

Jahresbericht 2001, 6. Dezember 2001

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	BER 01 E
Dauer des Projekts	1. 4. 2000 - 31. 12. 2001

ZUSAMMENFASSUNG

Eine offene Sorptionsspeicheranlage wurde aufgebaut und Lade- sowie Entladezyklen ausgemessen. Die Temperaturverläufe im Lade- und im Entladezyklus zeigen im Eintrittsbereich der Luft in den Speicher, in den ersten Schichten des Sorptionsmaterials, lateral eine inhomogene Verteilung. Diese Inhomogenität kann durch den Einbau von Leitblechen, zur Verbesserung der Stömungsverteilung der Luft, reduziert werden. Bei beiden Zyklen muss die sensible Wärme in den Speicher gebracht werden. Dies äussert sich in einer Verzögerung von $t_v=12\text{min}$ des Temperaturanstiegs am Austritt.

Im Ladezyklus treten zwei Trocknungsabschnitte auf. Für die Ladetemperaturen von 100°C, 150°C und 200°C sinkt im ersten Abschnitt die Lufttemperatur T auf die Beharrungstemperatur T_K der Zeolithoberfläche von rund 50°C ab, bzw. steigt die Temperatur an der Zeolithoberfläche in den Bereich von T_K an. Über die Energiegleichung ist dieser Temperaturverlauf iterativ bestimmbar. Im zweiten Trocknungsabschnitt steigt die Temperatur des Sorptionsmaterials, bzw. der Luft am Austritt, kontinuierlich in einem e-Funktionsverlauf an. Beim Entladezyklus steigt die Temperatur im Festbett zu Beginn des Zyklus sehr schnell an und fällt nach Erreichen der Sättigung langsamer ab. Die sich ausbildende Stoffübergangs- und Temperaturfront wandert mit einer Geschwindigkeit von 3cm/min bis 4cm/min durch den Sorptionsspeicher.

Für den Fall der Zufuhr von Umgebungsluft mit einer Temperatur von 10°C und einer relativen Feuchte von 90% ergibt eine Abschätzung der Temperaturerhöhung der Luft im Sorptionsspeicher 25°C. Dieser Temperaturlift ist zwar beachtlich, für die Aufbereitung von Warmwasser ist er zu knapp. Daher ist ein Umbau auf ein geschlossenes unter Vakuum arbeitendes System geplant. Die Verdampfung von Wasser kann im geschlossenen System Druck abhängig schon bei Temperaturen ab 10 °C erfolgen.

In einer internationalen Zusammenarbeit können Daten und Erfahrungen ausgetauscht und an gemeinsamen Projekten Probleme gelöst werden.

Projektziele

Durch den Aufbau einer Sorptionsspeicheranlage im Labormassstab sollen Erfahrungen im Betrieb gesammelt und Aussagen zu deren Betriebsbedingungen gemacht werden. Die Bauteile des Systems sind in Vakuumausführung zum Einsatz im offenen sowie im geschlossenen Systemtyp. Das Sorptionsmaterial muss durch eine Literaturrecherche bestimmt werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Aufbau der Anlage: Die Sorptionsspeicheranlage wurde aufgebaut. Sie besteht aus folgenden Teilen; dem Sorptionsspeichermodule zur Aufnahme des Sorptionsmaterials (Zeolith); dem Wärmetauscher zur Entnahme der Wärme aus der Anlage; der Wasservorlage als Speicher für den Adsorptionsstoff (Wasser); dem Ventilator zur Förderung der Luft, welche die Feuchtigkeit und die Wärme in der Anlage transportiert; den Verbindungsrohrleitungen; den Messfühlern für Temperatur, Feuchte und Durchfluss; der Datenerfassung mit einem Logger und PC. In Fig. 1 ist ein Foto der Anlage ohne Wärmedämmung und ohne Verschalung zu sehen.



Als Sorptionsmaterial wurde Zeolith 13X-1001 (ZEOCHEM MOLEKULARSIEB) mit einem Kugeldurchmesser von 2 – 3 mm eingesetzt. Die Adsorption von Wasser ist bei diesem Sorptionsmaterial über einen breiten Feuchtebereich der Luft am grössten.

Fig. 1: Foto der Sorptionsspeicheranlage. Links ist das Sorptionsmodul, rechts der Wärmetauscher und der Ventilator. Unten befindet sich die Wasservorlage. Der Wärmetauscher und das Sorptionsmodul sind über zwei Rohrleitungen verbunden. Bild: SPF.

Ladezyklus: Die Beladung des Zeolith 13X mit Wasser ist eine Funktion der Temperatur und des Partialdruckes von Wasserdampf. Somit wird zur Regeneration des Sorptionsmaterials heiße, trockene Luft durch das Speichermodul geblasen um das adsorbierte Wasser zu verdampfen und ab zu transportieren. In Fig. 2 ist der Temperaturverlauf im Speichermodul in einem Ladezyklus bei 100°C Luft Temperatur T4 dargestellt. Der Verlauf der Austrittstemperatur T13 der Luft zeigt drei Abschnitte. Nach einer Verzögerungszeit t_v von 12 Min, steigt die Temperatur auf T_k , die Beharrungstemperatur an, und dann nähert sie sich langsam der Luft Eintrittstemperatur. Während der Verzögerungszeit wird die sensible Wärme in den Speicher gebracht, d. h. die in den ersten Zonen des Speichers frei werdende Energie heizt die Luft auf und die warme Luft überträgt diese Energie in die nachfolgenden Zonen des Speichers. Die Aufwärmung erfolgt in den einzelnen Zonen bis zur Beharrungstemperatur T_k von 48°C bei welcher der abgedampfte Massenstrom Wasserdampf konstant bleibt. Erst, wenn in allen Zonen die Energiezufuhr mit der heißen Luft die durch den Wasserdampf abgeführte Energie übersteigt, ist ein Anstieg der Austrittstemperatur der Luft wieder möglich, der zweite Trocknungsabschnitt beginnt [1, 2].

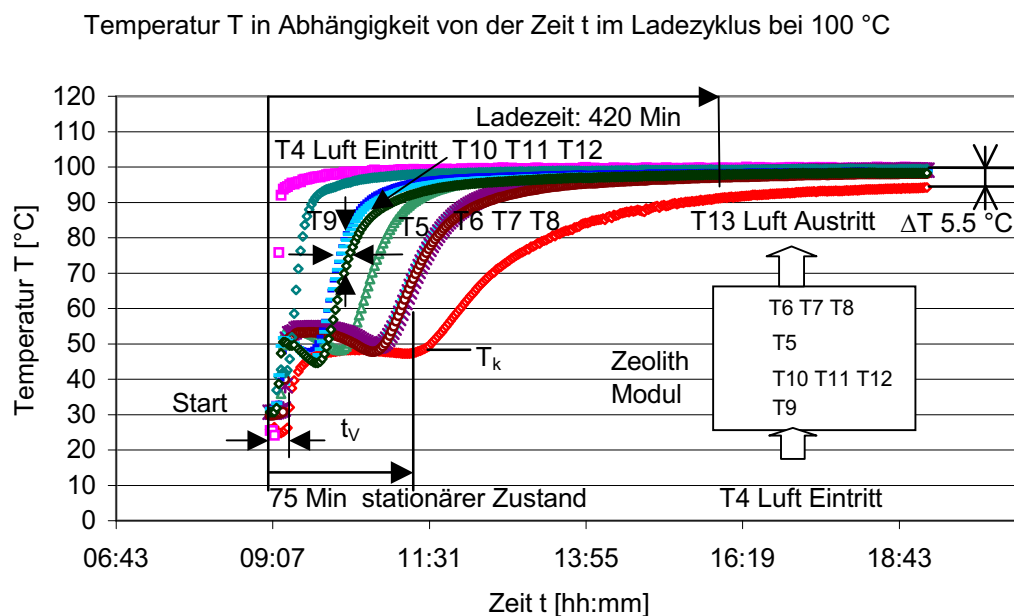


Fig. 2: Ladezyklus im Sorptionsspeicher mit Luft von 100°C. Die Grafik zeigt die Temperatur T im Sorptionsspeicher in Abhängigkeit von der Zeit t an den Positionen z der Temperaturfühler (T9, ..., T6) im Speicher. Mit T4 und T13 wird die Temperatur der Luft am Eintritt bzw. am Austritt bezeichnet. Die Temperatur $T_k = 48^\circ\text{C}$ wird als adiabatische Beharrungstemperatur bezeichnet und ist charakteristisch für den ersten Trocknungsabschnitt. Die Pfeile im Diagramm repräsentieren die Zeiten für den Anstieg der Temperaturen T bei zunehmender Zeit t. Rechts ist eine schematische Darstellung des Speichermoduls mit der Position der Temperaturfühler.

Die Temperaturen im Bereich der Temperaturfühler T10, T11 und T12 sind nicht gleich und zeigen eine zeitliche Verschiebung von $\Delta t = 12$ Min bei der gleichen Temperatur $T = 75^\circ\text{C}$ und einen Temperaturunterschied von $\Delta T = 11.4^\circ\text{C}$ bei der gleichen Zeit. Diese Zeit- und Temperaturspreizungen sind auf eine inhomogene Strömungsverteilung im Speicher zurück zu führen. Durch die homogenisierende Wirkung des Festbettes auf die durchströmende Luft sinkt diese Spreizung der Temperaturen an der Position T6, T7 und T8 stark ab. Die Verläufe der Temperaturen in Ladezyklen mit Temperaturen von 150°C und 200°C sind vergleichbar mit jenen bei 100°C. Auf eine Darstellung in diesem Bericht wird verzichtet.

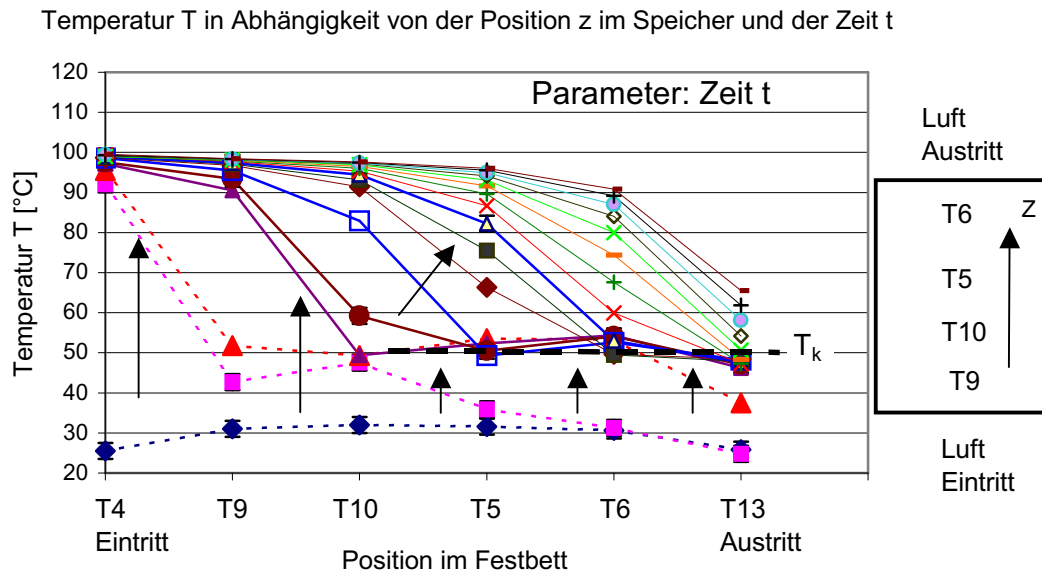


Fig. 3: Ladezyklus im Sorptionsspeicher mit Luft von 100°C. Die Grafik zeigt die Temperatur T im Sorptionsspeicher in Abhängigkeit von der Position z der Temperaturfühler (T9, ..., T6) im Speicher und der Zeit t. Mit T4 und T13 wird die Temperatur der Luft am Eintritt bzw. am Austritt bezeichnet. Die Temperatur $T_k = 50^\circ\text{C}$ liegt bei dieser Auswertung 2°C höher als in Fig. 2 angegeben. Die Pfeile im Diagramm zeigen den Anstieg der Temperatur T bei zunehmender Zeit t an. Rechts ist eine schematische Darstellung des Speichermoduls.

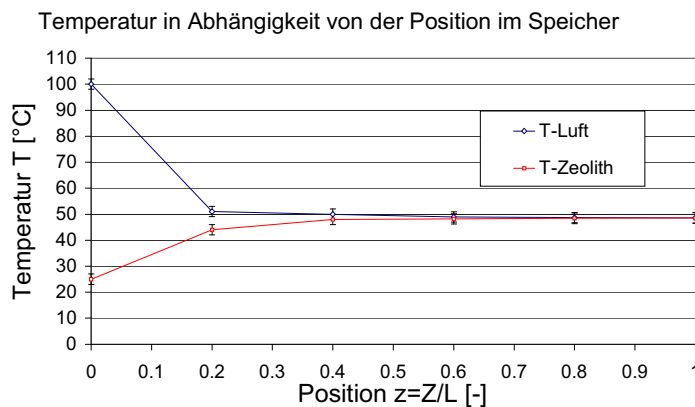


Fig. 4: Temperaturverlauf $T(z)$ im Sorptionsspeicher bestimmt nach iterativer Lösung der Differentialgleichung (1). Die anfänglichen Temperaturverläufe in Fig. 3 werden qualitativ wieder gegeben.

Um eine Idee zu bekommen, wie der Temperaturverlauf an den einzelnen Positionen im Festbett in Abhängigkeit von der Zeit verläuft, ist Fig. 3 sehr hilfreich. Die Messungen sind dort dargestellt. Und in Fig. 4 ist der iterativ bestimmte Temperaturverlauf für die Luft und das Zeolith Festbett aus der Lösung der Differentialgleichung (1) aufgezeichnet.

$$dQ = \alpha (\vartheta_L - \vartheta_o) dO dt = (dm/dt)_L c_p d\vartheta_L dt \quad (1).$$

dQ = differentielle Wärmemenge; Übertragung von der Luft an die Zeolith Partikel

$O = (9.5 \pm 0.2) \text{ m}^2$ geometrische Oberfläche der kugelförmigen Partikel im Festbett

$c_p = 1.01 \text{ kJ/kgK}$ spezifische Wärmekapazität der Luft

t = Zeitvariable

ϑ_L = Temperatur der Luft; mit der Temperatur am Eintritt $\vartheta_{LE} = 100^\circ\text{C}$

ϑ_o = Temperatur der Zeolithoberfläche; Start: $\vartheta_o = 25^\circ\text{C}$

α = Wärmeübergangszahl; mit der Reynoldszahl $Re = 23.3$ in unseren Versuchen ergibt sich eine Nusseltzahl $Nu = 8$ [1, 2] und daraus ein α von $50 - 90 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Mit dieser Gleichung lässt sich aber nur der Anfang der Trocknung bis zur Beharrungstemperatur der Zeolith Partikeloberfläche beschreiben.

Entladezyklus: Um aus dem Sorptionsspeicher Wärme entziehen zu können muss feuchte Luft durch den Speicher geleitet werden. Die Feuchtigkeit wird vom Zeolith adsorbiert. Dabei wird die Adsorptionswärme frei und das Sorptionsmaterial wärmt sich und die durchströmende Luft auf. In Fig. 5 ist der Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit t und dem Ort (T_4 , ..., T_{13}) dargestellt. Nach einer Verzögerung t_v von 12 Min steigt die Temperatur steil von 50°C auf über 80°C an. Danach ist eine langsame Zunahme der Temperatur T_{13} auf 93°C zu beobachten. In dieser Phase wird Energie von der heissen Luft an die Rohrleitungen und die Behälterwände abgegeben.

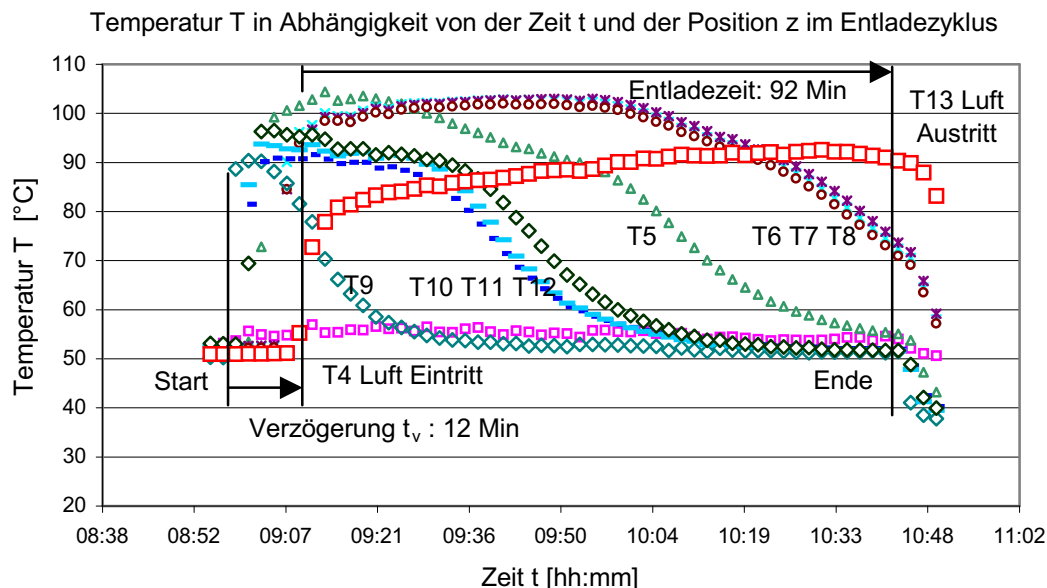


Fig. 5: Entladezyklus im Sorptionsspeicher. Die Grafik zeigt die Temperatur T im Sorptionsspeicher in Abhängigkeit von der Zeit t an den einzelnen Positionen z der Temperaturfühler (T_9 , ..., T_6) im Speicher. Die Temperatur T_{13} der Luft am Austritt steigt erst nach einer Verzögerung von 12 Min an. Diese Zeit wird benötigt um die sensible Wärme in den Speicher zu bringen. Die Position der Temperaturfühler ist wie in Fig. 2 dargestellt.

Bei der Entladung des Speichers wandert eine Sorptions- und Temperaturfront durch das Zeolithfestbett. In unseren Versuchen war die Geschwindigkeit im Bereich von 3cm/Min bis 4cm/Min. Auch in diesem Zyklus ist radial eine inhomogene Temperaturverteilung bei den Fühlern T10, T11 und T12 messbar. Die zeitliche Verschiebung beträgt $\Delta t = 7$ Min bei einem Temperaturniveau von 74.5°C. Bei gleicher Zeit ist ein Temperaturunterschied von $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ messbar. Wie schon zu Fig. 2 beschrieben, gilt hier die gleiche Erklärung für die kleineren Werte bei den Positionen T6, T7 und T8. In weiteren Entladezyklen wurden Luft Austrittstemperaturen von 160°C erreicht. Dabei stiegen die Temperaturen im Festbett auf 210°C an.

Für den Fall der Zufuhr von Umgebungsluft mit einer Temperatur von 10°C und einer relativen Feuchte von 90% ergibt eine Abschätzung der Temperaturerhöhung der Luft im Sorptionsspeicher 25°C. Dieser Temperaturlift ist zwar beachtlich, für die Aufbereitung von Warmwasser ist er zu knapp.

Nationale Zusammenarbeit

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

Internationale Zusammenarbeit

Für den 11. Oktober dieses Jahres organisierten J. Ch. Hadorn aus der Schweiz und J. v. Berkel aus den Niederlanden in Rapperswil eine Tagung mit dem Titel "Workshop on Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Domestic Applications". Am Workshop waren Personen aus acht Ländern beteiligt. In den Vorträgen wurde über den Stand ausländischer Projekte berichtet und unsere Arbeiten am Sorptionsspeicher vorgestellt. Die den Vorträgen anschliessende Diskussion wurde genutzt um heraus zu finden welcher Einsatz für Sorptionsspeicher - Heizen oder/und Kühlen sinnvoller sein könnte und wie eine internationale Zusammenarbeit erfolgreich wäre. Weitere Gespräche zu diesem Thema sollen folgen.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

In der Laborapparatur können Lade- und Entladezyklen bis zu einer Temperatur von 200°C betrieben werden. Der Verlauf der Temperaturprofile im Sorptionsspeicher ist messbar.

Mit dem eingebauten Luftbefeuchter ist der Energieeintrag in die Luft zu gross und es werden zu hohe Vorlauftemperaturen der Eintrittsluft erreicht. Die erzielten Resultate sind nur noch bedingt auf eine "Umweltwärmepumpe" übertragbar.

Die Laborapparatur wird auf ein geschlossenes System umgebaut. Dazu können der Behälter des Sorptionsmoduls und der Wärmetauscher verwendet werden, da diese zum Betrieb unter Vakuum ausgelegt sind. Als zentrales Bauteil muss für das geschlossene System ein spezieller Wärmetauscher gebaut werden, welcher das Sorptionsmaterial aufnimmt und unter Vakuum arbeitet [3]. Für die Auslegung dieses Apparates müssen die Wärmeleitungs- und Strahlungseigenschaften der Materialien im Vakuum berücksichtigt werden. Die Stoffdaten der zum Einsatz geplanten Sorptionsmaterialien werden der Literatur [4] und den Datenblättern des Lieferanten [5] entnommen.

In weiteren Gesprächen mit Instituten in Deutschland, Holland, Schweden und anderen Ländern sollen gemeinsame Ziele in einer Internationalen Zusammenarbeit festgelegt werden.

Referenzen

- [1] **Das Trocknen.** F. Kneule, Grundlagen der chemischen Technik, (1975).

- [2] **Trocknungstechnik.** O. Krischer und W. Kast, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, (1992).
- [3] **VDI-Wärmeatlas.** Recherchieren – Berechnen –Konstruieren, Herausgeber: Verein Deutscher Ingenieure, Springer Verlag Berlin Heidelberg (1997).
- [4] **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.
- [5] **Dynamische Adsorption mit Molekularsieben UETIKON.** Chemische Fabrik Uetikon, CH-8707 Uetikon, D-DY-150988-10.