

Schlussbericht 2003, 31. März 2003

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, Fax	055 222 48 21, 055 222 48 44
Internetadresse, E-mail	www.solarenergy.ch, paul.gantenbein@solarenergy.ch
BFE Projekt-Nummer	41758
Vertrags-Nummer	87539
Dauer des Projekts	1. 2. 2002 - 31. 3. 2003

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 aus einem Thermostatbad über einen Wärmetauscher Energie 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, zur Verdampfung und zur Kondensation des Sorbates, mit je einer Fläche von 0.9 m² eingebaut.

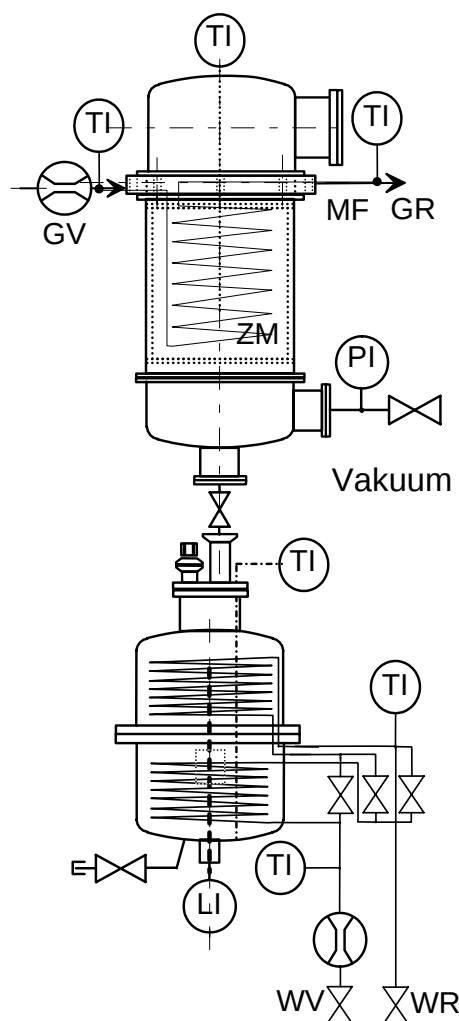
Für die Messungen wurde das Sorptionsmaterial Silicagel 720 eingesetzt und eine Lade- / Ausheiztemperatur von 120 °C gewählt. Die Temperatur Erhöhung im ersten externen Kreislauf, in Abhängigkeit von der Wassertemperatur in der Vorlage, liegt bei maximal 42 °C, bei 25 °C in der Wasservorlage. Wird die 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, weil die Verdampfungsenthalpie vorher über die Wasservorlage zugeführt werden muss. 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 alleine 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. Dies bedeutet, dass an Hand der Stoffdaten von Sorbat und Sorbent über deren Einsatz zur Heizung und/oder zur Kühlung entschieden werden muss.

Eine nationale und internationale Zusammenarbeit wird im Rahmen eines IEA Tasks 32 „Storage concepts for solar buildings“ im Bereich Solar Heating & Cooling aufgenommen.

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. Das Sorptionsmodul kann 35 l Sorbent (Sorptionmaterial) aufnehmen und in der Wasservorlage haben 24 l Wasser Platz. Die Anlage besteht aus den folgenden Teilen: Sorptionsspeichermodul zur Aufnahme des Sorptionsmaterials (Silicagel, Zeolith); Wärmetauscher im Sorptionsmodul eingebaut; erster externer Wärmeträger (Glykol) Kreislauf zur Entnahme/Zuführung von Wärme aus/in dem/das Sorptionsmodul; Wasservorlage als Speicher für das Sorbat (Wasser); dem in der Wasservorlage eingebauten Wärmetauscher; 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 Sorptions-speicheranlage. Oben ist das Sorptionsmodul (ZM) und unten ist die Wasservorlage. Im Sorptions-modul ist ein Spiralfinen Wärmetauscher und in der Wasservorlage ist ein Spiralschlauch Wärme-tauscher eingebaut. Bezeichnungen: TI, PI, LI: Temperatur-, Druck-, Niveaufühler. GV/GR: Glykolvorlauf / Glykolorücklauf; erster externer Kreislauf. WV, WR: Wasservorlauf / Wasserrücklauf; zweiter externer Kreislauf (Thermostatbad). MF: Messflansch.

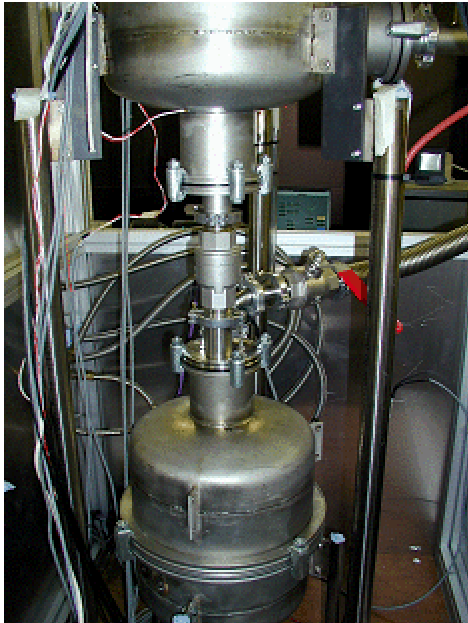


Fig. 2: Auf dem Bild ist der untere Teil des Sorptionsmoduls, die Verbindungsrohrleitung DN 40 (Mitte) und die Wasservorlage (unten) zu sehen.



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

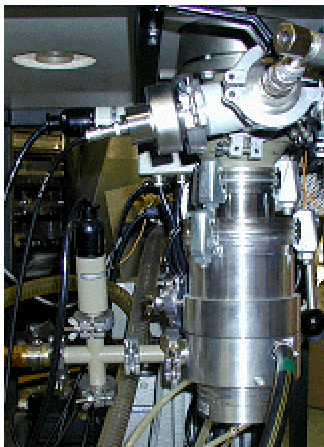


Fig. 4: Turbomolekularpumpe mit Druckmessfühlern (Pirani und Penning). Zum evakuieren der Apparatur wird ein Pumpstand ausgerüstet mit einer Tubomolekular- und einer Schieberpumpe eingesetzt.

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

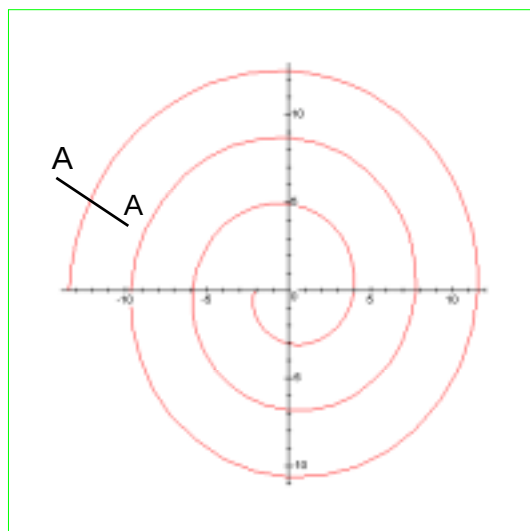
Um eine optimale Nutzung der Wärmeenergie zu erzielen, sind entsprechende Massnahmen zum guten Wärmetransport zu treffen. Dazu mussten Wärmetauscher für das Sorptionsmodul und für die Wasservorlage gebaut werden.

Die von einem Wärmetauscher übertragene Wärmemenge q wird mit dem Ausdruck $q = \alpha * A * \Delta T$ formuliert (α = Wärmeübergangszahl, A = Fläche, ΔT = Temperaturdifferenz). Damit ist eine hohe Wärmemenge übertragbar, wenn α , A und ΔT gross sind. In unserem Fall ist ΔT vom System Wasser - Sorptionsmaterial und von den äusseren Wärmequellen (Solaranlage) abhängig. Die Wärmeaustauschfläche A kann aus Platz Gründen nicht beliebig gross gemacht werden, weil sonst kein Sorptionsmaterial oder Wasser mehr Platz hat. Der Abschätzungen für Wärmeleitzahlen (λ_{bed}) und Wärmeübergangskoeffizienten (α_{ws}) kommt daher zentrale Bedeutung zu.

Für den in eine Kugelschüttung eingetauschten Wärmetauscher sind diese Grössen 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 Wärmetauscheroberfläche 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.



Schnitt A-A

Fig. 5: Rechts: 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 Kupferblechstreifen mit je einer Länge von 1.9 m sowie einer Breite von 0.12 m und hat damit eine Übertragungsfläche von 1.8 m².
Oben: Querschnitt schematisch.



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 Wellenschlauch. 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 beim Partialdruck des Sorbates 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 Versuchsablauf wurde auch die Energiedichte bestimmt. Die Lade- / Ausheiztemperatur wurde gemäss Empfehlung des Lieferanten auf die maximal zulässigen 120 °C festgelegt. Die Messergebnisse sind in den Fig. 10 und 11 aufgetragen.

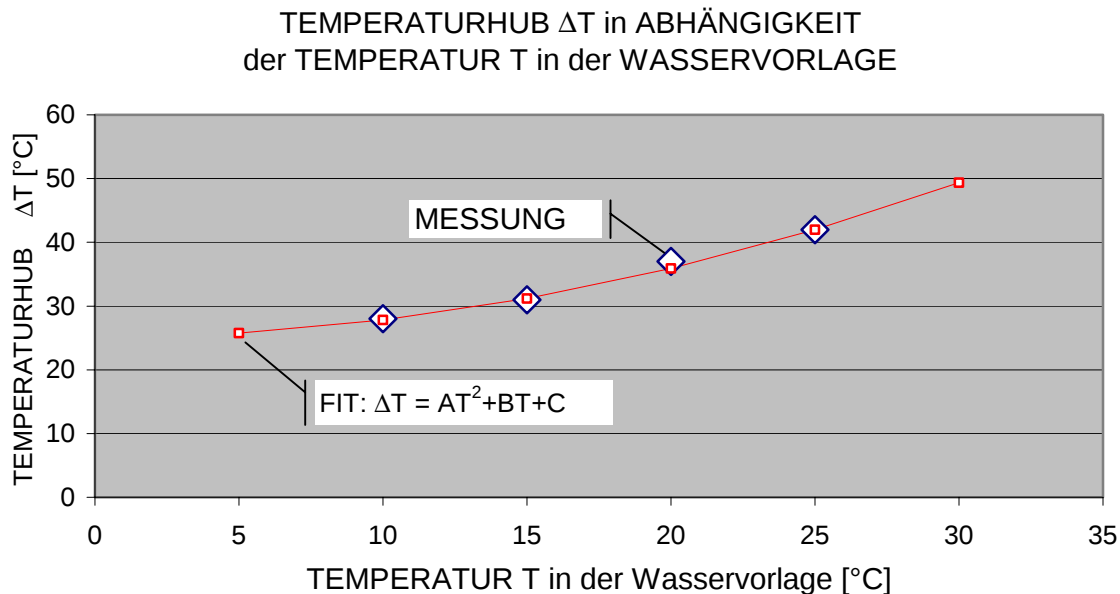


Fig. 10: Temperatur Erhöhung im externen Kreislauf in Abhängigkeit der Wassertemperatur in der Wasservorlage. Bei dieser Messung wird dem Sorptionsmodul keine Wärme entzogen, d. h. es ist die maximal mögliche Temperatur Erhöhung – analog der Leerlaufspannung einer Batterie.

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 30 °C bis 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 die Wasseraufnahme, in Abhängigkeit von der Wassertemperatur in der Wasservorlage, aufgetragen. Im Temperaturbereich 10 °C bis 25 °C zeigen die Kurven einen linearen Zusammenhang. Bei 25 °C beträgt die Energiedichte 106 kWh/m³. Die extrapolierte Kurve für die Energiedichte erreicht bei Temperaturen $\approx$ 30 °C – 35 °C Werte aus der Literatur von 140 bis 150 kWh/m³ [1, 2]. Die Sättigung des Sorptionsmaterials Silicagel 720 (max. 32 Gew.%) wurde über die gemessene Wasser Volumenänderung in der Wasservorlage abgeschätzt und liegt im Bereich von 4 Gew.% (10 °C) bis 20 Gew.% (25 °C) [2].

Wird jedoch die während dem Versuchsablauf 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

Bindungsenthalpie 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.

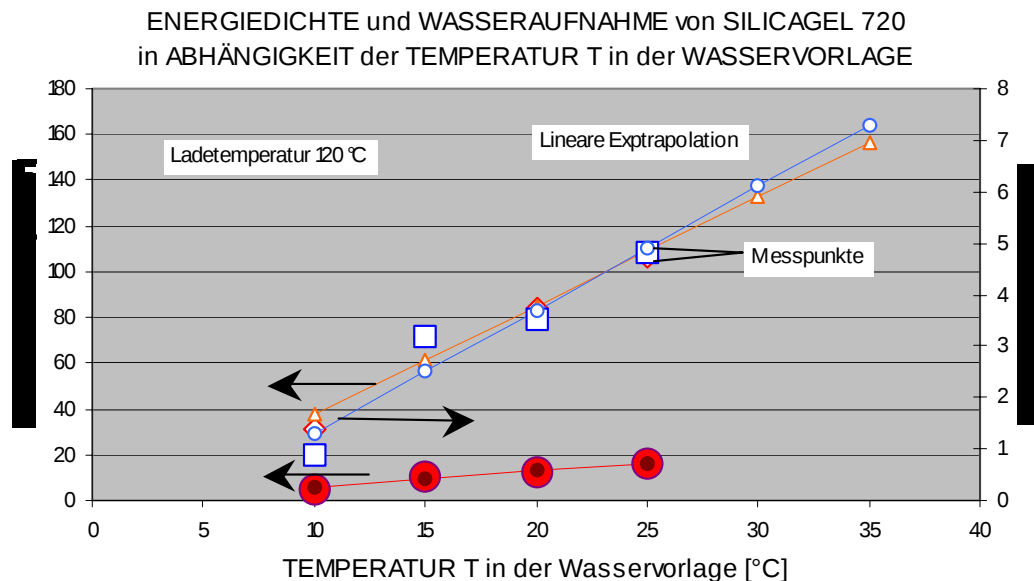


Fig. 11: Energiedichte (Quadrat Symbole) und Wasseraufnahme (Diamant Symbole) in einer Silicagel Schüttung in Abhängigkeit von der Wassertemperatur in der Wasservorlage und einer Lade- bzw. Desorptionstemperatur von 120 °C. Die runden Punkte zeigen die netto Energiedichte. Dies ist die aus dem Speicher entzogene Energie minus die der Wasservorlage 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.

Formal wird dies aus folgender Beziehung ersichtlich. Die in einem Sorptionsprozess frei werdende Adsorptionenthalpie $\Delta h_A(c, T)$ eines Sorbat - Sorbent Systems ist die Summe von der Verdampfungsenthalpie $\Delta h_V(c, T)$ des Sorbats und der Bindungsenthalpie $\Delta h_B(c, T)$ des Sorbats auf dem Sorbent:

$$\Delta h_A(c, T) = \Delta h_V(c, T) + \Delta h_B(c, T) \quad (1).$$

Wie aber oben bereits erwähnt wurde, muss bei Entladung die Verdampfungsenthalpie dem System über die Wasservorlage zugeführt werden – der Dampf muss erst erzeugt werden – bevor er zur Temperaturerhöhung im Sorbent genutzt werden kann (s. Bild A1).

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. In Zukunft jedoch soll im Rahmen des IEA Task 32 „Storage concepts for solar buildings“

im Bereich Solar Heating & Cooling mit inländischen Instituten zusammen gearbeitet werden

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 2002/03 und Ausblick 2003/04

In der geschlossenen Laborapparatur können Lade- und Entladezyklen betrieben werden. Für die Ladezyklen (Desorption/Trocknung) liegt die maximale Temperatur bei 150°C. Die Temperaturen und die Durchflüsse in den zwei externen Kreisläufen sowie der Füllstand und die Temperatur in der Flüssigkeitsvorlage und die Temperaturprofile im Sorptionsspeicher sind messbar. Mit diesen Daten lassen sich die Energiedichten berechnen.

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]. Trotz den vorhandenen Veröffentlichungen über die Anwendung von Sorptionsmaterialien, vor allem in der Kältetechnik, liegen nicht alle den Prozess bestimmenden Daten in der nötigen Genauigkeit vor. Wir werden daher eine Methode zur Bestimmung des Temperaturanstiegs und der Bindungsenthalpie von Sorbat an Sorbens erarbeiten müssen.

Zur besseren Entnahme der Wärme aus dem Sorptionsmodul und der Wasservorlage sind weitere Entwicklungen an den Wärmeübertragern notwendig [5, 6, 7, 8]. So ist eine Änderung der Anschlüsse für den Eintritt und den Austritt des Wärmeträgermediums am Wärmeübertrager im Sorptionmodul notwendig. Insbesondere muss für den Einsatz von Aktivkohle mit den Lösungsmitteln wie Methanol oder Ethanol die Oberfläche des Wärmeübertragers entsprechend anders als wie bisher behandelt sein, dass die Wärmeübertragung durch Strahlung weiterhin erfolgen kann.

Die in der Literatur angegebenen Energiedichten mit 140 bis 150 kWh/m³ [1, 2] sind bezogen auf das Sorptionsmodul zwar richtig (Im Anhang ist zur Energiedichte eine Grafik von J. van Berkel angefügt). Diese Werte sind aber nur zu erreichen, wenn die Wassertemperatur in der Wasservorlage bei 30 °C bis 35 °C liegt, [2] und Fig 11. Wasser mit dieser Temperatur kann jedoch bereits direkt für Heizzwecke eingesetzt werden. Und bei einem realen System ist die Systemgrenze zudem 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 (sofern im Sorptionsprozess der Phasenübergang *Dampf-Flüssig* auch genutzt werden möchte, s. Formel (1)). Dies bedeutet aber auch, 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 wird im Rahmen des IEA Tasks 32 „Storage concepts for solar buildings“ im Bereich Solar Heating & Cooling aufgenommen. Dieser Task wurde von Jean-Christophe Hadorn initiiert und gibt uns die Möglichkeit zum Austausch von Daten und Ideen mit nationalen und internationalen Partnern. Für unsere Arbeit wird dies sehr fruchtbar sein.

Nachfolgend werden Überlegungen im Zusammenhang mit dem IEA Task angestellt:

Geschlossener Systemtyp: In der geschlossenen Sorptionsapparatur können wir Versuche mit verschiedenen Sorptionsmaterialien und Sorbaten durchführen. Mit den gemessenen Temperaturen und Volumenströmen sind die Energien quantifizierbar. Zur Evaluation von Stoffpaaren (Sorbit & Sorbent) für den Einsatz in Sorptionsspeichern (Sorptionswärmepumpen) muss eine kleine Laborapparatur aufgebaut werden. Der Systemtyp eignet sich als „Speicher“ (bzw. als Sorptionswärmepumpe) für Wärmeenergie. Die Verdampfungsenthalpie kann (muss) dem System bei tiefer Temperatur (z.B. 10 - 20 °C) zugeführt werden.

Offener Systemtyp: Je nach Ergebnissen aus dem Subtask A muss auch ein offenes, mit Luft arbeitendes System in Betracht gezogen werden. Dieser Systemtyp hat im Allgemeinen den Vorteil bei tieferen Temperaturen (Regeneration) betrieben werden zu können (s. dazu ein mit LiCl-Lösung & Luft betriebenes System [12]) und die Verdampfungsenthalpie des Wasserdampfes (Sorbit) aus der Umgebungsluft steht dem System bereits zur Verfügung. Da in den Übergangszeiten und im Winter i.a. nur geringe Feuchtigkeiten der Luft herrschen, wird dieses System sich eher dazu eignen im Sommer zu kühlen, wenn genügend Feuchtigkeit zur Verfügung steht. „Kälteenergie“ wird in diesem Systemtyp in Form von höher konzentrierter Salzlösung gespeichert.

Die Kriterien zur Entscheidung über das Stoffpaar Sorbit – Sorbent sind im Anhang als Liste und als Grafik aufgeführt.

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 Schüttungen.** 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. Puuigjaner, 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.
- [12] **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.

Anhang: Arten der Energiespeicherung – Energiedichten – Auswahlkriterien

PROZESSE

TYP	PHASEN
PHASENÄNDERUNG	FLÜSSIG – FEST
ABSORPTION	GAS – FLÜSSIG
ADSORPTION	GAS – FEST
CHEMISCHE REAKTION	GAS – FEST

Tabelle 1: Prozesse zur Energiespeicherung – Phasenänderung, Ab-/Adsorption und chemische Reaktion.

ENERGIEDICHTEN verschiedener MATERIALIEN

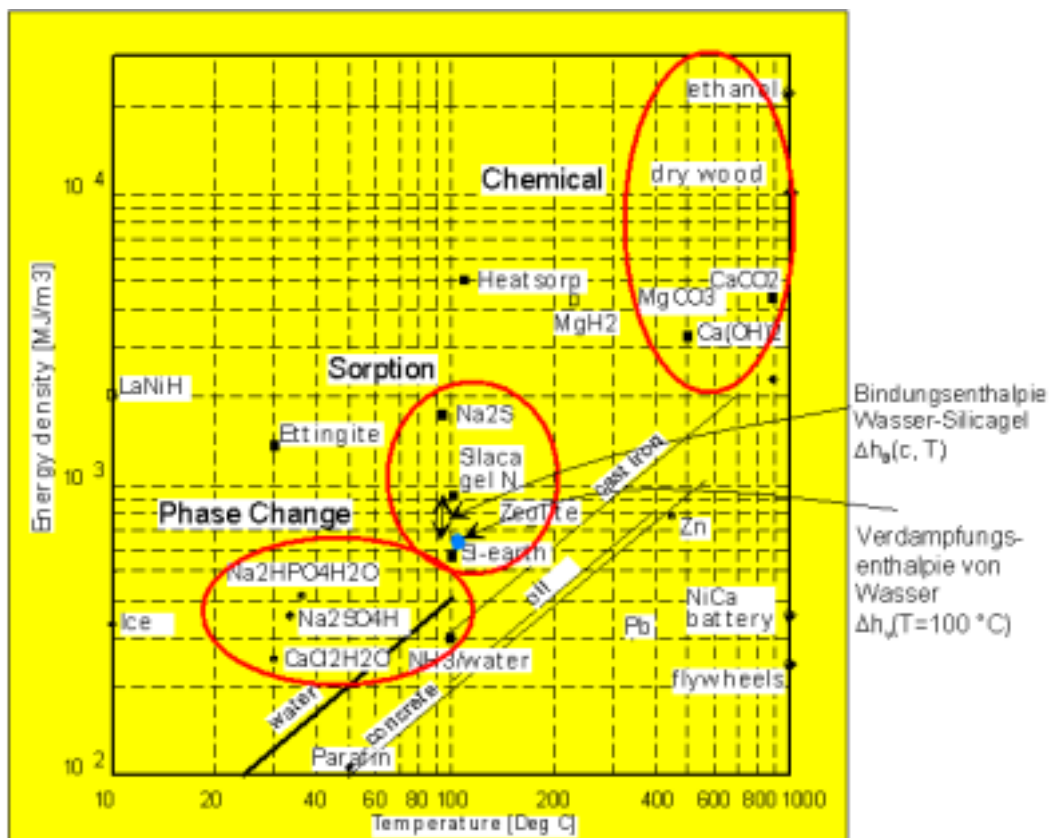


Bild A1: Energiedichten in Abhängigkeit von der Temperatur in den Prozessen Phasenänderung, Sorption (Ab-/Adsorption) und chemische Reaktionen (Grafik: J. van Berkel). Mit in die Grafik eingezeichnet ist der Anteil der Verdampfungsenthalpie $\Delta h_v(c, T)$ und der Bindungsenthalpie $\Delta h_b(c, T)$ am Beispiel Wasser - Silicagel. $1 \text{ MJ/m}^3 = (1/3.6) \text{ kWh/m}^3$.

AUSWAHLKRITERIEN

Liste 1: Kriterien zur Auswahl von Sorptionsmaterialien.

Hohe Sorbat Aufnahme (hohe Selektivität des Sorptionsmaterials für das Sorbat)

Hohe Adsorptionsenthalpie ($\Delta h_A(c, T) = \Delta h_v(c, T) + \Delta h_B(c, T)$, c =Beladung, T =Temperatur)

Regeneration mit thermischer Sonnenenergie.

Tiefe Regenerationstemperatur (Physisorption).

Kurze Regenerationszeit

Länge der Stoffübergangszone (MTZ = Mass Transfer Zone)

Transportform (Granulat, Block, Schichten – Problem für Masse- & Stofftransport).

Einfache Handhabbarkeit.

Tiefer Preis.

Umweltverträglich.

Die aufgeführten Kriterien können teilweise widersprüchlich sein und ein Optimum muss daher bestimmt werden.

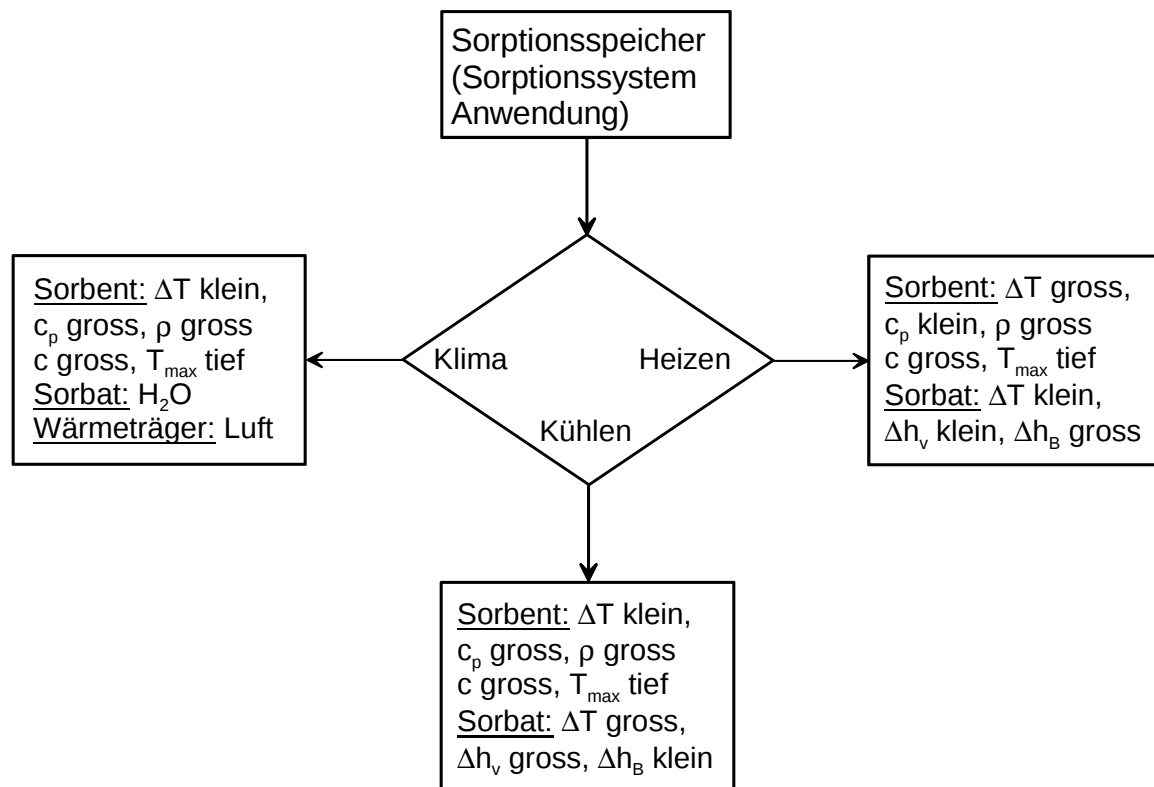


Bild A2: Entscheidungskriterien beim Einsatz eines Sorptionssystems bezüglich den thermodynamischen Grössen von Sorbat (Wasser, Alkohole, usw.) und Sorbent (Silicagel, Aktivkohle, usw.).