Fig 4, GO, T3), in 0.5 h zu erreichen. In der Desorption (Trocknung) bei  $T2 = 80$  °C sind durch die geringe Wärmeleitung im Molekularsieb Zeolith 13 X die Temperaturen  $T11$  und  $T12$  nach fast 3 h bei knapp 75 °C.

Zur Darstellung der für Heizzwecke relevanten Temperaturen, sind in Fig. 9 und Fig. 10 die Temperaturen  $T2$  und  $T3$  des Glykolkreislaufes aufgezeichnet. Zwei Bereiche des Temperaturverlaufes sind sichtbar. Der erste vom Start bis 1680 s bzw. 740 s zeigt den Anstieg der Temperatur  $T$  im externen Kreislauf, ohne Entnahme von Wärmeenergie. Der zweite ab 1680 s bzw. 740 s zeigt den Verlauf mit Entnahme von Wärmeenergie. Bei diesen Messungen stieg die Temperatur  $T3$  von 24 °C auf 66.4 °C ( $\Delta T = 42.4$  °C) bzw. von 22.4 °C auf theoretisch 82.4 °C ( $\Delta T = 60.0$  °C) an und liegt damit im Bereich der Anwendung für Brauchwasser. In diesem Bereich des Temperatur-

verlaufs wurde aber aus dem Kreislauf keine Wärme entnommen – das System lief quasi im Leerlaufbetrieb. Der Temperaturanstieg  $T_3(t)$  kann mit einer Exponentialfunktion  $T_3 \text{ Fit} = T_0 + \Delta T \cdot (1 - \exp(-t/\tau))$  angenähert werden und hat nahezu das äquivalente Verhalten wie der Spannungsverlauf  $U(t)$  eines elektrischen Kondensators im Aufladevorgang. Die Zeitkonstante in beiden Systemkonfigurationen beträgt 350 s und deutet auf eine vergleichbar tiefe Wärmeleitfähigkeit hin, bei Berücksichtigung der Massen und spezifischen Wärmekapazitäten von Sorptionsmaterial (exakt inkl. adsorbiertes Wasser) und metallischem Wärmetauscher.

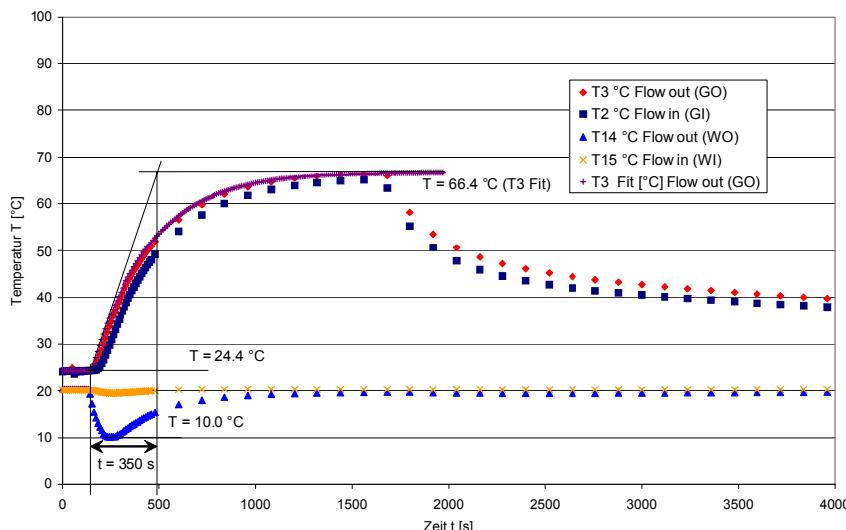


Fig. 9: Temperaturverlauf  $T(t)$  im Heiz- bzw. Wärmeabführkreislauf, sowie am Ein- und am Austritt des Wassertanks, während der Adsorption von Wasserdampf an Molekularsieb Zeolith 13 X bei einer Wassertemperatur von 20 °C im Wassertank.

Erst ab einer Betriebszeit von 1680 s bzw. 740 s wurde Energie aus dem Kreislauf abgeführt. Der schnelle Temperaturabfall im Modul mit den 6 Patronen (Fig. 9) zeigt eine noch relativ tiefe Leistung von 370 W bei der gewählten Betriebsart. In den Versuchen mit dem Lamellen Sorptionsmodul wurde eine Heizleistung von 800 W erzielt. Die mittleren Temperaturen liegen mit  $T_3 \sim 40 (Fig. 9) im Anwendungsbereich zur Heizung und von  $T_3 \geq 55 (Fig. 10) im Temperaturbereich für Brauchwasser.$$

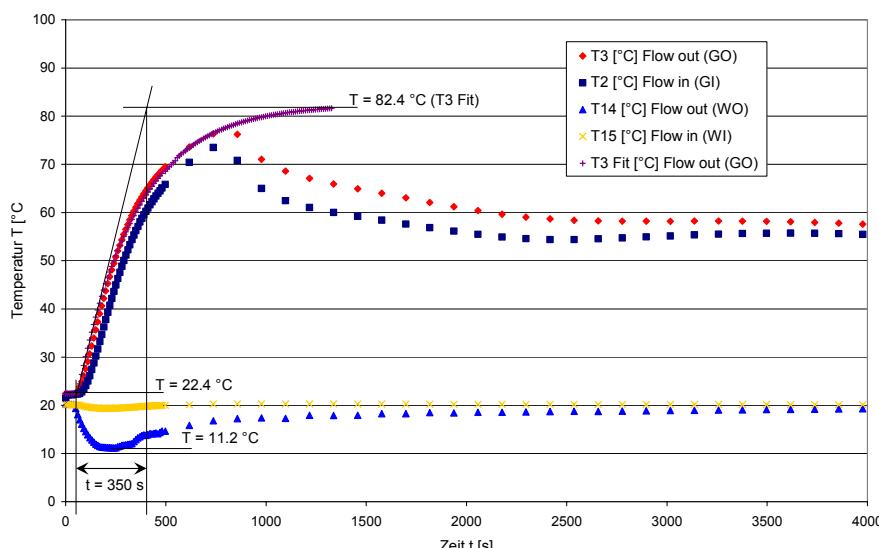


Fig. 10: Temperaturverlauf im Heiz- bzw. Wärmeabfuhrkreislauf sowie am Ein- und am Austritt des Wassertanks während der Adsorption von Wasserdampf an Molekularsieb Zeolith 13 X bei einer Wassertemperatur von 20 °C im Wassertank.

Die Leistungsdichten sind  $E = 60.5 \text{ kWh/m}^3$  und  $E = 53.5 \text{ kWh/m}^3$  in der Messung mit den Zylinderpatronen (Fig. 9) bzw. dem Lamellenwärmetauscher (Fig. 10). Wobei der tiefere Wert für den Lamellenwärmetauscher auf die geringere Beladung des Sorbens Zeolith 13 X bei der höheren mittleren Temperatur zurück zu führen ist:  $c(p_1, T_1) > c(p_2, T_2)$  mit  $T_1 < T_2 \wedge p_1 = p_2$ .

Zur Darstellung der für Kühlzwecke relevanten Temperaturen sind in Fig. 9 und Fig. 10 auch die Temperaturen T14 und T15 des externen Wasserkreislaufes aufgezeichnet. Bei diesen Messungen ist die Temperatur T14 von 20 °C auf 10 °C bzw. 11.2 °C gesunken und liegt im Bereich der Anwendung zu Kühlzwecken. Wie bereits erwähnt, ist in diesem Abschnitt der Versuche aber aus dem Kreislauf im Sorptionsmodul keine Wärme entnommen worden – das System lief bis auf die Belastung durch die Verluste im Leerlauf.

Der Temperaturanstieg am Austritt T14 nach 250 s - 300 s zeigt eine in diesem Betriebszustand nicht konstante Leistung des Laborsystems – das System strebt einen stabilen Gleichgewichtszustand an.

In Fig. 11 ist die Kühlleistungsdichte  $P$  der Laborapparatur bezogen auf die Anströmfläche  $A$  im Sorptionsmodul mit den zylindrischen Patronen in Abhängigkeit von der Wassertemperatur im Wassertank aufgezeichnet. Mit zunehmender Temperatur steigt die Kühlleistungsdichte bei 10 °C von 1.8 kW/m<sup>2</sup> auf 2.8 kW/m<sup>2</sup> im Bereich von 20 °C und 30 °C an. Da der Dampfdruck  $p(T)$  des Wassers aber von  $p(T=10°C) = 12$  mbar auf  $p(T=30°C) = 42$  mbar [2] steigt wäre eine höhere Leistungsdichte zu erwarten.

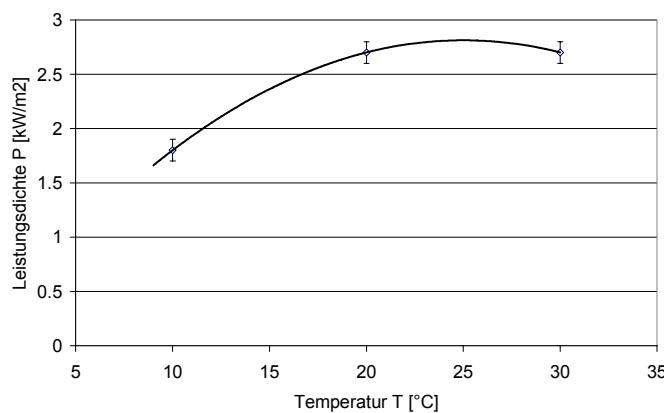


Fig. 11: Kühlleistung  $P$  des Systems bezogen auf die Anströmfläche  $A$  im Sorptions-Speichermodul mit den 6 parallel geschalteten Zylinderpatronen in Abhängigkeit von der Wassertemperatur  $T$  im Wassertank.

## Nationale Zusammenarbeit

In der laufenden Projektphase waren keine Arbeiten mit nationalen Partnern vorgesehen. Bei Bedarf soll jedoch im Rahmen des IEA Task 32 „Storage concepts for solar buildings“ im Bereich Solar Heating & Cooling mit inländischen Instituten zusammen gearbeitet werden.

## Internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des IEA Task 32 „Storage concepts for solar buildings“ im Bereich Solar Heating & Cooling findet ein regelmässiger Informationsaustausch mit ausländischen Instituten statt. Dazu wurde Ende Mai in Lleida (Spanien) und Ende November in Fontainebleau (Frankreich) je ein Vortrag zum Projekt gehalten.

## Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Die mit dem Labor-Sorptionsspeicher erzielten Messergebnisse, zeigen die Funktionalität des mit dem festen Sorbens Material Molekularsieb Zeolith 13 X und dem dampfförmigen Sorbat Wasser

arbeitenden Systems zur Heizung oder zur Kühlung auf. Die Erhöhung der Temperatur im Glykolkreislauf von Umgebungstemperatur auf  $T_3 \sim 40^\circ\text{C}$  bzw.  $T_3 \geq 55^\circ\text{C}$  ist ausreichend zu Heizzwecken bzw. für Produktion von Brauchwarmwasser. Ebenfalls im nutzbaren Bereich liegt die Wassertemperatur mit  $10^\circ\text{C}$  bis  $11.2^\circ\text{C}$  am Austritt aus dem Wassertank im Fall der Nutzung zu Kühlzwecken. Der tiefe Wärmeübergang vom Zeolith auf den Lamellenwärmetauscher limitiert die Leistung des Systems auf 800 W. Zudem wurden die Ergebnisse mit trockenem Zeolith erreicht. Dieses ist jedoch nur mit Trocknungstemperaturen von  $T_R \geq 200^\circ\text{C}$  zu erreichen. In vollständig durchlaufenden Zyklen, in denen die Trocknungstemperatur tiefer liegt, werden die Werte für die Leistung tiefer ausfallen. Die Leistung kann aber noch gesteigert werden in dem jedes Zeolithkügelchen in direktem Kontakt steht zu der Wärme zu- respektive abführenden Oberfläche des Wärmetauschers hat [3]. Dabei sinkt aber die (Energiespeicher-) Kapazität weil der Wärmetauscher mehr Raum beansprucht bzw. das Gewichtsverhältnis Sorbent zu Wärmetauscher sinkt. Die Zykluszeiten sinken zudem auf Werte im Bereich von 5 bis 8 Minuten [1, 4, 5].

Die treibenden Kräfte eines Sorptionsspeichers sind die Temperaturniveaus der angeschlossenen Wärmequellen und -senken. In den folgenden Versuchen werden Zyklen mit vordefinierten Temperaturniveaus gemessen.

Um einen genügend hohen und regulierbaren Dampfmassenstrom aus der Wasservorlage in das Sorptionsmodul zu erreichen, wurde in die Rohrleitung zwischen den beiden Tanks ein spezielles Vakuumventil eingebaut. Die Funktionalität dieses Bauteils ist noch unbefriedigend. Ein Konzept zur Verbesserung wird verfolgt.

## Referenzen

- [1] **Sorptionspeicher – Sorptionsmaterial / Studie Temperaturprofile & Sorptionsmodelle.** Jahresbericht 2004, P. Gantenbein.
- [2] **VDI-WÄRMEATLAS Recherchieren – Berechnen –Konstruieren.** Herausgeber: Verein Deutscher Ingenieure, Springer Verlag Berlin Heidelberg 1997.
- [3] **Adsorber- / Desorber- Wärmetauscher.** Europäische Patentanmeldung EP 1 180 650 A1. Veröffentlichungstag: 20. 02. 2002 Patentblatt 2002/08. Anmelder: Vaillant GmbH, 42859 Remscheid (DE).
- [4] **Adsorption Cooling Using Adsorbent-Coated Surfaces.** S. R. Dunne, S. M. Taqvi, in "Solares Kühlen in der Praxis", HfT Stuttgart, 2001.
- [5] **Polymeric heat exchangers to increase the COP values of adsorption heat pumps utilizing zeolite coatings.** M. Tatlier, A. Erdem-Senatalar, Applied Thermal Engineering 24 (2004) 69–78.