

Jahresbericht 2002, 6. Dezember 2002

Sorptionsspeicher

Aufbau und Inbetriebnahme der Laboranlage

Autor und Koautoren	Paul Gantenbein, Stefan Brunold, Ueli Frei
beauftragte Institution	Institut für Solartechnik SPF der Hochschule Rapperswil HSR
Adresse	Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil
Telefon, E-mail, Internetadresse	055 222 48 21, paul.gantenbein@solarenergy.ch, www.solarenergy.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	
Dauer des Projekts	1. 2. 2002 - 31. 12. 2002

ZUSAMMENFASSUNG

Eine geschlossene Sorptionsspeicheranlage wurde aufgebaut. Die zentralen Apparate sind das Sorptionsmodul und die Wasservorlage, welche über eine Rohrleitung mit eingebautem Kugelhahn miteinander verbunden sind. In beiden Behältern ist ein Wärmetauscher eingebaut. Dem Sorptionsmodul können 35 l Sorptionsmaterial und der Wasservorlage 24 l entsalztes Wasser eingefüllt werden. Der externe Glykol Kreislauf für das Sorptionsmodul besteht aus einer elektrischen Heizung für die Wärmezufuhr und einem Lamellen Wärmetauscher zur Wärmeabfuhr. Der Wasservorlage wird über ein Thermostatbad Wärme zu- oder abgeführt.

Bei der Dimensionierung der Wärmetauscher sind die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und des Wärmeübergangs zu berücksichtigen. Dies führt im Fall des Sorptionsmoduls zu einem Spiralfinen Wärmetauscher mit entsprechender Oberflächenbehandlung und einer Fläche von 1.8 m². Der Wasservorlage wurden zwei Spiralschlauch Wärmetauscher mit je einer Fläche von 0.9 m² eingebaut.

Für die Messungen wurde das Sorptionsmaterial Silicagel 720 eingesetzt und eine Lade- / Ausheiztemperatur von 120 °C gewählt. Die Temperatur Erhöhung im ersten externen Kreislauf, in Abhängigkeit von der Wassertemperatur in der Vorlage, liegt bei maximal 42 °C, bei 25 °C in der Wasservorlage. Wird die Systemgrenze nur um das Sorptionsmodul gelegt, dann beträgt die aus dieser Messung bestimmte Energiedichte 106 kWh/m³. Legt man aber richtigerweise die Grenze auch um die Wasservorlage, dann wird die Energiedichte auf einen Wert von knapp 20 kWh/m³ reduziert. Die Sättigung des Silicagels liegt bei den gewählten Temperaturen maximal bei rund 20 Gew.%.

Die in der Literatur angegebenen Energiedichten mit 140 bis 150 kWh/m³ sind bezogen auf das Sorptionsmodul zwar richtig. Bei einem realen System ist die Systemgrenze aber weiter zu fassen, so dass die Wasservorlage dazu gehört. D. h. immer, wenn Wärme aus dem „Speicher“ entzogen werden soll, dann muss der Wasservorlage die Verdampfungsenthalpie des Wassers zugeführt werden. Dies bedeutet; das System hat eine Kühlleistung entsprechend der Saugleistung des Sorptionsmaterials für Wasserdampf. Die Anwendung des Systems zur Kühlung im Sommer kann daher interessant sein.

In der laufenden Projektphase waren noch keine Arbeiten mit nationalen Partnern vorgesehen.

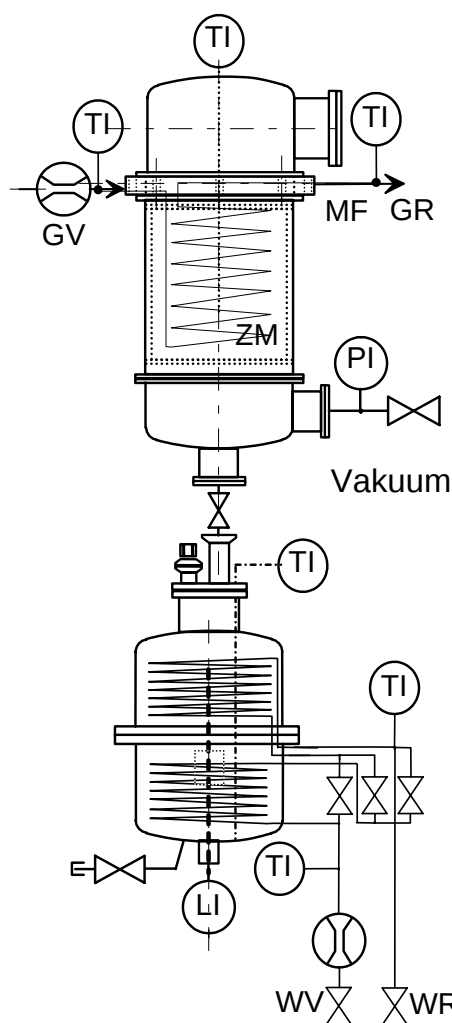
Eine internationale Zusammenarbeit soll in Rahmen eines IEA Tasks 32 „Storage concepts for solar buildings“ im Bereich Solar Heating & Cooling aufgenommen werden.

Projektziele

Durch den Aufbau einer geschlossenen Sorptionspeicheranlage im Labormassstab sollen Erfahrungen im Betrieb gesammelt und Aussagen zu deren Betriebsbedingungen gemacht werden. Insbesondere sind die in der Literatur erwähnten, hohen Energiedichten für Sorptionsmaterialien, mit Werten vom 2- bis 3-fachen jener von Wasser, nach zu messen. Da der Prozess beim Partialdruck des Wassers abläuft sind die Bauteile des Systems in Vakuumausführung. Das Sorptionsmaterial wird durch eine Literaturrecherche bestimmt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Aufbau der Anlage: Die geschlossene Sorptionsspeicheranlage wurde für eine Energie von 3 – 5 kWh dimensioniert [1, 2] und aufgebaut. Daher kann das Sorptionsmodul 35 l Sorptionsmaterial aufnehmen und in der Wasservorlage haben 24 l Wasser Platz. Die Anlage besteht aus den folgenden Teilen: Sorptionsspeichermodule zur Aufnahme des Sorptionsmaterials (Silicagel, Zeolith); Wärmetauscher im Sorptionsmodul eingebaut; erster externer Wärmeträger Kreislauf zur Entnahme/Zuführung von Wärme aus/in



dem/das Sorptionsmodul; Wasservorlage als Speicher für den Adsorptionsstoff (Wasser); dem Wärmetauscher in der Wasservorlage eingebauten; Verbindungsrohrleitung zwischen Sorptionsmodul und Wasservorlage mit eingebautem Absperrventil (Kugelhahn); zweiter externer Kreislauf zur Entnahme/Zuführung von Wärme aus/in der/die Wasservorlage; Messfühler für Temperatur, Druck, Wasserstand und Durchfluss; Datenerfassung mit einem Logger und PC. In Fig. 1 ist eine schematische Darstellung der Anlage sowie in Fig. 2 bis 4 sind Fotos zu sehen. Als Sorptionsmaterial wurde Silicagel (UETIKON 720) mit einer Körnung von 1 – 3 mm eingesetzt.

Fig. 1: Schematischer Aufbau der Sorptionsspeicheranlage. Oben ist das Sorptionsmodul (ZM) und unten ist die Wasservorlage. Im Sorptionsmodul ist ein Spiralfinen Wärmetauscher und in der Wasservorlage ist ein Spiralschlauch Wärmetauscher eingebaut.

Bezeichnungen:

TI, PI, LI: Temperatur-, Druck-, Niveaufühler.
GV/GR: Glykolvorlauf / Glykolrücklauf; erster externer Kreislauf.

WV, WR: Wasservorlauf / Wasserrücklauf; zweiter externer Kreislauf (Thermostatbad).

MF: Messflansch.



Fig. 2: Auf dem Bild ist der untere Teil des Sorptionsmoduls, die Verbindungsrohrleitung DN 40 (Mitte) und die Wasservorlage (unten) zu sehen.



Fig. 3: Sorptionmodul mit Messflansch (oben) und Fluidheizung (rechts). Der Durchmesser des Moduls beträgt 300 mm.



Fig. 4: Turbomolekularpumpe mit Druckmessfühlern (Pirani und Penning). Zum evakuieren der Apparatur wird ein Pumpstand ausgerüstet mit einer Tubomolekular- und einer Schieberpumpe eingesetzt.

Apparate und Komponenten

Nachdem die Wahl der Materialien mit Feststoff (Silicagel, Zeolith) und Flüssigkeit/Dampf (entsalztes Wasser) getroffen ist, müssen die zentralen Probleme des Wärme- und Stofftransports gelöst werden.

Wärmetransport

Um eine optimale Nutzung der Wärmeenergie zu erzielen waren entsprechende Massnahmen zum guten Wärmetransport zu treffen. Dazu mussten Wärmetauscher für das Sorptionsmodul und für die Wasservorlage gebaut werden.

Die von einem Wärmetauscher übertragene Wärmemenge q wird mit dem Ausdruck

$q = \alpha \cdot A \cdot \Delta T$ formuliert (α = Wärmeübergangszahl, A = Fläche, ΔT = Temperaturdifferenz). Damit ist eine hohe Wärmemenge übertragbar, wenn α , A und ΔT gross gemacht werden. In unserem Fall ist ΔT vom System Wasser - Sorptionsmaterial und von den äusseren Wärmequellen (Solaranlage) abhängig. Da die Wärmeaustauschfläche A nicht beliebig gross gemacht werden kann, weil sonst kein Sorptionsmaterial oder Wasser mehr Platz hat sind Abschätzungen für Wärmeleitzahlen und Wärmeübergangskoeffizienten notwendig.

Für den in eine Kugelschüttung eingetauschten Wärmetauscher sind diese Grössen (λ_{bed} , α_{WS}) in Abhängigkeit vom Material der Schüttung, Restgasdruck p in den Behältern, dem Kugeldurchmesser d und der Temperatur T der Schüttung bestimmt worden [3, 4, 5]. Da die Strahlung beim Wärmeübergang bei tiefen Drücken einen wesentlichen Anteil ausmacht, muss die Oberfläche des Wärmetauschers eine hohe Emission ε haben. Die Rechnungen wurden mit einem $\varepsilon = 0.9$ der Wärmetauscheroberfläche durchgeführt.

Sorptionsmodul

Die geringe Wärmeleitfähigkeit der Sorptionsmaterialien sowie der tiefe Wärmeübergangskoeffizient vom Sorptionsmaterial auf eine Wärmeenergie aufnehmende Oberfläche führt auf die Konstruktion eines „Spiralfinen Wärmetauschers“. Dieser hat eine grosse Oberfläche und einen niedrigen Abstand des Sorptionsmaterials von den Energie übertragenden Oberflächen [6, 7]. In Fig. 5 ist die Mittellinie des Grundrisses dieses Apparates dargestellt.

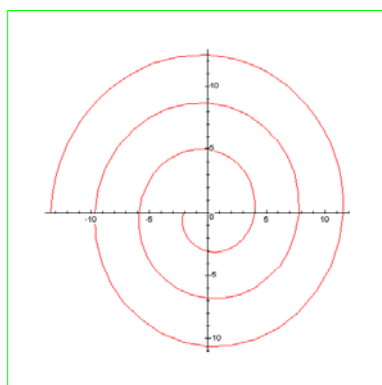


Fig. 5: Mittellinie des Grundrisses des „Spiralfinen Wärmetauschers“ aus Kupfer. Die Mittellinie entspricht dem Wärmeträger führenden Rohr mit einem Durchmesser von 8 mm. Der Wärmetauscher hat 4 in Spiral Form gewickelte Solarabsorberfinen mit je einer Länge von 1.9 m sowie einer Breite von 0.12 m und hat damit eine Übertragungsfläche von 1.8 m².



Fig. 6: Foto des oberen Teils des Sorptionsmoduls mit Messflansch sowie den Vakuumdurchführungen für die Temperaturfühler Pt 100 und das Wärmeträgermedium.



Fig. 7: Foto des Spiralfinen Wärmetauschers von oben. Die Oberfläche ist noch nicht auf ein hohes ϵ behandelt. Dieser Wärmetauscher ist im Sorptionsmodul eingebaut.

Wasservorlage

Wie im Falle des Sorptionsmoduls musste auch zum Einbau in die Wasservorlage ein Wärmetauscher mit einer grossen Austauschfläche gebaut werden. Die Randbedingungen, wie kleiner Platzbedarf und korrosionsbeständiges Material, führten auf die Konstruktion von zwei gleichen Spiralschlauch Wärmetauschern aus rostfreiem Wellschlauch. Die Übertragungsfläche eines Wärmetauschers beträgt 0.9 m^2 . In Fig. 9 ist das Foto eines der beiden Spiralwärmetauscher abgebildet.



Fig. 8: Foto der Wasservorlage mit den Vakuumdurchführungen an die Spiralschlauch Wärmetauscher. Der Stutzen für die Vakuumpumpe ist oben angeordnet.



Fig. 9: Foto eines Spiralschlauch Wärmetauschers von oben. Zwei solche Wärmetauscher sind in der Wasservorlage eingebaut.

Vakuumtechnik

Um die Anlage unter Vakuum betreiben zu können, müssen die Bauteile wie Behälter, Apparate, Flanschen, Dichtungen, Wellschläuche, Ventile usw. in Vakuum Ausführung dimensioniert sein.

Zur Evakuierung der Anlage wird der beim SPF vorhandene Pumpstand, ausgerüstet mit einer Turbomolekular- und einer Schieberpumpe, eingesetzt, s. Fig. 4. Die Druckanzeige besteht aus einer Pirani Messzelle und einer Penning Kaltkathodenmesszelle. Für die Druckmessung in der Sorptionsanlage während des Betriebs, dient ein kapazitiv messender Absolutdruck Sensor.

Messungen

In einer Messreihe wurde mit Silicagel 720 (Zeochem AG Uetikon) im Sorptionsmodul die maximale Temperatur Erhöhung im ersten externen Kreislauf, in Abhängigkeit des Temperaturniveaus in der Wasservorlage, gemessen. Die Temperatur in der Wasservorlage wurde mit einem Thermostatbad (zweiter externer Kreislauf) eingestellt. Im gleichen Versuchsaufbau wurde auch die Energiedichte bestimmt. Wobei auf Empfehlung des Silicagel Lieferanten die Lade- / Ausheiztemperatur nicht höher als 120 °C gewählt wurde. Nach Angaben des Herstellers zersetzt sich Silicagel bei höheren Temperaturen. Die Messergebnisse sind in den Fig. 10 und 11 aufgetragen.

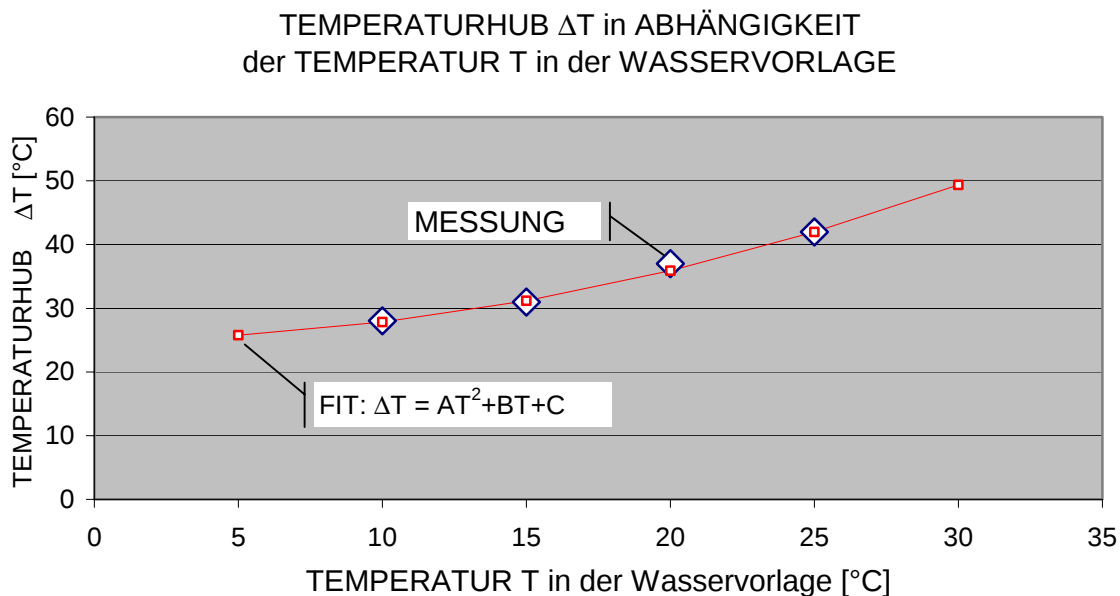


Fig. 10: Temperatur Erhöhung im externen Kreislauf in Abhängigkeit der Wassertemperatur in der Wasservorlage. Bei dieser Messung wird dem Sorptionsmodul keine Wärme entzogen, d. h. es ist die maximal mögliche Temperatur Erhöhung.

Die Wahl des unteren Temperaturniveaus, mit Werten von 10 °C bis 25 °C, basiert auf der Überlegung, dass Wärme aus den Solarkollektoren bei Temperaturen ab rund 35 °C schon direkt genutzt werden kann.

Im gemessenen Bereich kann die Temperatur maximal um 30 °C bis 42 °C erhöht werden. Die quadratische Funktion durch die Messpunkte in Fig. 10 dient dem Auge und die Extrapolation der Kurve über die Messpunkte hinaus soll den Trend angeben.

In Fig. 11 sind die Energiedichte und der Wasserverbrauch, in Abhängigkeit von der Wassertemperatur in der Wasservorlage, aufgetragen. Im Temperaturbereich 10 °C bis 25 °C zeigen die Kurven einen linearen Zusammenhang. Wobei die Messwerte bei 10 °C und bei 15 °C unter bzw. über dem linearen Fit liegen. Bei 25 °C beträgt die Energiedichte 106 kWh/m³. Die extrapolierte Kurve für die Energiedichte erreicht Werte aus der Literatur [1, 2]. Die Sättigung des Sorptionsmaterials Silicagel 720 (max. 32 Gew.%) wurde abgeschätzt und liegt im Bereich von 4 Gew.% (10 °C) bis 20 Gew.% (25 °C).

Wird jedoch die während dem Versuchsaufbau aus dem zweiten externen Kreislauf zugeführte, notwendige Wärmeenergie abgezogen, so kann aus dem „Speichermaterial“ nur eine sehr viel geringere, gespeicherte Energie entzogen werden. Diese entspricht der Adsorptionsenthalpie von Wasser an Silicagel 720. In Fig. 11 wird dies mit den bei tiefen Werten von ca. 6 bis 20 kWh/m³ liegenden runden Punkten illustriert.

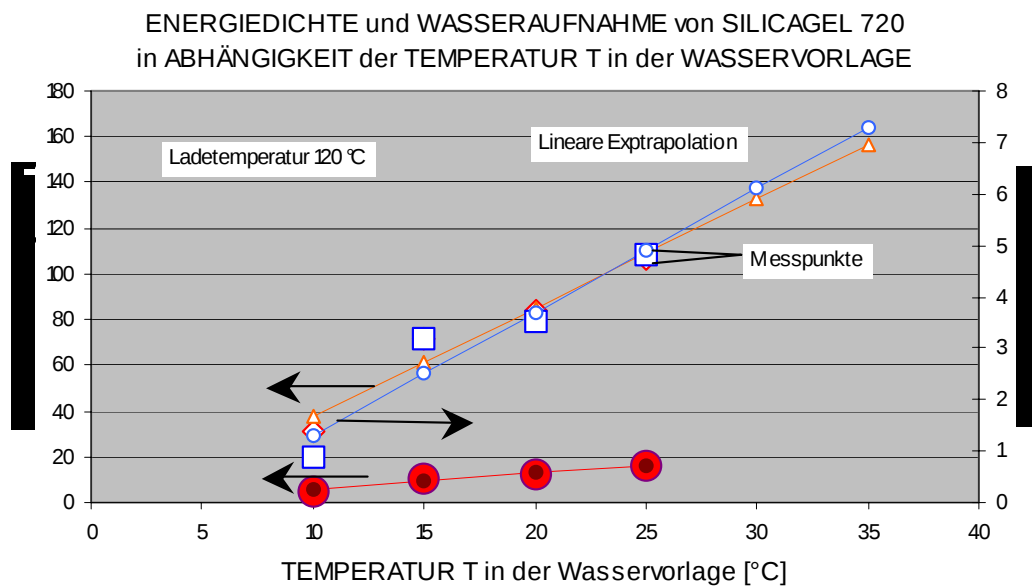


Fig. 11: Energiedichte (Quadrat) und Wasseraufnahme (Diamant) in einer Silicagel Schüttung in Abhängigkeit von der Wassertemperatur in der Wasservorlage und einer Lade- bzw. Desorptionstemperatur von 120 °C. Die runden Punkte zeigen die effektive Energiedichte. Dies ist die entzogene Energie minus zugeführte Energie, bezogen auf das Volumen des Sorptionsmaterials (inkl. Wärmetauscher). Die lineare Extrapolation zeigt, bei welcher Temperatur in der Wasservorlage die Wärme nachgeführt werden muss um die Werte gemäss Literatur zu erreichen [2].

Wenn die Systemgrenze um das Sorptionsmodul gelegt wird, dann bestätigen unsere Messungen in der Extrapolation jene in der zitierten Literatur [1, 2]. Dies ist aber nicht der Fall, wenn die Systemgrenze realistisch auch um die Wasservorlage gelegt wird; s. vier grosse runde Punkte in Fig. 11 unten.

Eine Rechtfertigung des Begriffes „Sorptionsspeicher“ für das System ist daher nur bei Erweiterung zur Anwendung in Wärme- und Kälteenergiesystemen sinnvoll [10, 11].

Nationale Zusammenarbeit

In der laufenden Projektphase waren keine Arbeiten mit nationalen Partnern vorgesehen.

Internationale Zusammenarbeit

In der laufenden Projektphase wurden keine Arbeiten mit internationalen Partnern durchgeführt. In Zukunft jedoch soll im Rahmen des IEA Task 32 „Storage concepts for solar buildings“ im Bereich Solar Heating & Cooling mit ausländischen Instituten zusammen gearbeitet werden.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

In der geschlossenen Laborapparatur können Lade- und Entladezyklen betrieben werden. Für die Ladezyklen (Desorption) liegt die maximale Temperatur bei 120°C. Der Verlauf der Temperaturprofile im Sorptionsspeicher ist messbar.

Zur Beurteilung von weiteren Sorptionsmaterialien, die in der Laboranlage zum Einsatz kommen sollen, sind deren Stoffdaten aus der Literatur oder von möglichen Lieferanten zu besorgen. Die Beurteilungsmethoden werden aus der Literatur erarbeitet. Mit neuen, leistungsfähigeren Feststoff Materialien könnten bessere Resultate als die erreichten erzielt werden. Eine Erweiterung auf flüssige Sorptionsmaterialien wäre ebenfalls denkbar [11].

Zur besseren Entnahme der Wärme aus dem Sorptionsmodul und der Wasservorlage sind weitere Entwicklungen an den Wärmeübertragern notwendig [5, 6, 7, 8].

Die in der Literatur angegebenen Energiedichten mit 140 bis 150 kWh/m³ [1, 2] sind bezogen auf das Sorptionsmodul zwar richtig. Bei einem realen System ist die Systemgrenze aber weiter zu fassen, so dass die Wasservorlage dazu gehört. D. h. immer, wenn Wärme aus dem „Speicher“ entzogen werden soll, dann muss der Wasservorlage die Verdampfungsenthalpie des Wassers zugeführt werden. Dies bedeutet, das System hat eine Kühlleistung entsprechend der Saugleistung des Sorptionsmaterials für Wasserdampf. Die Anwendung des Systems zur Kühlung im Sommer kann daher interessanter sein, [9, 10, 11].

Die aufgebaute Anordnung von senkrecht über einander stehenden Behältern kann im Labor beibehalten werden. Im Hinblick auf eine Pilotanlage, die grösser ist als die Laboranlage, kann aus Gründen des Platzbedarfs eine andere Anordnung günstiger sein. Studien dazu werden durchgeführt.

Eine internationale Zusammenarbeit soll im Rahmen eines IEA Tasks 32 „Storage concepts for solar buildings“ im Bereich Solar Heating & Cooling aufgenommen werden. Über den Stand der Vorbereitungen zu diesem Task 32 kann Jean-Christophe Hadorn Auskunft geben. Der Austausch von Daten und Ideen mit internationalen Partnern wird für unsere Arbeit fruchtbar sein.

Referenzen

- [1] **Closed system adsorption in silica gel.** W. Mittelbach, UFE SOLAR GmbH Pankstr. 8-10, 13127 Berlin, Germany, IEA Workshop on Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Domestic Applications, Rapperswil, 11-10-2001.
- [2] **Sorptionsspeicher – Langzeitspeicherung von Wärme mit hohen Energiedichten.** G. Purkarthofer, 6. Internationales Symposium für Sonnenenergienutzung „GLEISDORF SOLAR 2002“, 16. bis 19. Oktober 2002, Gleisdorf Österreich.
- [3] **Die effective radiale Wärmeleitfähigkeit gasdurchströmter Schüttung.** R. Bauer, E. U. Schlünder, VDI-Forschungsheft 582, Düsseldorf VDI-Verlag 1977. Gekürzte Fassung.
- [4] **Heat Transfer to Packed and Stirred Beds from the Surface of Immersed Bodies.** E. U. Schlünder, Chem. Eng. Process., 18 (1984) 31-53.
- [5] **VDI-WÄRMEATLAS Recherchieren – Berechnen – Konstruieren.** Herausgeber: Verein Deutscher Ingenieure, Springer Verlag Berlin Heidelberg 1997.

- [6] **Europäische Patentanmeldung EP 1 180 650 A1.** Adsorber-/Desorber-Wärmetauscher. Veröffentlichungstag: 20. 02. 2002 Patentblatt 2002/08. Anmelder: Vaillant GmbH, 42859 Remscheid (DE).
- [7] **Design and testing of an automobile waste heat adsorption cooling system.** L. Z. Zhang, Applied Thermal Engineering 20 (2000) 103-114.
- [8] **Sorptionswärmepumpen.** F. Ziegler, Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein, DKV; 1997, Forschungsberichte des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins; Nr. 57.
- [9] **Modeling the performance of two-bed, silica gel-water adsorption chillers.** H. T. Chua, K. C. Ng, A. Malek, T. Kashiwagi, A. Akisawa, B. B. Saha. International Journal of Refrigeration 22 (1999) 194-204.
- [10] **Thermodynamic based comparison of sorption systems for cooling and heat pumping.** M. Pons, F. Meunier, G. Cacciola, R. E. Critoph, M. Groll, L. Puigjaner, B. Spinner, F. Ziegler, International Journal of Refrigeration 22 (1999) 5-17.
- [11] **Energy storage comparison of sorption systems for cooling and refrigeration.** D. Mugnier and V. Goetz, Solar Energy, Vol. 71 No. 1, pp. 47-55, 2001.