

Jahresbericht 2004, 10. Dezember 2004

# Sorptionsspeicher

## Sorptionsmaterial / Studie Temperaturprofile & Sorptionsmodelle

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

### ZUSAMMENFASSUNG

Das Speicherkonzept kann nicht ohne zusätzliche Energiequelle umgesetzt werden. Zum Betrieb des geschlossenen Speichers ist in jedem Fall eine Energiequelle im Temperatur Bereich von 10 °C bis 30 °C notwendig, um Temperaturen von 60 °C und mehr zu erreichen. Damit wird dieser Speicher zum thermisch betriebenen Wärmepumpenspeicher.

Weiter führen grundlegende Materialgrenzen zur Gestaltung eines Speichers mit sehr grosser geometrischer Oberfläche, welche nur in einem Mehrkammer Speicher realisiert werden kann. Diese Grenzen sind der Druckabfall im Sorbat, welches durch das Sorbent Festbett strömt und der Wärmeübergang vom Sorbent an den Wärmeübertrager. Ein geschlossenes System wird beim Dampfdruck des Wassers (maximal zur Verfügung stehender Druck) betrieben. Der Druckabfall durch ein Festbett ist bei einigen cm Festbetthöhe gleich dem Dampfdruck der Wassers. Damit ist die Leistung eines Speichers stark von seiner geometrischen Gestaltung abhängig und hat sinnvoller Weise eine Festbetthöhe von einigen cm.

Aus Kosten Gründen lässt sich die „Viel – Kammer - Lösung“ noch nicht umsetzen. Wir verfolgen daher die Variante, welche auch schon zum Teil von der Japanischen Firma Nishiyodo in ihren Silicagel - Sorptionsmittel - Kühlmaschinen umgesetzt wurde. Dies bedeutet ein zwei Kammer - System, in dem eine Optimierung des Verhältnisses Oberfläche zu Volumen des Sorptionsmaterials im Sorbent Wärmetauscher des Gerätes gemacht werden muss.

Dazu werden entsprechende Versuche aufgebaut und Messungen durchgeführt.

Aus den oben erwähnten physikalischen Gründen bauen das Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg und die Firma SorTech AG (vormals UFE Solar GmbH) im Rahmen des Projektes „MODESTORE“ eine Adsorptionswärmepumpe. Gemäss Aussage des ISE wird aber AEE INTEC weiterhin die Speicherung bzw. den Bau eines Sorbent Speichers verfolgen. Die Adsorptionswärmepumpe des ISE wird vergleichbar sein mit der von der Firma Vaillant geplanten und gebauten, Gas betriebenen Adsorptionswärmepumpe mit Zeolith. Erste Prototypen werden von Vaillant in Feldversuchen eingesetzt. Seit längerem existiert ein vom ZAE Bayern entwickelter Prototyp einer mit dem Stoffpaar Wasser/Lauge betriebenen Adsorptionswärmepumpe.

Einige der erreichten Resultate werden am nächsten IEA Task 32 Treffen vorgestellt.

## Projektziele

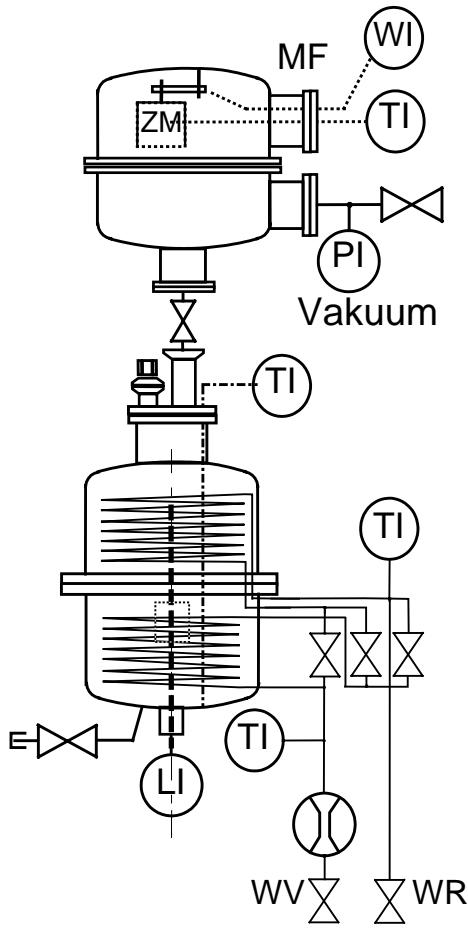
Die Leistung eines Sorptionsspeichers hängt von den verwendeten Materialien, den zur Verfügung stehenden Wärmequellen, der Wahl des Systemtyps und der Gestaltung der Systembauteile ab. Für eine geschlossene Sorptionspeicheranlage, die Wärme und Kälte liefern soll, soll ein Sorptionsmodul gebaut werden.

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

Weiterhin wird in regelmässig durchgeföhrten Literaturrecherchen nach neuen Sorptionsmaterialien, Komponenten und Systemkonfigurationen gesucht.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

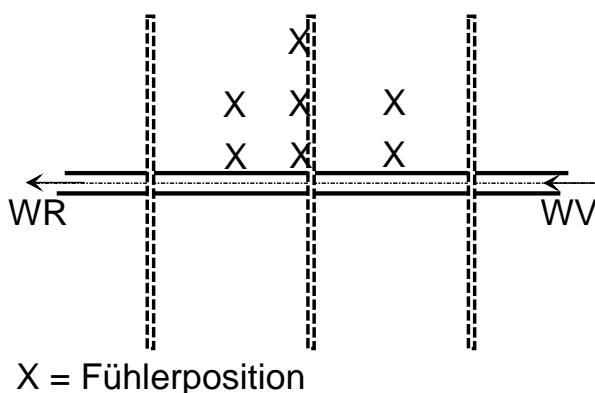
### Voraussetzungen – experimenteller Aufbau:



Die vorhandene Vakuumapparatur wurde für die Messungen der Temperaturprofile und der Wasseraufnahme abgeändert. In Fig. 1 ist eine schematische Darstellung der Messanordnung zu sehen. Als Sorbent wurden in den Versuchen Silicagel (UETIKON 490) mit einer Korngrößenverteilung von 3 – 6 mm und Zeolith 13 X mit einer Körnung von 1 – 2 mm eingesetzt. Die das Sorbent aufnehmende, auf einer Seite Vakuum dicht geschweisste Stahlbüchse (ZM) hat einen Durchmesser von 0.1 m und eine Länge von 0.15 m. Als Sorbat wurde Wasser verwendet [1].

**Fig. 1:** Experimenteller Aufbau. Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus zur Bestimmung der Massenadsorptionsrate  $dm/dt$ . Oben ist die Wägezelle mit der mit Sorptionsmaterial (Festbett, ZM) gefüllten Stahlbüchse in einem Vakuumbehälter und unten ist die Wasservorlage. Die Stahlbüchse ist auf der Rückseite (Aufhängung an der Wägezelle) Vakuum dicht verschlossen. Im Festbett eingetaucht sind Temperaturfühler. Diese sind von der Öffnung der Stahlbüchse her in einem Raster von 1 cm eingebaut. In der Wasservorlage ist ein zweiteiliger Spiralschlauch Wärmetauscher eingebaut.

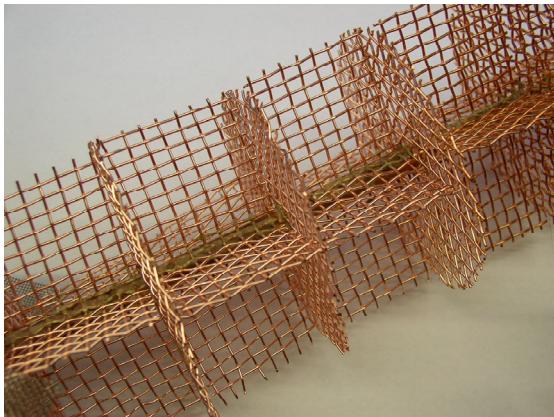
Bezeichnungen: WI, TI, PI, LI: Gewichtsmessung, Temperatur-, Druck-, Niveaufühler. WV, WR: Wasservorlauf / Wasserrücklauf (Thermostatbad). MF: Messflansch.



**Fig. 2:** Experimenteller Aufbau. Schematische Darstellung der Sorptionsfine zur Bestimmung der Temperaturprofile  $T(r)$  beim Aufheizvorgang in der Trocknungsphase. Die vertikalen, gestrichelt eingezeichneten, Linien sind je nach Ausführung Aluminium Lochscheiben mit einem Durchmesser von 120 mm, einer Dicke von 1.5 mm und einem 30 %-igen freiem Querschnitt. Sie haben auf dem Rohr einen verstellbaren Abstand. Das Cu-Rohr hat die Masse von 12x1 mm. Die Bezeichnungen WV und WR sind für den Heizwasser Ein- bzw. Austritt. Mit X sind die Positionen der Temperaturfühler bezeichnet. Die Messanordnung befindet sich an Luft. Siehe Fig. 3: für ein weiteres Wärmeübertrager Modell.

In Fig. 2 ist eine runde, axial symmetrische Sorptionsfine dargestellt. An einem solchen Modell wurden in Luft die Temperaturprofile  $T(r)$  in einer Festbettschüttung von trockenem, kugelförmigem Zeolith 13X mit 1 – 2 mm und mit 2 – 3 mm Kugel Durchmesser bei den Temperaturen von 50, 60, 70 und 80 °C im Kupferrohr gemessen.

Weitere Wärmeübertrager Modelle für Experimente sind gebaut worden. Für das Sorptionsmodul sind Finen aus Kupferdraht-Gewebe und für den Kondensator ist ein Plattenwärmetauscher aus Kupfer hergestellt worden [4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14]. In Fig. 3 ist ein Foto eines Elements aus Kupferdraht mit 1 mm Dicke zu sehen. Die Fig. 4 zeigt ein Foto des Plattenkondensators.



**Fig. 3:** Sorbens Modul. Wärmetauscher Element aus Kupferdraht-Gewebe für feste Sorptionsmaterialien im Sorptionsmodul. Das Sorptionsmodul wird aus mehreren solcher Elementen aufgebaut.



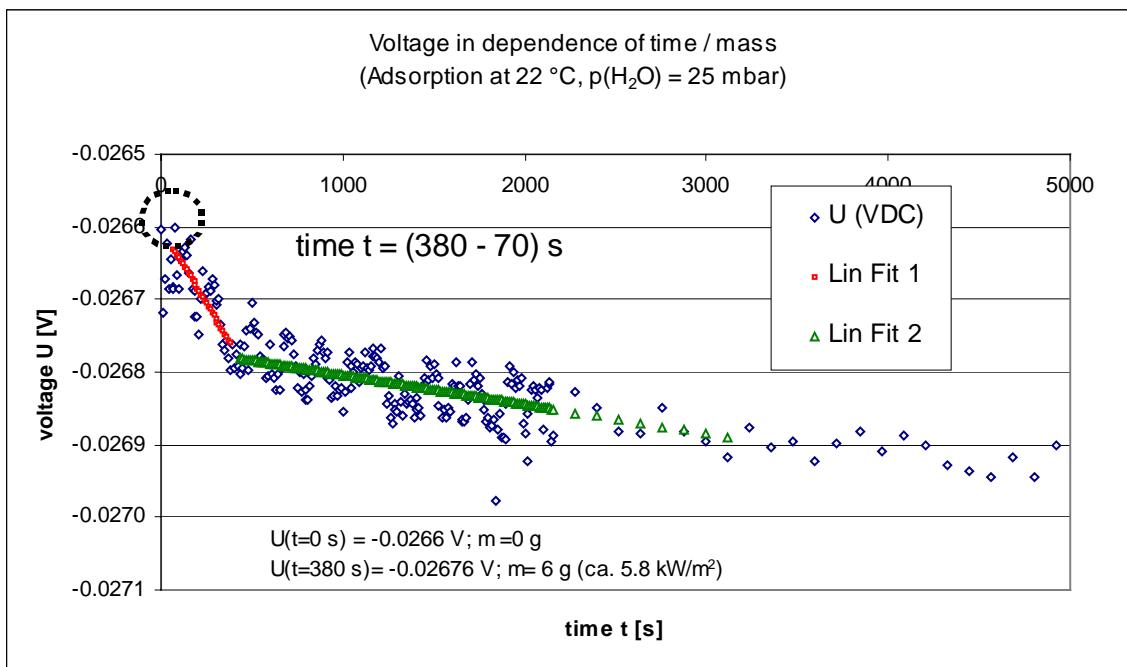
**Fig. 4:** Kondensator. Wärmetauscher aus Kupfer Platten zur Kondensation von Wasserdampf im geschlossenen System.

Zum Teil sind mit diesen Wärmetauschermodellen Messungen gemacht worden. Nachdem die Anlage zusammengebaut und Leck getestet ist, sollen weitere Versuche durchgeführt werden.

## Messungen und Resultate

### Wasseraufnahme und Temperaturprofile – Adsorption

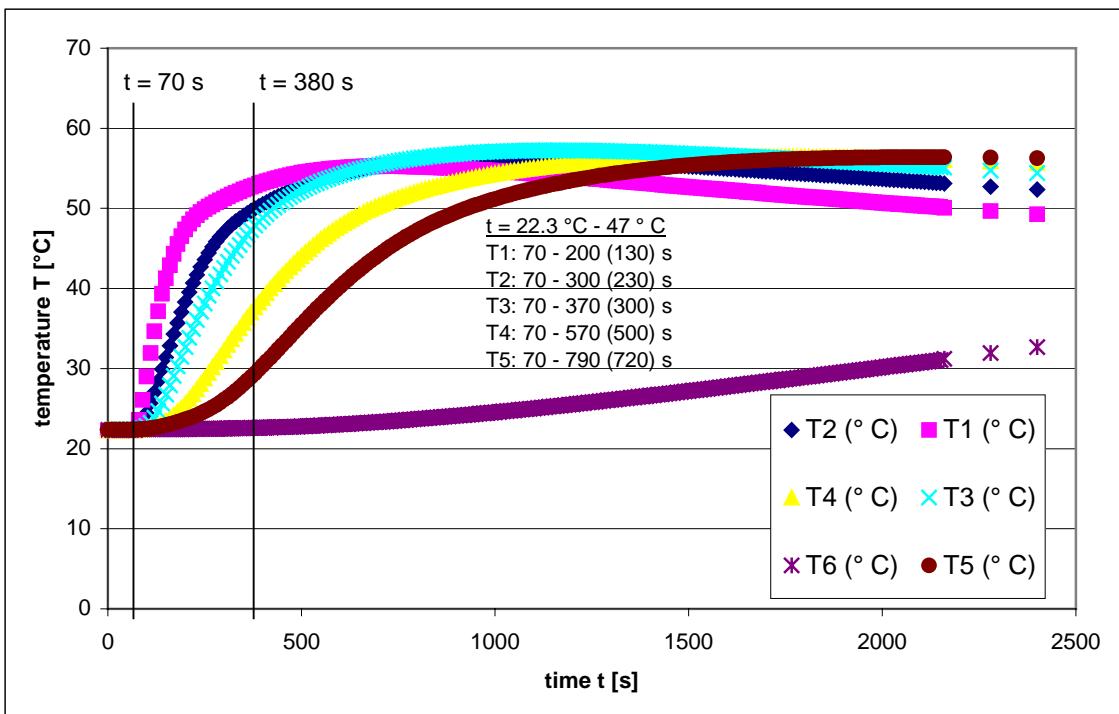
In einem Adsorptionssystem hängt die Leistung nebst anderen Parametern von der Sorbataufnahme des Sorbens ab. Dazu wurde die Aufnahme von Wasserdampf an Silicagel 490 (UETIKON) und Zeolith 13X unter Vakuum bei verschiedenen Wassertemperaturen in der Wasservorlage gemessen (Silicagel:  $T = 10, 21, 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; Zeolith:  $T = 10, 22, 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Im gleichen Experiment wurden die Temperaturen an verschiedenen Positionen in der Festbett Schüttung gemessen. Die Sorptionsmaterialien Silicagel 490 und Zeolith 13X sind jeweils vor den Adsorptionsversuchen in der Vakuumkammer bei  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  und gleichzeitigem evakuieren getrocknet worden. In Fig. 5 ist die elektrische Spannung an einem Biegebalken in Funktion der Zeit für Silicagel 490 und einer Wassertemperatur von  $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$  aufgetragen. Die el. Spannung ist direkt proportional mit der Masse. Zwei Bereiche können im zeitlichen Verlauf unterschieden werden und sind je mit einer linearen Funktion angefittet worden (Lin Fit 1 und Lin Fit 2).



**Fig. 5:** Messung. Elektrischer Spannungsverlauf in Funktion der Zeit  $t$  bei der Adsorption von Wasserdampf an Silicagel 490 unter Vakuum bzw. bei einem Wasserdampfdruck von 25 mbar. Zwei Bereiche der Gewichtszunahme sind messbar. Dazu wurden den Messpunkten in diesen zwei Bereichen verschiedene lineare Funktionen angefittet, Lin Fit 1 und Lin Fit 2. Für die Zeit von 70 bis 380 s ( $380 \text{ s} - 70 \text{ s} = 310 \text{ s}$ ) kann den Messpunkten Lin Fit 1 angepasst werden. Dieser Bereich ist zur Nutzung interessant.

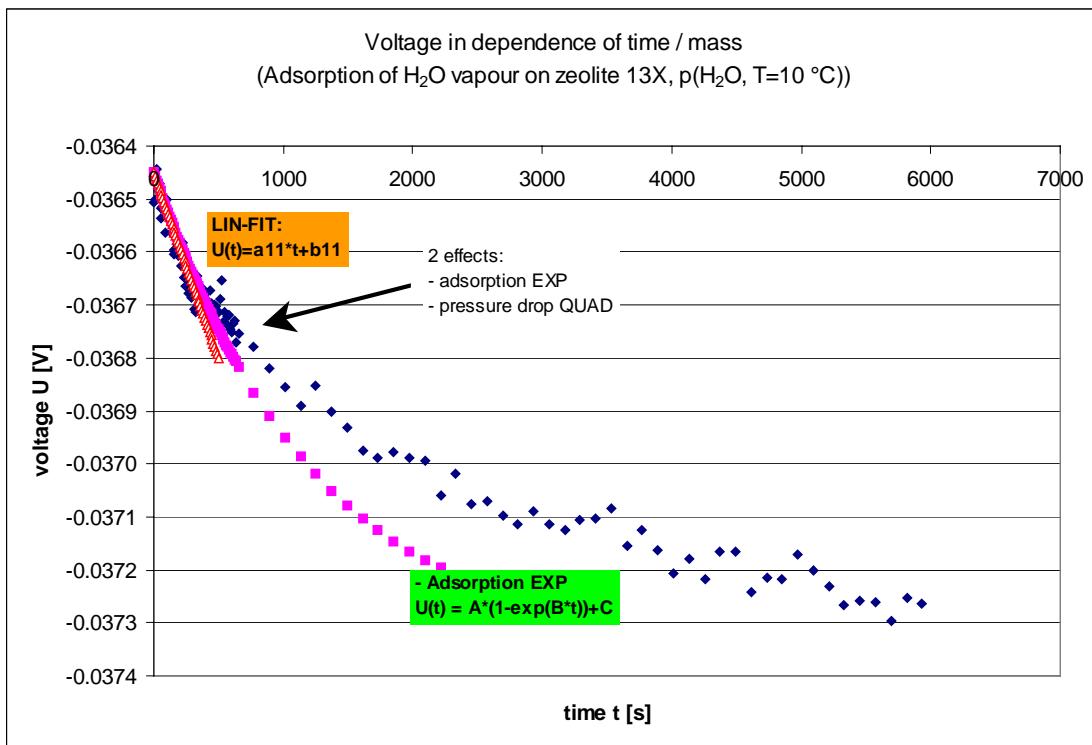
Im Bereich Lin Fit 1 wurde eine Massenzunahme von 6 g (Wasserdampf) im Zeitraum von 310 s gemessen. Saha et al [9] haben an der mit dem Stoffpaar Silicagel – Wasser betriebenen Nishiyodo Kältemaschine ein Maximum der Leistung bei einer Zykluszeit von rund 300 s festgestellt.

In Fig. 6 ist der Temperaturverlauf in der Silicagel Schüttung, wie sie auch für die Messung in Fig. 5 eingesetzt wurde, bei der Adsorption von Wasserdampf dargestellt. Entsprechend der Position des jeweiligen Temperaturfühlers in der Schüttung dauert es unterschiedlich lange bis ein Anstieg der Temperatur erfolgt. Nach einer Zeit von 310 s ( $380 - 70 = 310$ ) verlangsamt sich die Aufnahme von Wasserdampf gemäss der Messung nach Fig. 5. Zur Anzeige dieses Zeitpunktes ist in der Grafik eine senkrechte Linie eingezeichnet.



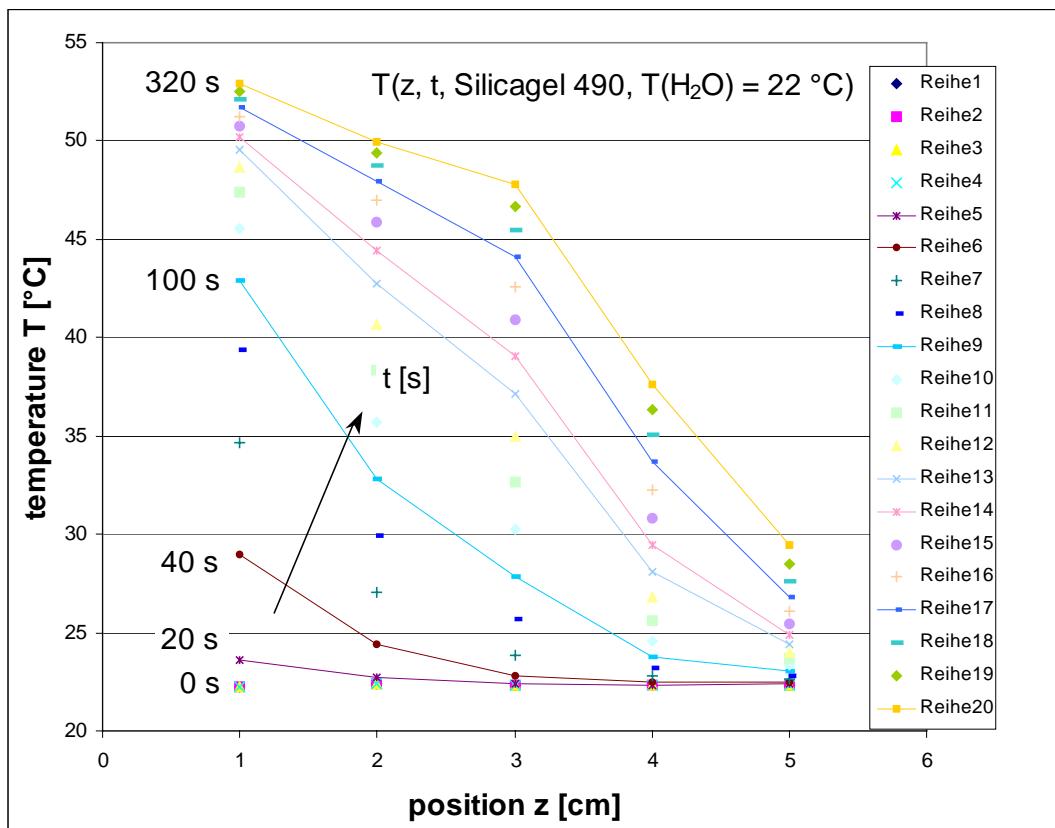
**Fig. 6:** Messung. Temperaturverlauf in Funktion der Zeit  $t$  und der Position  $z$  in einer Silicagel 490 Schüttung mit einer Körnung 3 – 6 mm bei der Adsorption von Wasserdampf bei einem Wasserdampfdruck von 25 mbar. Die Temperaturfühler (T1, T2, T3, T4, T5) haben je 1 cm Abstand von einander, T1 befindet sich 1 cm tief in der Festbett Schüttung, entsprechend befinden sich die anderen Fühler tiefer in der Schüttung. Siehe Fig. 5 zur Erklärung der senkrechten Linie bei  $t = 380$  s.

Die zeitabhängige Gewichtszunahme ( $dm/dt$ ) in der Adsorption von Wasserdampf am Zeolith hat eine andere Charakteristik als jene bei Silicagel. In Fig. 7 ist die Messung der Adsorption an Zeolith Kugeln mit einem Durchmesser von 1 – 2 mm unter Vakuum dargestellt. Den Messpunkten kann in der Zeit bis ca. 400 s eine lineare Funktion angepasst werden. Danach wird der Stofftransport durch den Druckverlust bei der Strömung durch die Schüttung und die Diffusion in die kugelförmigen Partikel dominiert.

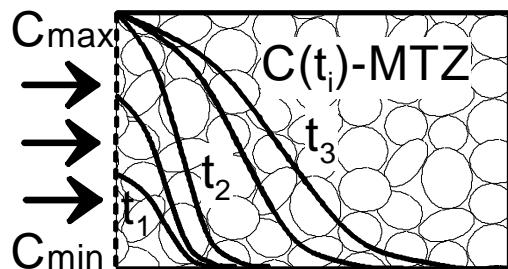


**Fig. 7:** Messung. Elektrischer Spannungsverlauf in Funktion der Zeit  $t$  bei der Adsorption von Wasserdampf an Zeolith 13 X Kugeln mit einem Durchmesser von 1 – 2 mm unter Vakuum bzw. bei einem Wasserdampfdruck von 12 mbar. Zu Beginn der Adsorption (Gewichtszunahme) bis zu einer Zeit  $t$  von ca. 400 s kann den Messpunkten eine lineare Funktion angefittet werden (LIN-FIT). Dieser Bereich ist zur Nutzung interessant.

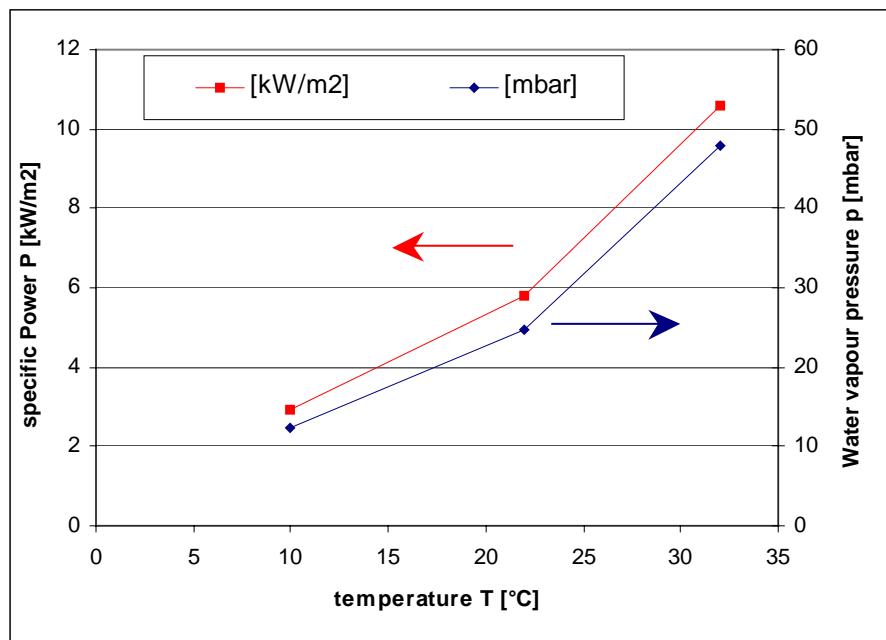
Werden die Temperaturen wie in Fig. 8 in Abhängigkeit der Position  $z$  mit dem Parameter Zeit  $t$  aufgetragen, dann kann extrapoliert eine Stoffübergangszone (engl. MTZ = mass transfer zone) [1] von rund 5 cm bis 6 cm abgelesen werden. Fig. 9 zeigt die schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Stoffübergangszone in einer granularen Schüttung, wie diese aus den in Fig. 7 dargestellten Messungen folgt. Je nach Breite dieser Zone ( $C_{\max}$  bis  $C_{\min}$ ) hat dies Konsequenzen auf die Geometrie des Sorptionsmoduls und den darin eingebetteten Wärmetauscher.



**Fig. 8:** Messung. Temperatur in Funktion der Position  $z$  in der Festbett Schüttung und der Zeit bei der Adsorption von Wasserdampf an Silicagel 490. Nach einer Zeit von 300 s hat sich eine Stoffübergangszone von rund 5 cm bis 6 cm ausgebildet.



**Fig. 9:** Modell. Schematische Darstellung einer Granulatschüttung. Von links tritt Lösungsmitteldampf in die Schüttung ein und wird bis zur Sättigung ( $C_{\max}$ ) vom Granulat adsorbiert. Die Linien deuten Sättigungskurven  $C(t, z)$  (mass transfer zone = MTZ) in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  ( $t_1 < t_2 < t_3$ ) und dem Ort  $z$  in der Schüttung an.



**Fig. 10:** Messung. Flächenspezifische Leistung im Sorptionsprozess von Wasserdampf an Silicagel 490 in Abhängigkeit von der Wassertemperatur bzw. vom Wasserdampfdruck. Die Werte beziehen sich auf den ersten linearen Bereich "Lin Fit 1" (Fig. 5) der Messungen. Zur Berechnung der spezifischen Leistung wurde die Gewichtszunahme multipliziert mit der Verdampfungsenthalpie bei  $T = 50^\circ\text{C}$ , welche hier als mittlere Adsorptionstemperatur gilt. Der direkte Zusammenhang von Leistung und Dampfdruck ist klar ersichtlich.

In einem Adsorptionssystem hängt die Leistung neben den Wärme- und Stoffübergangsflächen auch von der Temperatur der Niedrigtemperatur-Energiequelle ab. So sind aus Messungen die berechneten Leistungen pro Fläche für das Stoffpaar Silicagel – Wasser in Fig. 10 dargestellt. Dazu wurde die adsorbierte Wasserdampfmenge pro Sekunde ( $\Delta m(t)/t$ ,  $t = 1 \text{ s}$ ), aus den ersten linearen Bereichen "Lin Fit 1" (s. Fig. 5), multipliziert mit der Verdampfungsenthalpie<sup>1</sup>  $\Delta h_v(T = 50^\circ\text{C})$  von Wasser, bezogen auf den leer Rohr Querschnitt A der Stahlbüchse (s. Fig. 1). Der direkte Zusammenhang der Leistung mit der Temperatur des Wassers bzw. dessen Dampfdruck ist klar sichtbar. Bei einer Temperatur von  $10^\circ\text{C}$  in der Wasservorlage ist mit trockenem Silicagel 490 eine Leistungsdichte von  $2.9 \text{ kW/m}^2$  zu erreichen, bei einer Wassertemperatur von  $32^\circ\text{C}$  eine von  $10.6 \text{ kW/m}^2$ . Dieses Leistungsniveau kann aber auf Grund der Behinderung des Stofftransports durch die Silicagel Schüttung und der Adsorptionsmechanismen von Wasser auf dem Sorbent nur über einen Zeitraum von rund 5 Min. aufrecht erhalten bleiben. Bei gleichem experimentellem Aufbau wurden mit trockenem Zeolith 13 X Werte von  $6.3 \text{ kW/m}^2$  bei  $10^\circ\text{C}$  Wassertemperatur, bis  $35.4 \text{ kW/m}^2$  bei  $29^\circ\text{C}$  Wassertemperatur erreicht. Die Zeit, in der diese Leistung mit der Stoffpaarung Wasser - Zeolith konstant bleibt, liegt im Bereich von 5 Minuten.

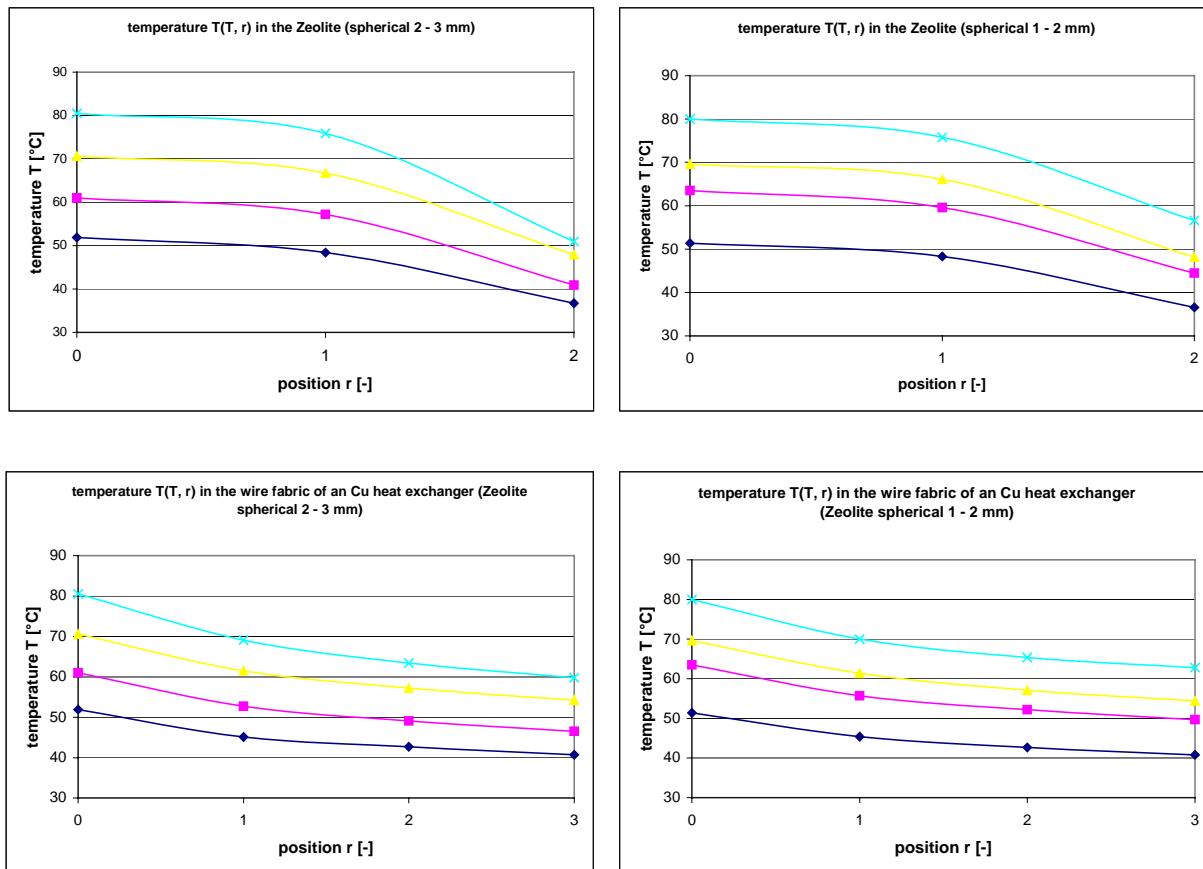
Wie bereits erwähnt, sind diese experimentellen Werte mit im Vakuum getrockneten Sorptionsmaterialien erzielt worden. In einem Sorptionsspeicher im realen Einsatz ist der Grad der Trocknung von den zur Verfügung stehenden Temperaturniveaus abhängig, da diese die Beladung  $c(T, p)$  des Sorptionsmaterials und daraus entsprechend den Beladungsunterschied  $c(T_{\text{tief}}, p) - c(T_{\text{hoch}}, p) = \Delta c(T, p)$  bestimmen.

<sup>1</sup> Die exakte Bestimmung der Leistung müsste mit der Adsorptionsenthalpie  $\Delta h_A(T, c)$  gemacht werden. Diese hängt aber stark von der Beladung und der Temperatur des Silicagels ab und müsste hier experimentell und rechnerisch bestimmt werden [15].

## Temperaturprofile – Desorption

In der Ladephase eines Speichersystems ist das Temperatur Niveau  $T_{des}$  der Wärmequelle entscheidend, da die am Sorbent (Silicagel, Zeolith) adsorbierte Wassermenge  $c = c(T, p)$  eine Funktion der Temperatur  $T$  und des Druckes  $p$  ist. Um zu sehen wie sich die Temperaturverteilung  $T(T, r)$  in einer runden Sorptionsfine beim Ausheizen bzw. bei der Trocknung ausbildet, wurden Messungen an verschiedenen Modellen (s. Fig. 2 / 3), bei unterschiedlichen Temperaturen im Kupferrohr von 50, 60, 70 und 80 °C durchgeführt.

Stellvertretend sind in den Fig. 11 und 12 Temperaturprofile im Sorbent Festbett mit Zeolith von 1 – 2 mm und 2 – 3 mm Kugel Durchmesser und im Wärmeenergie führenden Kupferdraht Gewebe (s. Fig. 3) dargestellt.



**Fig. 11:** Messung. Zeolith Festbett 2 – 3 mm Kugeln. Oben: Temperatur  $T = T(T, r)$  im Sorbent Schüttgut in Funktion der Position 1 = Rohroberfläche, 2 = 3 cm Abstand von der Rohrachse. Unten: Temperatur  $T = T(T, r)$  im Wärmeträger Metall in Funktion der Position 1cm, 3 cm, 5 cm.

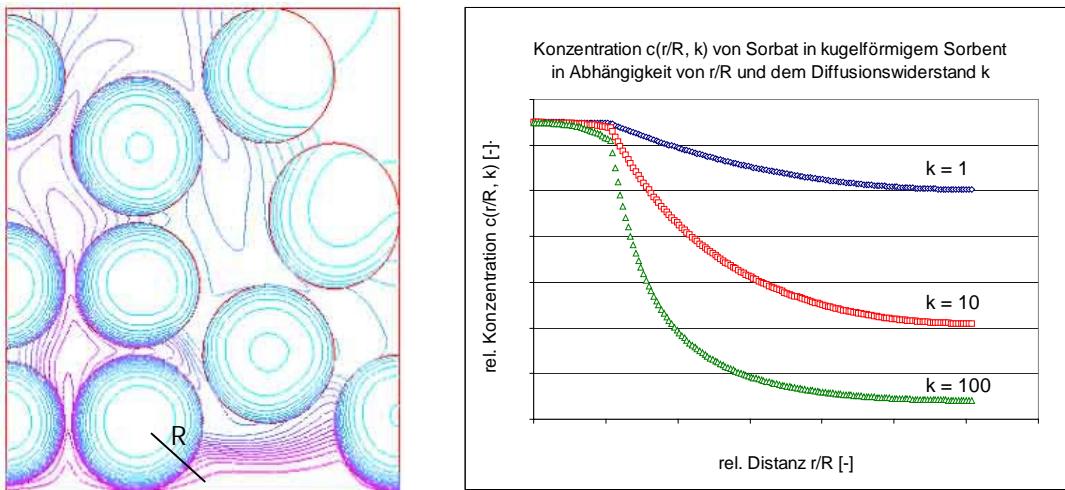
**Fig. 12:** Messung. Zeolith Festbett 1 – 2 mm Kugeln. Oben: Temperatur  $T = T(T, r)$  im Sorbent Schüttgut in Funktion der Position 1 = Rohroberfläche, 2 = 3 cm Abstand von der Rohrachse. Unten: Temperatur  $T = T(T, r)$  im Wärmeträger Metall in Funktion der Position 1 cm, 3 cm, 5 cm.

Die Messungen zum Temperaturverlauf  $T(T, r)$  im Zeolith Festbett zeigen eine starke Abhängigkeit der Temperatur vom Radius  $r$ , d.h. dem Abstand von der Rohroberfläche (Position 1). Dies bedeutet, dass an weiteren Modellen der Durchmesser der Fine reduziert werden muss. Die Temperaturunterschiede an den verschiedenen Messpositionen im Kupfer Drahtgewebe sind nicht so gross.

## Berechnungen und Resultate

### Sorbat Aufnahme in der Adsorption

In den Fig. 13 und Fig. 14 sind qualitative Resultate von Rechnungen zur Adsorption von Sorbent auf einem Sorbat dargestellt. Deutlich sichtbar ist in Fig. 13 eine Abnahme der Dichte der Konturlinien von unten nach oben.



**Fig. 13:** Simulation am Partikel Modell. Konzentrations- und Druckverlauf des Sorbates in einer Granulatschüttung aus kugelförmigen Partikeln. Berechnung der gekoppelten Diffusions- ( $k=100$ ) und der Navier-Stokes Gleichungen. Konturplot: Eng aneinander liegende Linien deuten einen hohen Konzentrationsgradienten an, s. Fig. 11.

**Fig. 14:** Modell. Konzentrationsverlauf  $c(r/R, k)$  des Sorbates in kugelförmigen Sorbent Partikel mit unterschiedlichen Diffusionskonstanten aus dem Beispiel von Fig. 13. Der Kurvenverlauf zeigt je nach Diffusionswiderstand einen sehr starken Gradienten in Richtung des Zentrums der Sorbent Kugel. Der Adsorptionsprozess findet in diesem Beispiel ( $k = 100$ ) vor allem an der Oberfläche der Kugel statt.

Fig. 14 verdeutlicht, wie wichtig eine grosse geometrische Oberfläche ist (= Summe der Kugeloberflächen in diesem Beispiel; nicht zu verwechseln mit der inneren Oberfläche der Sorbent Partikel). Der Schwerpunkt der Arbeiten wird weiterhin im experimentellen Bereich liegen, da an einem Speichermodell die Leistung gemessen werden kann. Vermehrt sollen aber in der Auslegung der Bauteile und zum besseren Verständnis der ablaufenden Prozesse Rechner gestützte Werkzeuge zum Einsatz kommen und diese „Tools“ wenn nötig zugekauft werden.

## 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 wird Anfang Dezember in Graz ein Vortrag zum Projekt gehalten.

## Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Die Materialeigenschaften limitieren den Prozess der Kälte- und Wärmeenergie Speicherung bzw. die Anwendung im Temperaturbereich von Solarkollektoren [1]. So hat Zeolith 13 X in Kombination mit Wasser eine ideale Trocknungstemperatur von 200 °C. Bei Silicagel, ebenfalls in Kombination mit Wasser, sollte die Temperatur 120 °C nicht überschreiten, da dieses Material bei höheren Temperaturen degradiert. Der Wert von 200 °C entspricht etwa der Stagnationstemperatur von Flachkollektoren, bei evakuierten Röhrenkollektoren ist diese bei rund 300 °C. Die Leistung der Kollektoren ist bei Stagnationstemperatur allerdings gleich null. Die Suche nach neuen, festen Sorptionsmaterialien [2, 3] bleibt daher Bestandteil der Literaturrecherche. Eine Erweiterung auf flüssige Sorptionsmaterialien ist ebenfalls denkbar [16]. Trotz den vorhandenen Veröffentlichungen über die Anwendung von Sorptionsmaterialien, vor allem in der Kältetechnik, liegen nicht alle den Prozess bestimmenden Daten im nötigen Umfang vor.

Im Sorptionsprozess sind der Wärme- ( $dq/dt$ ) und der Stofftransport ( $dm/dt$ ) immer gekoppelt. Daher sind in der Dimensionierung die Parameter Übertragungsfläche A, Wärmeübertragungszahl  $\alpha$  und Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  sowie Stoffübergangszahl  $\beta$  und Stoffdiffusionszahl D in Abhängigkeit vom Prozessdruck p und der Prozesstemperatur T zu berücksichtigen [2]. Zum Verständnis des Sorptionsprozesses und in der Dimensionierung sollen vermehrt Rechner gestützte Werkzeuge eingesetzt werden.

In einem offenen Sorptionssystem ist die Temperaturerhöhung maximal  $\Delta T = [\Delta x * \Delta h_A / (c_{pL} * (\Delta x / \Delta c) * c_s)]$  [15]. Wegen der Verluste und der benötigten Luftmengen wird es schwieriger Wasser von Brauchwarmwassertemperatur zu erzeugen. Wir hatten uns daher für die geschlossene Version entschieden. Im geschlossenen System hatten wir mit Berücksichtigung des Verlustes am Wärmeübertrager eine Temperaturerhöhung  $\Delta T$  von 28 °C (10 °C in der Wasservorlage) bis 42 °C (25 °C in der Wasservorlage) gemessen. Im geschlossenen System ist aber die Leistung durch den maximal zur Verfügung stehenden Dampfdruck begrenzt. Dies bedeutet, dass die Festbetthöhe nur im Bereich einiger cm sein darf.

Zur Wärmezu- und Wärmeabfuhr in das Sorptionsmodul ist ein neuer Wärmeübertrager mit vier, wie in Fig. 3 dargestellten, Finen gebaut worden [4 - 14]. Die Oberfläche des Wärmeübertragers muss noch entsprechend behandelt werden, so dass die Wärmeübertragung auch durch Strahlung erfolgen kann [12, 13]. Die Geometrie des Sorptionsmoduls ist den Anforderungen besser angepasst. Die demnächst folgenden Arbeiten bestehen aus einem Helium Lecktest der zusammengesetzten Apparatur und der Inbetriebnahme.

Eine internationale Zusammenarbeit ist im Rahmen des IEA Tasks 32 „Storage concepts for solar buildings“ im Bereich Solar Heating & Cooling aufgenommen worden. Dieser Task wird von Jean-Christophe Hadorn geleitet und gibt uns die Möglichkeit zum Austausch von Daten und Ideen mit nationalen und internationalen Partnern. Für unsere Arbeiten ist dies sehr fruchtbar, nebst den Literaturrecherchen, die wir regelmässig durchführen.

## Referenzen

- [1] **Sorptionspeicher – Sorptionsmaterialien / Studie Stoff- & Wärmeaustausch**  
Jahresbericht 2003, P. Gantenbein et al., ENET Publikationen – Thermische Speicherung.

- [2] **Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics.** Duong D. Do. Imperial College Press ICP. 1998.
- [3] **A route to high surface area, porosity and inclusion of large molecules in crystals.** Hee K. Chae, et al., Nature Vol. 427, p 523, 5 February 2004.
- [4] **Method and apparatus for achieving high reaction rates.** US Patent Nr. 5 441 716, Aug. 15, 1995. U. Rockenfeller, Rocky Research, Boulder City.
- [5] **Adsorber- / Desorber- Wärmetauscher.** Europäische Patentanmeldung EP 1 180 650 A1. Veröffentlichungstag: 20. 02. 2002 Patentblatt 2002/08. Anmelder: Vaillant GmbH, 42859 Remscheid (DE).
- [6] **Structure particulière d'accélération de la vitesse de réactivité de la zéolithe et procédé de dépôt de la zéolithe sur ladite structure.** Demand de brevet Europeen 0 470 886 A1. Date de dépôt: 26. 07. 91. Blaizat Claude, Paris (F).
- [7] **Zeolite blanks with a high heat conductivity and process for making the same.** US patent Nr. 4 674 563. Jun. 23, 1987. P. Maier-Laxhuber et al..
- [8] **Adsorptionswärmepumpe.** Offenlegungsschrift DE 102 38 507 A1. Anmeldetag: 16. 8. 2002, Anmelder: Vaillant GmbH, 42859 Remscheid (DE).
- [9] **Computer simulation of a silica gel-water adsorption refrigeretion cycle – the influence of operating conditions on cooling output and COP.**  
Saha, B. B.; Boelman, E. C., and Kashiwagi, T. Technical and symposium papers. Annual meeting of the American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE Transactions); 24 Jun 1995 -28 Jun 1995. San Diego, CA. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.; Vol. 101, Part 2, pp. 348-357.
- [10] **Experimental investigation of a silica gel – water adsorption refrigeration cycle – the influence of operating conditions on cooling output and COP.** E. C. Boelman, B. B. Saha, T. Kashiwagi. ASHRAE Transactions, Vol. 101, part 2, 1995, p. 358.
- [11] **Parametric study of a silica gel – water adsorption refrigeration cycle – the influence of thermal capacitance and heat exchanger UA-values on cooling capacity, power density, and COP.** E. C. Boelman, B. B. Saha, T. Kashiwagi. ASHRAE Transactions, Vol. 103, part 1, 1997, p. 139.
- [12] **Heat Transfer to Packed and Stirred Beds from the Surface of Immersed Bodies.** E. U. Schlünder, Chem. Eng. Process., 18 (1984) 31-53.
- [13] **VDI-WÄRMEATLAS Recherchieren – Berechnen –Konstruieren.** Herausgeber: Verein Deutscher Ingenieure, Springer Verlag Berlin Heidelberg 1997.
- [14] **Design and testing of an automobile waste heat adsorption cooling system.** L. Z. Zhang, Applied Thermal Engineering 20 (2000) 103-114.
- [15] **Thermochemical Energy Storage in Open Sorption Systems – Temperature Lift, Co-efficient of Performance and Energy Density.** A. Hauer. TERRASTOCK 2000, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart Germany, August 2000.
- [16] **Advanced Commercial Liquid-Desiccant Technology Development Study.** A. Lowenstein, S. Slayzak, J. Ryan, A. Pesaran, NREL/TP-550-24688, Nov. 1998. DRYKOR Klimageräte, vertreten durch ECOPAC AG CH-8704 Herrliberg.