

# **HIGH ENERGY DENSITY SORPTION HEAT STORAGE FOR SOLAR SPACE HEATING**

(HYDES HEAT STORAGE)

ERGEBNISSE ZU DEN VERSUCHEN MIT DER  
TESTANLAGE IN GLEISDORF



**Auftraggeber**

**EUROPEAN COMMISSION**

**Directorate General DG XII Science, Research and Development**



*Bundesministerium  
für Verkehr,  
Innovation und Technologie*

**Auftragnehmer**

**Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE  
Institut für Nachhaltige Technologien**

**Gleisdorf, im Jänner 2002**

## Kurzfassung

Die Wärmespeicherung, vor allem über lange Zeiträume hinweg, wie dies bei der Nutzung von thermischer Solarenergie zur Raumheizung erforderlich ist, ist ein über weite Strecken noch nicht gelöstes technisches Problem. Auf Grund dessen hat das Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme (Freiburg, BRD) zusammen mit der Firma UFE SOLAR GmbH (Berlin, BRD) bereits 1995 begonnen, erste Voruntersuchungen und Forschungsarbeiten zur saisonalen Wärmespeicherung auf Basis der Feststoffsorption durchzuführen.

Eine kontinuierliche Fortsetzung der Forschung erfolgte durch das von der Europäischen Kommission und vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation, und Technologie finanzierte Projekt "HYDES". Dieses Projekt hatte die Fokussierung der ersten Forschungsergebnisse, die Weiterführung des Materialscreenings bezüglich des Speichermaterials, die Entwicklung der Speicher- und der Hydrauliksysteme, das Erstellen von Simulationswerkzeugen sowie die Installation und Vermessung erster Testanlagen in Deutschland, Finnland und Österreich zum Ziel.

Die Testanlage in Österreich wurde im Versuchsraum der AEE INTEC in Gleisdorf installiert. Die Anlage besteht im wesentlichen aus einer thermischen Solaranlage mit 20 m<sup>2</sup> Kollektorfläche, zwei Sorptionsspeichern und einem Verdampfer-Kondensatbehälter mit je einem Volumen von 1.250 Liter, sowie einem Warmwasserspeicher mit einem Volumen von 300 Liter.

Im Frühling 2001 wurde die Testanlage aufgebaut und in Betrieb genommen. Nach der Erstinbetriebnahme konnte mit den ersten Anlagentests begonnen werden. Aufgabe dieser Testphase war die Bewertung der Anlagenhydraulik, die messtechnische Bestimmung der Wärmetauschercharakteristik sowie erste Sorptionsspeicherbelade- und Sorptionsspeicherentladeversuche. Für diese Testreihen war noch keine automatische Regelung vorhanden. Alle Ventile und Pumpen bei der Anlage wurden manuell via PC gesteuert. Bei den Versuchsreihen wurden alle Energieströme und relevanten Temperaturen, Drücke und Füllstandsänderungen (Verdampfer-Kondensatbehälter) erfasst.

Im Rahmen der Tests wurden beide Speicher je einmal energetisch entladen, d.h. das Silikagel wurde mit Wasserdampf beladen. Bei einer weiteren Versuchsreihe wurde das Silikagel des Sorptionsspeichers 1 und 2 getrocknet.

Bei den Adsorptionsversuchen wurde für den Sorptionsspeicher 1 ein Energieoutput von 115 kWh pro m<sup>3</sup> Silikagel und für den Sorptionsspeicher 2 ein Energieoutput von 122,2 kWh pro m<sup>3</sup> Silikagel bei einer minimalen Vorlauftemperatur aus dem Sorptionsspeicher von 32 °C erreicht. Mit einer optimierten Betriebsweise könnte der theoretische Wert, der bei 140 bis 150 kWh pro m<sup>3</sup> Silikagel liegt, annähernd erreicht werden.

Ein Pufferspeicher - Wasser als Speichermedium - mit 1 m<sup>3</sup> Speichervolumen, hat einen Energieoutput von 67 kWh bei einer maximalen Speichertemperatur von 90 °C und einer minimalen Speichertemperatur von 32 °C ( $\Delta T = 58$  K). Der Minimalwert entsprach auch der minimalen Vorlauftemperatur aus dem Sorptionsspeicher während der Testreihen. Vergleicht man die beiden Ergebnisse - Energieoutput aus einem Pufferspeicher mit 1 m<sup>3</sup> Wasser und

Energieoutput aus dem Sorptionsspeicher mit 1 m<sup>3</sup> Silikagel - so errechnet sich für den Sorptionsspeicher die 1,8-Fache, im optimalen Fall die 2,2-Fache Energiedichte. Daraus ergibt sich, dass der Sorptionsspeicher der Testanlage etwa die Hälfte an Speichervolumen benötigt, um den gleichen Energieoutput zu liefern wie der 1 m<sup>3</sup>-Wasserspeicher.

Bei den Desorptionsversuchen hat sich gezeigt, dass bei sinkender Beladung des Silikagels, kleiner 10 Gew% Wasser pro Kilogramm Silikagel Trockensubstanz eine mittlere Temperatur im Sorptionsspeicher von 80 bis 90 °C notwendig ist. Dazu muss einerseits die Solaranlage über längere Zeit Temperaturen von 95 °C bis 105 °C liefern und andererseits muss die Niedertemperatursenke für die Kondensation eine Rücklauftemperatur von unter 20°C aufweisen.

Mit den ersten Tests konnte gezeigt werden, dass die Testanlage im allgemeinen und die thermochemische Wärmespeicherung auf der Basis der Adsorption von Wasserdampf in den Poren von Silikagel im speziellen ein technisch durchführbarer Lösungsansatz für die saisonale Speicherung ist.

## **Inhalt**

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Die Testanlage.....</b>	<b>7</b>
2.1	<b>Daten zur Wohnung der Niedrigenergiehaussiedlung SUNDAYS.....</b>	<b>7</b>
2.2	<b>Das Konzept der Testanlage .....</b>	<b>8</b>
2.3	<b>Die Komponenten der Testanlage.....</b>	<b>9</b>
2.3.1	Sorptionsspeicher, VD/KO-Behälter .....	9
2.3.2	Auswahl des Silikagels für die Testanlage.....	9
2.4	<b>Anlagenhydraulik.....</b>	<b>11</b>
2.4.1	Die Gesamtanlage.....	11
2.4.2	Wärmequellen .....	13
2.4.2.1	Thermische Solarkollektoren .....	13
2.4.2.2	Elektrischer Durchlauferhitzer .....	13
2.4.3	Wärmesenken .....	13
<b>3</b>	<b>Anlagentests .....</b>	<b>14</b>
3.1	<b>Anlagenhydraulik.....</b>	<b>14</b>
3.2	<b>Adsorptionsversuche .....</b>	<b>14</b>
3.2.1	Adsorptionsversuche Sorptionsspeicher 2.....	15
3.2.2	Detailauswertung eines Adsorptionsversuchs mit dem Sorptionsspeicher 2 .....	17
3.2.2.1	Betriebsbedingungen für die manuelle Steuerung.....	17
3.2.2.2	Versuchsbeschreibung.....	17
3.2.2.3	Auswertung des Versuches .....	19
3.3	<b>Zusammenfassung der Betriebserfahrungen.....</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>24</b>

## 1 Einleitung

Energie steht, mit schwankender Intensität, seit der ersten „Ölkrise“ im Jahr 1973 im gesellschaftlichen Interesse. Durch die „Ölschocks“ wurde uns die Abhängigkeit unserer Wirtschaft und unserer Lebensform von einer ausreichenden Energieversorgung deutlich gemacht und gleichzeitig wurde auch in der breiten Öffentlichkeit die prinzipielle Begrenztheit der fossilen Ressourcen bewusst.

In der frühen Phase dieser öffentlichen Auseinandersetzung mit Energiefragen standen vor allem Fragen der Versorgungssicherheit und damit auch der Energiesparpotenziale im Mittelpunkt. Geprägt war die Diskussion der 70er und Anfang der 80er Jahre zusätzlich durch die besonderen Risiken der Kernenergienutzung. Negative Umweltauswirkungen durch die Nutzung fossiler und nuklearer Energieträger und Fragen der Lebensbedingungen zukünftiger Generationen verliehen der Diskussion in den 80er Jahren eine neue Dimension.

Die Treibhausproblematik und der Kernkraftwerksunfall von Tschernobyl unterstrichen die Notwendigkeit einer globalen Perspektive und einer nachhaltigen, die Lebenschancen künftiger Generationen wahren Entwicklung. Daher hat sich Österreich verpflichtet, seinen CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis zum Jahr 2005 um 20% zu reduzieren und diese Absicht im Energiebericht der Bundesregierung festgeschrieben. Zahlreiche österreichische Städte und einige Bundesländer sind zudem dem „Klimabündnis“ beigetreten. Die Mitglieder haben sich zu sehr weitreichenden Maßnahmen zum Schutz des Klimas verpflichtet.

Nimmt man die Ziele ernst, so ist eine erhebliche Änderung der vorhandenen Energieversorgungsstrukturen erforderlich. Die Energiewende muss auf Energiesparen, rationeller, umweltverträglicher Energienutzung und einer dezentralen Energiebereitstellung durch verstärkte Nutzung regenerativer Energieträger basieren.

Österreich liegt bei der Nutzung der thermischen Solarenergie im Spitzenfeld der Mitgliedsstaaten der Europäischen Union. In Europa wurden bis 2000 fast 11 Millionen Quadratmeter Kollektorflächen installiert, davon alleine in Österreich 2,2 Millionen Quadratmeter.

Bis 1995 konzentrierte sich die breite Anwendung von solarthermischen Anlagen primär auf den Bereich der Warmwasserbereitung für Einfamilienhäuser. Aber seit der Umsetzung der ersten Anlagen zur teilsolaren Raumheizung ab 1995 gewinnt diese Anwendungsform immer mehr an Bedeutung.

Der Anteil der Raumwärme liegt in Österreich bei 351 PJ (E.V.A., 1997). Derzeit erfolgt die Bereitstellung der Raumwärme zum überwiegenden Teil durch fossile Energieträger (Öl, Gas und Kohle in Summe 190 PJ). 95 PJ (27,1%) werden von Biomasse bereitgestellt. Wenn die Sonnenenergie in der Energieversorgung unseres Landes eine bedeutendere Rolle einnehmen soll, dann ist es unerlässlich, dass diese Energieform auch verstärkt für die Beheizung von Gebäuden genutzt wird. Fakt ist aber auch, dass bereits in den letzten Jahren etwa 50% der jährlich installierten Kollektorfläche für die teilsolare Raumheizung genutzt wird. D.h. die

solare Technologie für die Raumheizung wird breit umgesetzt, der Beitrag zur Deckung des Gesamtenergieverbrauchs für die Raumwärme ist aber noch sehr klein.

Ein zentrales Problem für die Breite Umsetzung solarer Technologien für die Raumwärmebereitung ist die Wärmespeicherung, vor allem über lange Zeiträume hinweg. Auf Grund dessen hat das Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme (Freiburg, BRD) zusammen mit der Firma UFE SOLAR GmbH (Berlin, BRD) bereits 1995 begonnen, erste Voruntersuchungen und Forschungsarbeiten zur saisonalen Wärmespeicherung auf Basis der Feststoffsorption durchzuführen.

Eine kontinuierliche Fortsetzung der Forschung in diesem Bereich erfolgt durch das von der „Europäischen Kommission“ und durch das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie geförderte Projekt „HYDES“. Dieses Projekt hatte die Fokussierung der ersten Forschungsergebnisse, die Weiterführung des Materialscreenings bezüglich des Speichermaterials, die Entwicklung der Speicher und der Hydrauliksysteme, das Erstellen von Simulationswerkzeugen sowie die Installation und Vermessung erster Testanlagen in Deutschland, Finnland und Österreich zum Ziel.

## 2 Die Testanlage

Die Testanlage wurde im Versuchsraum der AEE INTEC installiert und sollte nach ersten Testreihen eine Wohnung (88 m<sup>2</sup> beheizte Wohnnutzfläche) der Niedrigenergiehaussiedlung SUNDAYS mit Wärme für die Raumheizung und Warmwasserbereitung versorgen.

Die Testanlage besteht grundsätzlich aus zwei Sorptionsspeichern und einem Verdampfer-Kondensationsbehälter (im weiteren Bericht als VD/KO-Behälter bezeichnet) sowie mehreren Wärmequellen und Wärmesenken, die beliebig miteinander kombinierbar sind. Bei der Anlage wurde im speziellen die Einsatzmöglichkeit der Sorptionsspeicher für die solare Raumheizung untersucht.

### 2.1 Daten zur Wohnung der Niedrigenergiehaussiedlung SUNDAYS

Die in Gleisdorf errichtete Niedrigenergie-Reihenhaussiedlung (siehe Abbildung 1) besteht aus sechs Reihenhäusern und einem Bürogebäude. Es war geplant, mit der Testanlage eine Wohnung der Siedlung mit Energie für die Raumwärme zu versorgen. Die Wohnung hat eine beheizte Nutzfläche von 88 m<sup>2</sup>. Generell haben alle Gebäude einen sehr hohen Wärmedämmstandard (U-Wert Außenwand: 0,17 W/(m<sup>2</sup>K) bzw. Dach 0,11 W/(m<sup>2</sup>K) und sind für die passive Sonnenenergienutzung optimiert. Durch die zusätzliche thermische Zonierung der Wohn- und Nutzbereiche sowie der kontrollierten Be- und Entlüftung über einen Erdreichwärmetauscher wird ein Heizenergiebedarf von 28,7 kWh/m<sup>2</sup> und Jahr erreicht.

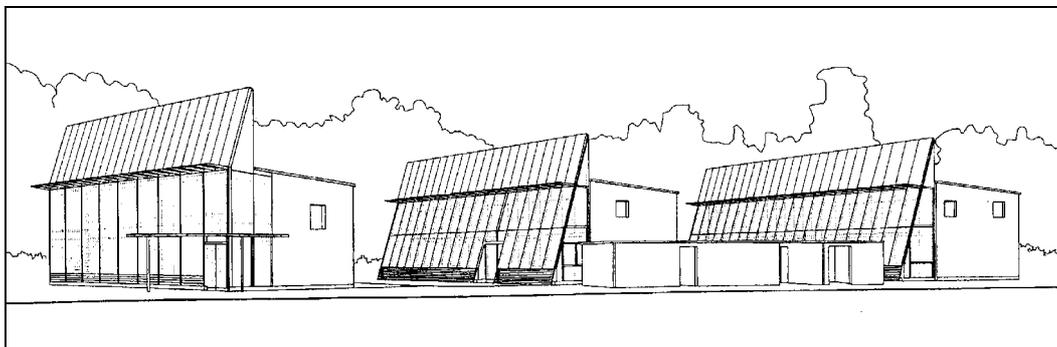


Abbildung 1: Bürogebäude (links) und Reihenhäuser in Gleisdorf

Die Wärmeversorgung der gesamten Siedlung erfolgt zu rund 60% durch die thermische Solaranlage, der Restenergiebedarf wird mittels Biomassepelletskessel abgedeckt.

Die Kollektorfelder, mit einer Gesamtfläche von 213 m<sup>2</sup> wurden in das Dach der Wintergärten integriert.

Für die Testanlage wurden von der Gesamtkollektoranlage 20 m<sup>2</sup> abgekoppelt. Der Energietransport erfolgt über ein eigenes Mikrowärmenetz, das die Kollektoranlage sowie die Wärmeübergabestation der Wohnung mit der Testanlage im Versuchsraum (im Bürogebäude) verbindet. Als Wärmeabgabesystem in der Wohnung ist in Küche, Bad, WC sowie im Vorraum eine Fußbodenheizung und in den Wohnräumen eine Wandflächenheizung installiert.

## 2.2 Das Konzept der Testanlage

Grundsätzlich besteht die Anlage aus zwei Sorptionsspeichern mit einem Volumen von je 1.250 Liter sowie einem VD/KO-Behälter mit einem Volumen von 1.250 Liter. Die Hydraulikkreise sind über zwei Verteilerschienen an einer Wand mittels Schienensystem aufgebaut. Die hydraulische Anlage besteht aus zwei Wärmequellen (Solaranlage und Durchlauferhitzer) sowie drei Wärmesenken (Wärmeabgabesystem in der Wohnung, Warmwasserboiler bei der Testanlage und eine Regenwasserzisterne). Vereinfacht kann der Anlagenbetrieb in den folgenden zwei Betriebsmodi (siehe Abbildung 2) dargestellt werden.

- Desorption: - Speicherladung (Trocknung des Silikagels)
- Adsorption: - Speicherentladung (Befeuchtung des Silikagels)

Abbildung 2 zeigt schematisch die vier Bausteine sowie deren Wärmeflüsse in den verschiedenen Betriebsmodi. Die hydraulische Schaltung der Testanlage wird in Kapitel 2.4 detailliert beschrieben.

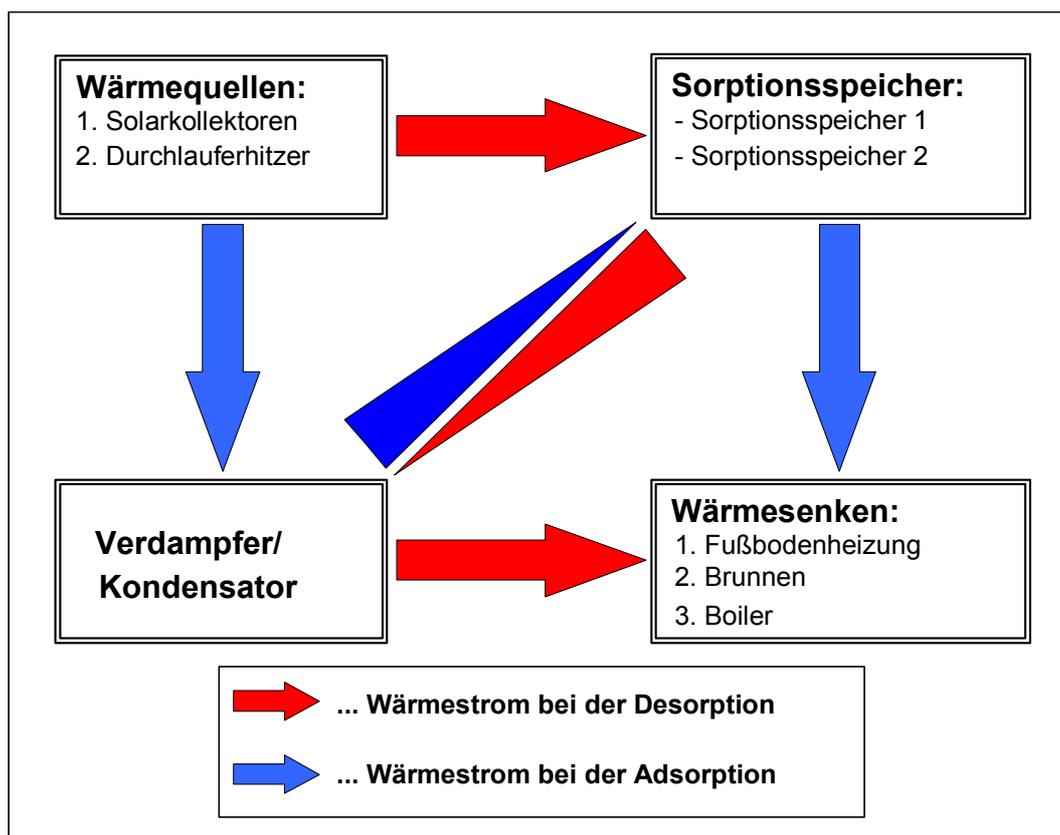


Abbildung 2 Schematische Darstellung der hydraulischen Verschaltung

## 2.3 Die Komponenten der Testanlage

### 2.3.1 Sorptionsspeicher, VD/KO-Behälter

Austria Email, als Projektpartner im EU-Projekt, hat die Sorptionsspeicher und den VD/KO-Behälter konstruiert und gebaut.

Da die Behälter auf 1 bis 3 mbar Absolutdruck evakuiert wurden, war es erforderlich, einen Helium-Lecktest durchzuführen, um die Dichtheit der Behälter zu prüfen. Die Behälterdichtheit lag zwischen  $1 \times 10^{-6}$  und  $1 \times 10^{-9}$  mbar pro Liter und Jahr.

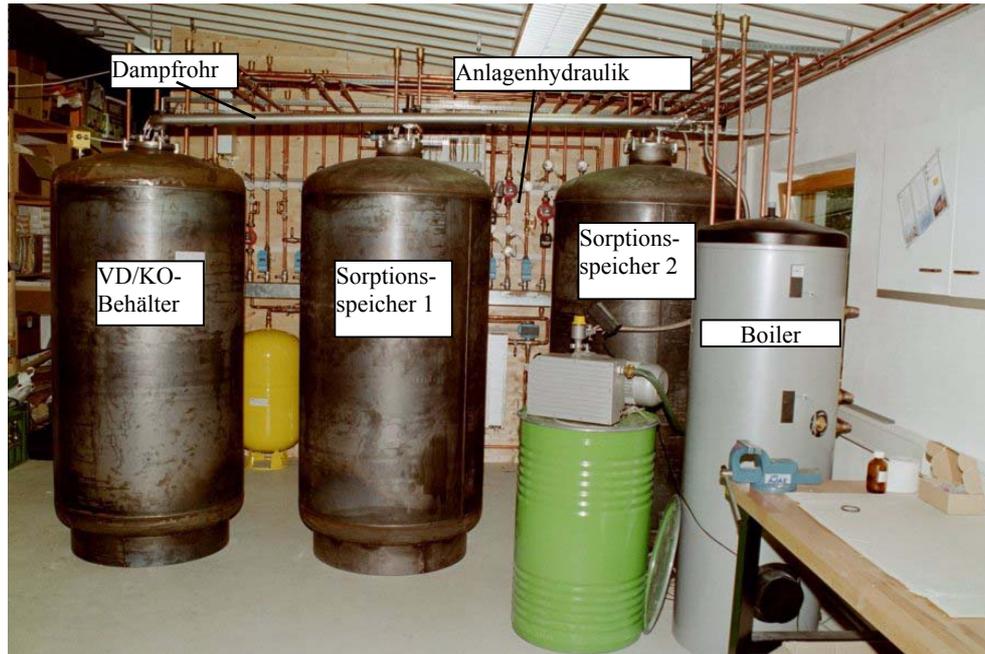
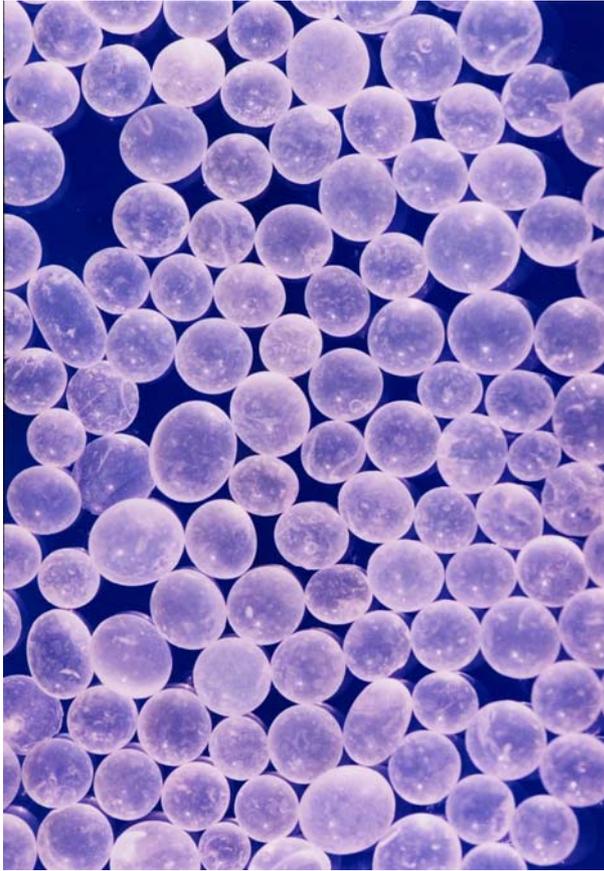


Abbildung 3: Sorptionsspeicheranlage (ohne Speicher- und Rohrdämmung) der AEE INTEC in Gleisdorf

### 2.3.2 Auswahl des Silikagels für die Testanlage

Im Rahmen der Basisarbeiten für das vorliegende Projekt wurde als Adsorbens Silikagel und als Adsorptiv Wasser bzw. Wasserdampf für das Verfahren der thermochemischen Wärmespeicherung gewählt. Bei Silikagel handelt es sich um einen Vertreter aus der Gruppe der technischen Adsorbentien, zu der auch Zeolithe und Aktivkohle gezählt werden. Diese Adsorbentien werden großtechnisch hergestellt.

Silikagel ist eine stark poröse glasartige Substanz, das Material besteht hauptsächlich aus  $\text{SiO}_2$  und wird in einem speziellen Verfahren aus wässriger Kieselsäure gewonnen. Aufgrund des Herstellungsprozesses besitzt es eine hohe innere Oberfläche ( $300 - 800 \text{ m}^2/\text{g}$ ).



Das für die Testanlage verwendete Silikagel besteht aus kugelförmigen Partikeln von 2 - 3 mm Durchmesser und hat eine Schüttdichte von  $740 \text{ kg/m}^3$  sowie eine innere Oberfläche von  $650 \text{ m}^2/\text{g}$ . Das Material wurde nach umfangreichen Materialuntersuchungen im thermodynamischen Labor des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme für den Einsatz in der Testanlage ausgewählt.

Als Adsorptiv wird im Speichersystem Wasser verwendet. Die Verdampfung und Kondensation des Wassers ist die verwendete Niedertemperaturreaktion. Die bei der Adsorption frei werdende Adsorptionswärme setzt sich aus der Bindungsenthalpie und der Verdampfungsenthalpie zusammen.

Abbildung 4: Makroaufnahme des Silikagels  
SYLOBEAD® B 127

Je höher die Beladung des Adsorbens, desto geringer wird die Bindungsenergie und damit die Reaktionswärme, da die Bindungskräfte nur eine geringe Reichweite besitzen.

Wasser eignet sich vor allem aufgrund seiner hohen spezifischen Verdampfungsenthalpie und seiner Polarität für die Verwendung in einem Sorptionssystem. Verglichen mit anderen Adsorptiven wie Ammoniak oder Methanol lassen sich mit Wasser die höchsten Energiedichten erzielen.

Neben der hohen Verdampfungsenthalpie bietet Wasser folgende Vorteile:

- es ist chemisch stabil
- es ist ökologisch und physiologisch unbedenklich
- es ist unbegrenzt verfügbar

## 2.4 Anlagenhydraulik

### 2.4.1 Die Gesamtanlage

Das Hydraulikkonzept der Testanlage (siehe Abbildung 5) besteht aus den Wärmequellen: „thermische Solaranlage“ und „elektrischer Durchlauferhitzer“ sowie aus den Wärmesenken: Niedertemperaturheizung, Brauchwasserspeicher und Regenwasserzisterne. Alle hydraulischen Stränge sind an den beiden Verteilerschienen (Verteilerschiene 1 und 2 ) installiert. Die evakuierten Sorptionsspeicher (Sorptionsspeicher 1 und Sorptionsspeicher 2) sowie VD/KO-Behälter sind mit einer Dampfrohrleitung verbunden.

Der Solarprimärkreis entspricht von der hydraulischen Verschaltung einer konventionellen thermischen Solaranlage, die nach dem „matched flow“-Prinzip betrieben wird. Im Solarprimärkreis wird als Wärmeträger ein Wasser- Frostschutzgemisch eingesetzt. Die Solarsekundärseite besteht bei der Testanlage aus zwei Kreisen, wobei der Solarsekundärkreis 1, die Verteilerschiene 1 und der Solarsekundärkreis 2 die Verteilerschiene 2 versorgt. Die Systemtrennung zwischen dem Solarprimärkreis und den Solarsekundärkreisen erfolgt mit den Plattenwärmetauschern WT1 und WT2. An der Verteilerschiene 1 sind alle hydraulischen Kreise für den Heizbetrieb – Solarsekundärkreis 1, Niedertemperaturheizung, Nachheizung (bei der Testanlage ein einfacher elektrischer Durchlauferhitzer), beide Sorptionsspeicher - sowie die Boilerladung für das Bereitschaftsvolumen des Trinkwasserspeichers angeschlossen. Die beiden Sorptionsspeicher sind so an die Verteilerschiene 1 angeschlossen, dass diese entweder parallel oder seriell Energie von der Verteilerschiene 1 beziehen bzw. liefern können.

An der Verteilerschiene 2 sind der Solarsekundärkreis 2, die solare Boilerladung des Trinkwasserspeichers, der Verdampfer und der Kondensationskreis des VD/KO-Behälters sowie die Regenwasserzisterne als Niedertemperaturwärmesenke angeschlossen. Der Verdampferwärmetauscher kann sowohl über den Solarsekundärkreis 2 als auch über den Durchlauferhitzer mit Wärme versorgt werden. Die Querverbindung von der Wärmesenke Heizung zum Kondensationswärmetauscher wurde installiert, um das Heizen mit der Kondensationswärme zu testen.

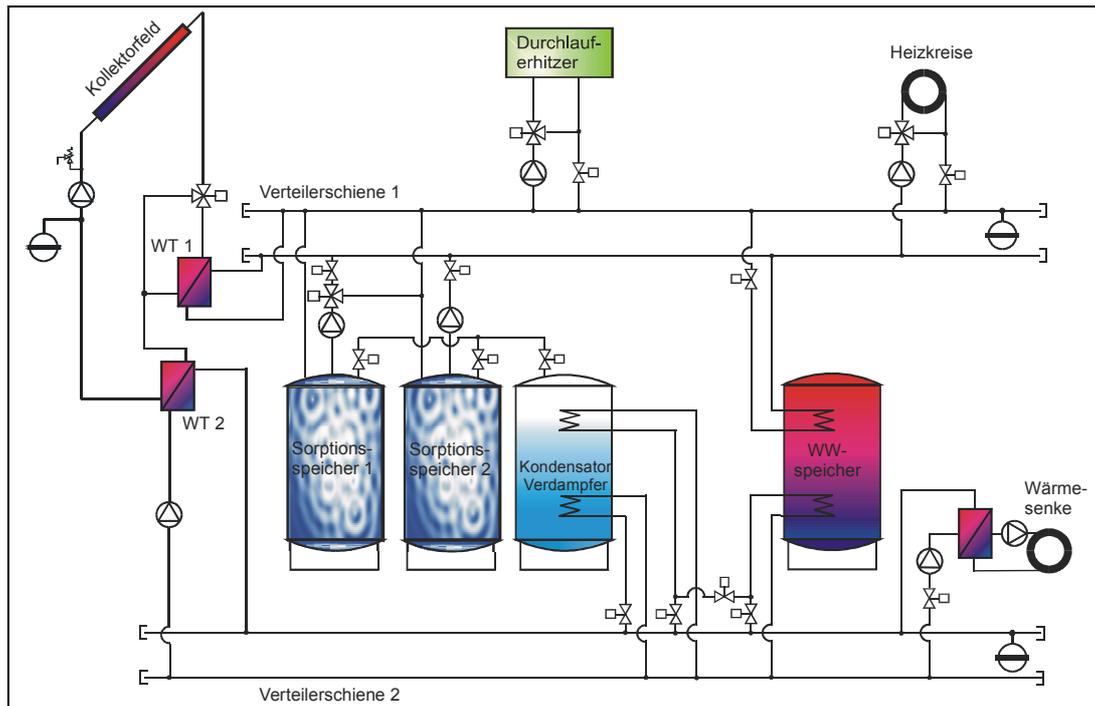


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Sorptionsspeicheranlage bei der AEE INTEC in Gleisdorf

Die hydraulische Schaltung bietet auch die Möglichkeit, die Sorptionsspeicher mit dem Durchlauferhitzer aufzuheizen und das Silikagel zu trocknen.

Das Zusammenspiel der Quellen und Senken an den beiden Verteilerschienen kann am einfachsten durch die Beschreibung einer Adsorption und einer Desorption erläutert werden.

### ***Desorption (Trocknen des Silikagels)***

Für die einfache Beschreibung wird nur der Sorptionsspeicher 1 herangezogen. Hat das Silikagel im Sorptionsspeicher 1 seine maximale Beladung erreicht, - d.h. eine weitere Adsorption von Wasserdampf ist nicht mehr sinnvoll - und kann aus der Solaranlage Energie bereit gestellt werden, dann wird diese über den Solarsekundärkreis 1, der Verteilerschiene 1 in den Sorptionsspeicher eingebracht. Der Speicher wird sensibel beladen. Ist die mittlere Temperatur im Sorptionsspeicher ausreichend hoch, dann erfolgt die Desorption. Der desorbierte Dampf wird über das Dampfrohr zum VD/KO-Behälter geführt. Bei der Testanlage besteht die Möglichkeit, die Kondensation kontinuierlich und diskontinuierlich durchzuführen. Bei der kontinuierlichen Kondensation wird gleichzeitig der Sorptionsspeicher mit Wärme für die Desorption versorgt und der Dampf kondensiert. Dabei wird die Kondensationswärme über die Verteilerschiene 2 in die Regenwasserzisterne abgeführt. Bei der diskontinuierlichen Kondensation wird am Tag mit der Solaranlage der Sorptionsspeicher 1 sensibel beladen und die Kondensationswärme in der Nacht über die Solaranlage abgeführt.

### ***Adsorption (Beladen des Silikagels)***

Ist das Speichermedium (Silikagel) vollständig getrocknet und wird Heizenergie benötigt, dann wird dem Sorptionsspeicher Dampf aus dem VD/KO-Behälter über das Dampfrohr zugeführt. Die dafür benötigte Verdampfungsenergie wird, wenn möglich, über die Solaranlage - Solarsekundärkreis 2 und Verteilerschiene 2 - dem Verdampfer zugeführt. Ist die Energiezufuhr aus der Solaranlage nicht möglich, erfolgt diese mit dem elektrischen Durchlauferhitzer. Durch den Adsorptionsprozess wird Kondensationswärme und Bindungswärme im Sorptionsspeicher frei. Diese wird über die Verteilerschiene 1 in das Niedertemperatur-Heizsystem geführt.

## **2.4.2 Wärmequellen**

### **2.4.2.1 Thermische Solarkollektoren**

Für die Testanlage steht als primäre Wärmequelle eine thermische Solaranlage mit einer Aperturfläche von 20,4 m<sup>2</sup> zur Verfügung. Die Solaranlage hat eine Südabweichung von 10° in Richtung Westen. Die Kollektoren haben eine Neigung von 72° und sind mit dieser Neigung für die Nutzung im Herbst und Winter (solare Raumheizung) optimiert. Mit der thermischen Solaranlage wird das Silikagel im Sorptionsspeicher getrocknet (Desorption) und für den Heizbetrieb die Kondensatvorlage im VD/KO-Behälter verdampft. Wie schon beschrieben, ist die Solaranlage am Wintergartendach der Wohnung montiert. Der Wärmetransport erfolgt über ein Mikrowärmenetz.

*Tabelle 1: Kenndaten Solaranlage*

Fabrikat:	Sonnenkraft IMK
Aperturfläche:	20,4 m <sup>2</sup>
Kollektorneigung:	72°
Azimut:	10°

### **2.4.2.2 Elektrischer Durchlauferhitzer**

Als Zusatzenergiequelle für die Testanlage wurde ein elektrischer Durchlauferhitzer montiert. Der Durchlauferhitzer wird einerseits zum Verdampfen des Kondensats verwendet andererseits zum Trocknen des Silikagels, wenn das Strahlungsangebot der Sonne nicht ausreicht war.

### **2.4.3 Wärmesenken**

Für den Betrieb einer Sorptionsspeicheranlage wird neben der Wärmesenke „Niedertemperaturheizung“ während der Adsorption, bei der Desorption des Wasserdampfes eine weitere Wärmesenke benötigt. Der aus dem Silikagel desorbierte Dampf muss für die Bevorratung wieder kondensiert werden. Auf Grund dessen wird bei der Desorption eine Niedertemperaturwärmesenke benötigt. Die Hydraulik der Anlage ist so ausgeführt, dass für die Kondensation zwei Wärmesenken – die Regenwasserzisterne und die thermische Solaranlage - zur Verfügung stehen.

### 3 Anlagentests

Nach der Erstinbetriebnahme konnte mit den ersten Anlagentests begonnen werden. Die im folgenden Abschnitt beschriebenen Tests wurden erstmals mit einer Anlage dieser Größenordnung durchgeführt. (2 Sorptionsspeicher mit je 1.250 Liter und ein VD/KO-Behälter mit 1.250 Liter). Für die ersten Testreihen war noch keine automatische Regelung vorhanden. Alle Ventile und Pumpen wurden manuell via PC gesteuert.

#### Ziele der ersten Tests:

- Bewertung der Anlagenhydraulik
- Stoff- und Energiebilanzen für Adsorptions- und Desorptionsversuche

#### 3.1 Anlagenhydraulik

Da die Anlagenhydraulik wesentlich komplexer als bei üblichen Heizungssystemen ist, wurde diese bei den ersten Tests genauer beobachtet. Die Anlagenhydraulik, wie bereits beschrieben, funktionierte zusammen mit dem Sorptionsspeichersystem ohne Probleme. So haben sich die konventionellen Heizungsverteiler für den Aufbau als sinnvoll erwiesen. Für die ersten Versuche war auch das gesamte Rohrnetz noch nicht isoliert, um so gegebenenfalls Umbauten einfacher durchführen zu können. Da sich das Hydrauliksystem bei den ersten Tests als problemlos herausgestellt hat und somit keine weiteren Umbauten notwendig waren, wurde dieses nach den ersten Testreihen gedämmt.

#### 3.2 Adsorptionsversuche

Die ersten Tests sollten in erster Linie Erfahrungen über das Verhalten der Sorptionsspeicher beim Be- und Entladen bringen.

Auf Grund des Fertigungsverfahrens des Silikagels ist dieses bei der Werksauslieferung sehr trocken - geringe Menge an Prozesswasser in den Silikagelporen. D.h. das Silikagel für die Sorptionsspeicher wurde energetisch geladen angeliefert und musste für die ersten Adsorptionsversuche – Energieentnahme aus dem Sorptionsspeicher – nicht weiter getrocknet werden. Messungen haben gezeigt, dass das Silikagel im Sorptionsspeicher 1 eine Beladung von ca. 1,8 % Wasser pro Kilogramm Silikagel Trockensubstanz und das Silikagel im Sorptionsspeicher 2 eine Beladung von ca. 2% Wasser pro Kilogramm Silikagel Trockensubstanz hatte.

Als erster Anlagentest wurden die Adsorptionsversuche durchgeführt. Die Silikagelschüttung jedes Sorptionsspeichers wurde von seiner Anfangsbeladung in mehreren Versuchen durch bedampfen auf eine Beladung von rund 30 Gew% Wasser pro Kilogramm Silikagel Trockensubstanz beladen. Bei der Beladung des Silikagels mit Wasserdampf wird einerseits die Kondensationswärme und andererseits die Bindungswärme (Van-der-Waalsche Bindung) frei. D.h. der Sorptionsspeicher wird mit Wasserdampf beladen und dadurch energetisch entladen. Die dabei frei werdende Wärme wird über den Wärmetauscher im Sorptionsspeicher auf die externe Wärmesenke - in der Regel eine Niedertemperaturheizung - übertragen. Bei den ersten Anlagentests wurde als Wärmesenke der 300 Liter Boiler, der mit Wasser aus der Regenwasserzisterne gespült wurde, verwendet. Die Anlagentests wurden so durchgeführt,

dass zuerst die Versuche mit dem Sorptionsspeicher 1 und im Anschluss die Versuche mit dem Sorptionsspeicher 2 erfolgten.

Diese Adsorptionsversuche dauerten zwischen 5,75 und 23,5 Stunden. Die für die Verdampfung des Wassers im VD/KO-Behälter benötigte Verdampfungsenergie wurde durch die thermische Solaranlage und wenn keine Strahlungsenergie zur Verfügung stand durch den elektrischen Durchlauferhitzer bereitgestellt. Nach jedem Versuch wurde die Anlage abgeschaltet und es folgte eine Relaxationszeit von 0 bis 264 Stunden.

### 3.2.1 Adsorptionsversuche Sorptionsspeicher 2

*Tabelle 2: Adsorptionsversuche Sorptionsspeicher 2:*

Wärmequelle:	Solaranlage / elektrischer Durchlauferhitzer
Wärmesenke:	Boiler (Spülung des Boilers mit Wasser der Regenwasserzisterne)
Regelung:	<p>Manuelles Steuern mit Zielgrößen:  Sollwert mittlere Temperatur in der Silikagelschüttung: zwischen 45 und 50°C  Sollwert Vorlauftemperatur aus dem Sorptionsspeicher 2 &gt; 32°C  Dampfdruck im Sorptionsspeicher &lt; Dampfdruck im VD/KO-Behälter  Maximalwert der Verdampfungstemperatur (Fluidtempertur) im VD/KO-Behälter 35°C. Wird eine höhere Verdampfungstemperatur für die Adsorption benötigt, wird die Versuchsreihe abgebrochen. Diese Verdampfungstemperatur entspricht einer Vorlauftemperatur (Verdampferwärmetauscher) von 38 bis 40°C. Auf Grund der Temperaturspreizung – mittlere Temperatur in der Silikagelschüttung zu Vorlauftemperatur Sorptionsspeicher – erreicht die Sorptionsspeichervorlauftemperatur ebenfalls Werte von 38 bis 40°C. D.h. der praktische Temperaturhub geht gegen Null und das Silikagel ist energetisch entladen.</p>
Messdatenaufzeichnung:	<p>15 min bzw. 5 min Intervalle  Die Temperaturen und der Druck im Dampfrohr wurden als Mittelwerte gespeichert. Bei den Wärmemengenzählern und Betriebsstundenzählern wurden die Anzahl der Impulse</p>

	gespeichert.
Anzahl der Versuche:	acht
Versuchszeit:	5,75 bis 11,25 Stunden
Relaxationszeit:	12 bis 264 Stunden

Die energetische Entladung des Sorptionsspeichers 2 kann in zwei Versuchsreihen gegliedert werden:

Versuchsreihe 1: Erste Adsorptionsversuche mit manuellem Steuern ohne Zielgrößen. Für diese beiden ersten Adsorptionsversuche sind nur die zu- und abgeführten Energien und die Beladung am Ende dieser Versuche bekannt.

Versuchsreihe 2: Erste Adsorptionsversuche mit manuellem Steuern und Zielgrößen wie in Tabelle 2 definiert.

Während der Versuchsreihe 1 wurde dem Sorptionsspeicher 2 13,89 kWh mittels Durchlauferhitzer zugeführt. Aus dem letzten Versuch war im Sorptionsspeicher eine sensible Wärme von 8,27 kWh vorhanden. In die Wärmesenke Regenwasserzisterne wurden 16,63 kWh abgegeben. Die sensiblen Verluste betragen 4,9 kWh. Die Beladung des Silikagels wurde von 2,2 Gew% auf 4,67 Gew% Wasser pro Kilogramm Silikagel Trockensubstanz erhöht.

Bei der zweiten Versuchsreihe wurden dem Sorptionsspeicher 2 109,3 kWh (Verdampfungsenergie) zugeführt und 109 kWh vom Sorptionsspeicher entnommen. Die sensiblen Verluste des Sorptionsspeichers betragen für die Testreihe 6 kWh. Zu beachten ist, dass die untere Grenztemperatur (Vorlauftemperatur) für die Energieentnahme aus dem Sorptionsspeicher 32°C betrug. Betrachtet man nun beide Testreihen, so ergibt sich folgende Bilanz:

Energiezufuhr über den Verdampferwärmetauscher:	131,5 kWh
Energieabfuhr über den Sorptionsspeicher:	125,63 kWh
Beladung des Silikagels am Ende der Versuchsreihe:	26,8 Gew% Wasser pro Kilogramm Silikagel Trockensubstanz

Simulationen haben gezeigt, dass mit dem verwendeten Silikagel eine Speicherdichte von max. 150 kWh/m<sup>3</sup> Silikagel zu erwarten ist. Bei einer Schüttdichte von 790 kg/m<sup>3</sup> und einer Silikagelmasse von 808 kg (Trockensubstanz) im Sorptionsspeicher 2 errechnet sich eine Speicherdichte von 122,8 kWh/m<sup>3</sup> Silikagel. Betrachtet man die sensiblen Verluste von 10,9 kWh (4,9 kWh aus Versuchsreihe 1 und 6 kWh aus Versuchsreihe 2), die im wesentlichen durch die nicht optimierte Betriebsweise so hoch sind, so ist in der Praxis eine Speicherdichte von etwa 130 bis 150 kWh/m<sup>3</sup> Silikagel möglich.

### 3.2.2 Detailauswertung eines Adsorptionsversuchs mit dem Sorptionsspeicher 2

#### 3.2.2.1 Betriebsbedingungen für die manuelle Steuerung

Für die Versorgung einer Niedertemperaturheizung sollen beim Sorptionsspeichervorlauf - dieser entspricht dem Heizungsvorlauf - Temperaturen von 32 bis 40 °C erreicht werden ( $32\text{ °C} < T_{S2-AL} < 40\text{ °C}$ ). Die mittlere Temperatur in der Silikagelschüttung soll demnach zwischen 45 und 50 °C gehalten werden. Als Bedingung, dass es überhaupt zu einer Adsorption kommt, muss der Dampfdruck im VD/KO-Behälter um 3 bis 5 mbar höher sein als im Sorptionsspeicher - ist dies nicht der Fall, ist Gleichgewichtsbedingung gegeben und es erfolgt keine Adsorption. Weiters muss die Temperatur im VD/KO-Behälter kleiner als die mittlere Temperatur in der Silikagelschüttung sein, da ansonsten der Wasserdampf über der Silikagelschicht kondensieren kann und durch die Wassertropfen die Gefahr besteht, dass die Reaktion im Silikagel zu rasch abläuft und das Silikagel zerstört wird (platzt). Damit wäre das Silikagel für den weiteren Betrieb unbrauchbar. Die Betriebsbedingungen wurden im Wesentlichen durch das Steuern (Öffnen und Schließen) des Vakuumentils am VD/KO-Behälter und durch das Steuern der Energiezufuhr am Verdampfer mit der thermischen Solaranlage bzw. dem elektrischen Durchlauferhitzer eingestellt. Die Wärmeentnahme aus dem Sorptionsspeicher 2 erfolgte kontinuierlich während des gesamten Versuchs. Die Anlage wurde so betrieben, dass der Testbetrieb mit den definierten Betriebsbedingungen durchgeführt wurde. Am Abend wurde die Anlage abgeschaltet und über Nacht konnte das Silikagel relaxieren.

#### 3.2.2.2 Versuchsbeschreibung

Die Anlage wurde um 6:45 Uhr gestartet. Die Startbedingungen für den vorliegenden Versuch resultieren aus den Endbedingungen des letzten Versuches und den Änderungen während der Relaxationszeit (Wärmeverluste der Speicher). Der VD/KO-Behälter hatte im Fluid eine Temperatur von 30,2 °C, die mittlere Temperatur der Silikagelschüttung betrug 36,03 °C. Der gemessene Dampfdruck im VD/KO-Behälter betrug 42,4 mbar und war um 18,6 mbar größer als der gemessene Dampfdruck im Sorptionsspeicher 2, dessen Wert 23,8 mbar betrug. Alle Bedingungen für die Adsorption waren erfüllt und alleine aus den Dampfdruckbedingungen war ersichtlich, dass die Adsorption gestartet werden konnte, ohne dass Verdampfungsenergie im VD/KO-Behälter zugeführt werden musste. Der Beladungszustand vor Beginn des Versuchstages betrug 17,85 Gew% H<sub>2</sub>O pro kg Silikagel Trockensubstanz (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Betriebsbedingungen des Adsorptionsversuches beim Sorptionsspeicher 2, am 22. Juni 2001

<b>Konstante</b>	
Adsorbermasse (Trockensubstanz)	808,80 kg
Wasservolumen - Kondensator am Füllstandsensor = Null	0,38 m <sup>3</sup>
Wasservolumen pro % Füllstandsänderung	5,00 l
<b>Daten zum Versuch</b>	
<b>Anfangsbedingungen</b>	
Datum & Uhrzeit	22.06.01 06:45
Relaxaktionszeit	13,00 h
Umgebungstemperatur	24,20 °C
mittlere Adsorbtemperatur	36,03 °C
Abweichung von der mittleren Adsorbtemperatur	+0,57 / -1,03
Fluidtemperatur VD/KO Behälter	30,20 °C
Druck im Adsorber	23,80 mbar
Druck im Verdampfer	42,40 mbar
Füllstand im Kondensatbehälter (Füllstandssensor)	115,50 l
<b>Bedingungen nach Abschluss des Versuches</b>	
Datum & Uhrzeit	22.06.01 16:45
Umgebungstemperatur	25,40 °C
mittlere Adsorbtemperatur	39,40 °C
Abweichung von der mittleren Adsorbtemperatur	+1,60 / -1,2
Fluidtemperatur VD/KO Behälter	29,30 °C
Druck im Adsorber	31,00 mbar
Druck im Verdampfer	-
Füllstand im Kondensatbehälter	89,50 l
<b>Bedingungen nach Relaxation</b>	
Datum & Uhrzeit	23.06.01 06:00
Relaxationszeit	13,25 h
Umgebungstemperatur	24,30 °C
mittlere Adsorbtemperatur	35,58 °C
Abweichung von der mittleren Adsorbtemperatur	+0,52 / -0,88
Fluidtemperatur VD/KO Behälter	28,30 °C
Druck im Adsorber	27,20 mbar
Druck im Verdampfer	-
Füllstand im Kondensatbehälter	90,00 l
<b>Vorauswertung Beladung</b>	
Beladung Versuchsanfang	17,85%
Beladung Versuchsende	21,24%
berechnete Beladungsänderung	3,39%
Wasserumsatz gemessen	-25,50 l
gemessene Beladungsänderung	3,15%
Absoluter Fehler	0,23%

### 3.2.2.3 Auswertung des Versuches

Die Betriebsbedingungen für den gesamten Adsorptionsversuch sowie die Anfangsbedingungen für den Versuch am 22.06.01 wurden bereits bei den Betriebsbedingungen beschrieben. Die wesentlichen Parameter für die Erstellung der Tagesbeladungs- und Tagesenergiebilanz sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Temperatur-, Beladungs- und Leistungskurven für den Versuchstag sind aus Abbildung 6 bis Abbildung 9 ersichtlich.

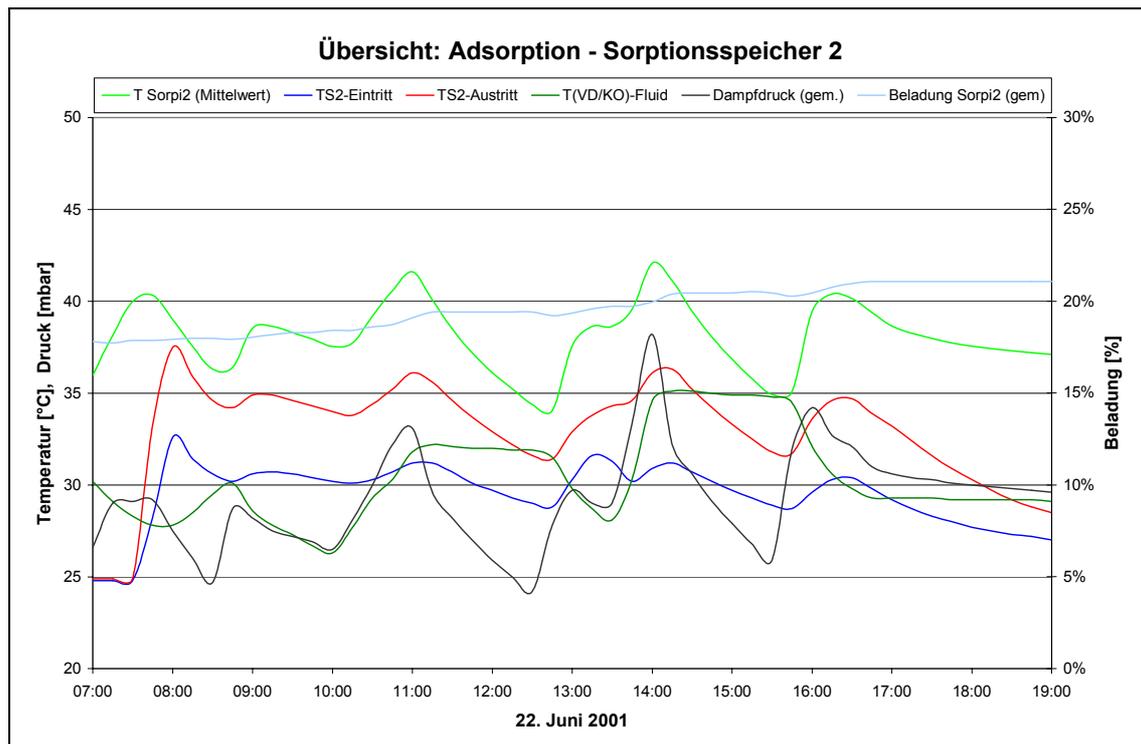


Abbildung 6: Übersichtsdiagramm des Adsorptionsversuches mit dem Sorptionsspeicher 2 am 22. Juni 2001

Der Adsorptionsversuch startete um 6:45 Uhr. Die Anfangsbedingungen sind aus Tabelle 3 (Anfangsbedingungen) ersichtlich. Da der Dampfdruck im VD/KO-Behälter höher als im Sorptionsspeicher war, konnte die Adsorption ohne Energiezufuhr im Verdampfer gestartet werden (6:55 Uhr). D.h. für den Startvorgang wurde ausschließlich das Vakuumventil des VD/KO-Behälters geöffnet. Der Dampf strömte über das Dampfrohr zum Sorptionsspeicher 2 (siehe hydraulisches Regelschema im Anhang), wurde adsorbiert wodurch die mittlere Temperatur der Silikagelschüttung stieg. Die Fluidtemperatur im VD/KO-Behälter sank (siehe Abbildung 6). Um 7:40 Uhr erreichte die mittlere Temperatur der Silikagelschüttung einen Wert von 40°C, das Vakuumventil des VD/KO-Behälter wurde geschlossen und die Wärmeentnahme aus dem Sorptionsspeicher gestartet - sprunghafter Anstieg der Austrittstemperatur aus dem Sorptionsspeicher ( $T_{S2\text{-Austritt}}$ ), siehe Abbildung 6 bzw. Abbildung 7. Die aus dem Sorptionsspeicher 2 entnommene Leistung betrug rund 2 kW (siehe Abbildung 9). Die mittlere Temperatur in der Silikagelschüttung sank ab und daher wurde wiederum das Vakuumventil geöffnet. Die Dampfdruckdifferenz zwischen Sorptionsspeicher 2 und VD/KO-

Behälter war kleiner 5 mbar. Aufgrund dessen wurde über die Solaranlage Verdampfungsenergie zugeführt. Um 8:35 Uhr wurde die Energiezufuhr zum Verdampfer gestoppt und um 10:00 wieder gestartet. Die Austrittstemperatur aus dem Sorptionsspeicher 2 pendelte dabei um  $35^{\circ}\text{C} \pm 2\text{K}$ . Um 11:00 Uhr wurde die Energiezufuhr zum VD/KO-Behälter gestoppt und das Vakuumventil des VD/KO-Behälter geschlossen, da die mittlere Temperatur in der Silikagelschüttung auf über  $40^{\circ}\text{C}$  angestiegen war. Bei der nächsten Testsequenz ab 11:15 Uhr - wurde das Vakuumventil so lange geschlossen gehalten, bis die Vorlauftemperatur aus dem Sorptionsspeicher 2 unter  $32^{\circ}\text{C}$  lag. Das Vakuumventil wurde um 12:15 Uhr wieder geöffnet. Durch die große Dampfdruckdifferenz zwischen Sorptionsspeicher 2 und VD/KO-Behälter wurde die mittlere Temperatur in der Silikagelschüttung in 15 min von  $34^{\circ}\text{C}$  auf  $38^{\circ}\text{C}$  angehoben. Die Austrittstemperatur aus dem Sorptionsspeicher 2 stieg während dieses Zeitraums ebenfalls auf  $34^{\circ}\text{C}$ . Die vorhin beschriebene Testsequenz wurde von 14:00 Uhr bis 16:00 Uhr nochmals wiederholt. Um 16:45 Uhr wurde der Versuch beendet.

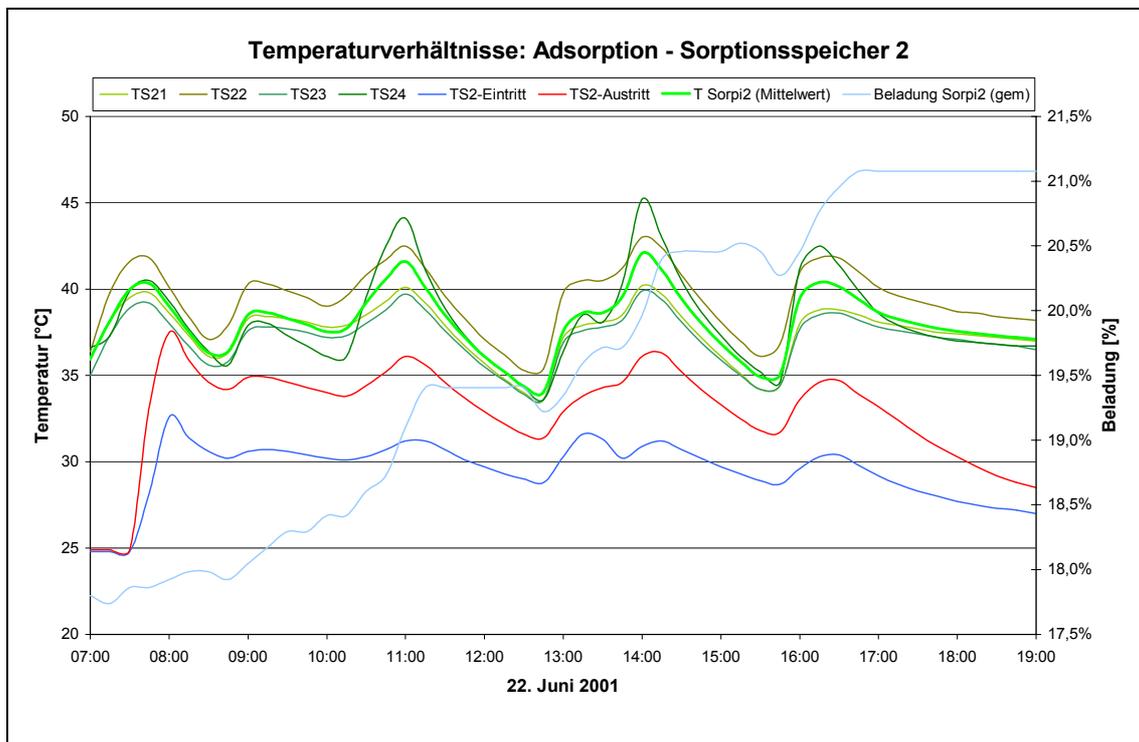


Abbildung 7: Temperaturverhältnisse im Sorptionsspeicher 2 während des Adsorptionsversuches am 22. Juni 2001

Abbildung 7 zeigt die vier Temperaturen in der Silikagelschüttung des Sorptionsspeichers 2. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die beiden Temperatursensoren (TS22 und TS24), die von oben betrachtet in der Silikagelschüttung auf einer Tiefe von 1.100 mm angeordnet sind, einen signifikant höheren Temperaturwert aufzeigen, als die beiden Temperatursensoren (TS21 und TS23), die in einer Tiefe von 320 mm liegen. Dies lässt darauf schließen, dass sich die Beladung während der Relaxationszeit nicht vollständig vergleichmäßigte. Zusätzlich sind in Abbildung 7 noch die Ein- und Austrittstemperaturen des Sorptionsspeichers 2 dargestellt.

Zur besseren Verdeutlichung der Bedingungen im VD/KO-Behälter sind in Abbildung 8 ausschließlich die Temperaturen und der Dampfdruck bei geöffnetem bzw. geschlossenem Sorptionsspeicherventil (dynamischer Dampfdruck) sowie der gerechnete Dampfdruck ( $p_{D,theor}$ ) der mittleren Dampftemperatur ( $T_{VD/KO-Dampf1}$  und  $T_{VD/KO-Dampf2}$ ) im VD/KO-Behälter dargestellt. Das Diagramm zeigt den Dampfdruckanstieg bei der Energiezufuhr im Verdampfer. Die Fluidtemperaturen steigen im VD/KO-Behälter deshalb so rasch an, da die thermische Solaranlage durch die hohe Einstrahlung eine Leistung bis zu 10 kW liefert.

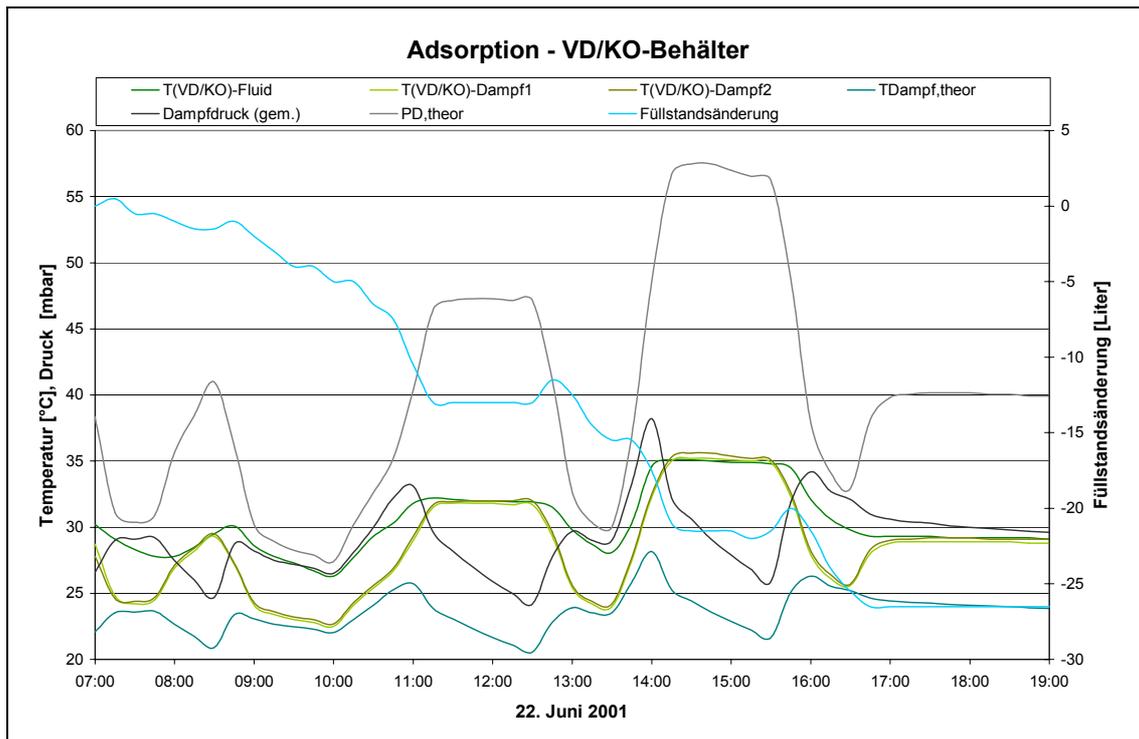


Abbildung 8: Betriebszustände im VD/KO-Behälter während des Adsorptionsversuches am 22. Juni 2001

In Abbildung 9 sind die Leistungs- und Energiekurven des Verdampferwärmetauschers sowie des Kondensationswärmetauschers dargestellt. Durch den Massenstrom von  $0,95 \text{ m}^3/\text{h}$  und einem  $\Delta T$  bis zu 15 K wurde im Verdampferwärmetauscher eine Leistung von bis zu 10 kW übertragen. Dem Sorptionsspeicher 2 wurde bei einem konstanten Massenstrom von  $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$  eine mittlere Leistung von 2 kW entnommen. Der Leistungseinbruch auf 1 kW verläuft parallel mit dem Absinken der mittleren Temperatur in der Silikagelschüttung auf  $34 \text{ }^\circ\text{C}$ .

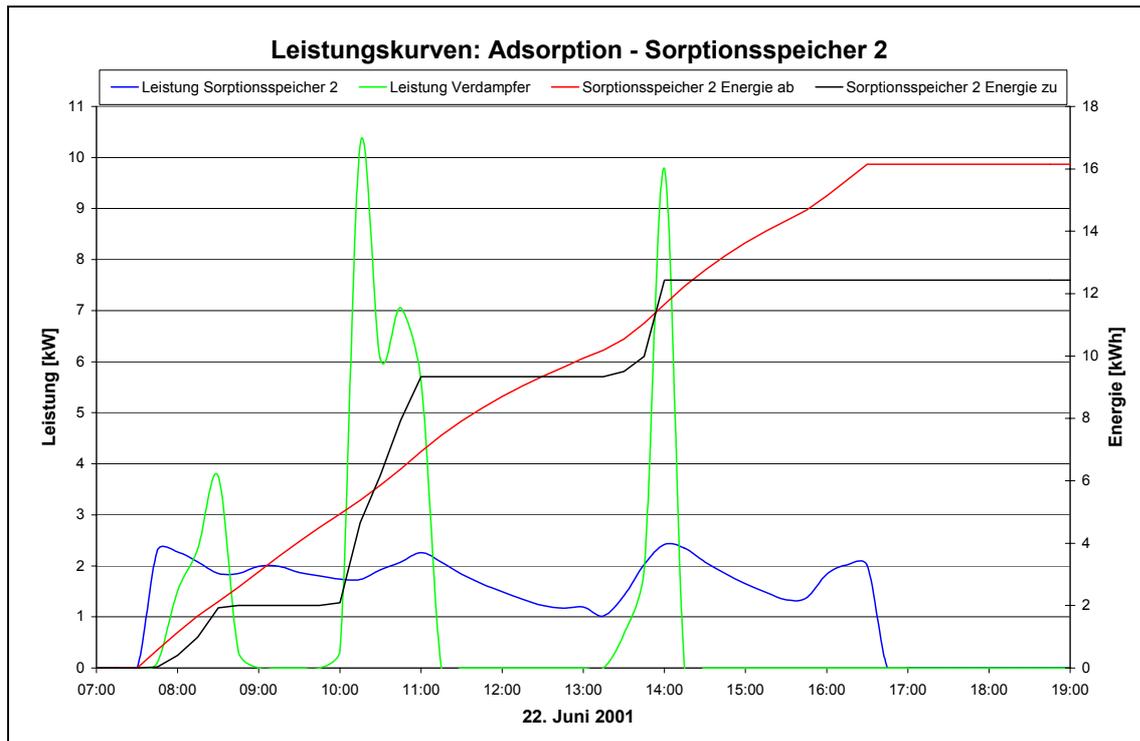


Abbildung 9: Energiebilanz des Adsorptionsversuches am 22. Juni 2001

Bei dem vorliegenden Versuch wurde die Beladung von 17,85 Gew% auf 21,3 Gew% Wasser pro Kilogramm Silikagel Trockensubstanz erhöht. Das entspricht einer Beladungsänderung von 3,45 Gew% Wasser pro Kilogramm Silikagel Trockensubstanz. Diese Werte wurden rechnerisch aus der mittleren Temperatur in der Silikagelschüttung und dem Dampfdruck ermittelt.

### 3.3 Zusammenfassung der Betriebserfahrungen

Ziel der AEE INTEC in diesem Projekt war die Errichtung der Testanlage, die Installation der Messtechnik, die Inbetriebnahme und die Durchführung von Anlagentests. Auf Grund der zeitlichen Verzögerungen bei der Konzeptionierung der Sorptionsspeicher musste der Versuchszeitraum gekürzt werden. Mit den ersten Testprogrammen wurden die Wärmetauschercharakteristik und die Betriebstauglichkeit der Anlagenhydraulik untersucht sowie erste Adsorptions- und Desorptionsversuche durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die Testanlage im allgemeinen und die thermochemische Wärmespeicherung auf der Basis der Adsorption von Wasserdampf in den Poren von Silikagel im speziellen ein technisch durchführbarer Lösungsansatz für die saisonale Speicherung ist.

Weder Sorptionsspeicher 1 noch Sorptionsspeicher 2 wurden energetisch optimal entladen und beladen. Für den Sorptionsspeicher 2 waren für die zweite Versuchsreihe Rahmenbedingungen definiert, die manuell gesteuert wurden.

Bei den Adsorptionsversuchen wurde für den Sorptionsspeicher 1 ein Energieoutput von 115 kWh pro m<sup>3</sup> Silikagel und für den Sorptionsspeicher 2 eine Energieoutput von 122,2 kWh pro m<sup>3</sup> Silikagel, bei einer minimalen Vorlauftemperatur aus dem Sorptionsspeicher von 32 °C

erreicht. Mit einer optimierten Betriebsweise müsste der theoretische Wert, der bei 140 bis 150 kWh pro m<sup>3</sup> Silikagel liegt, annähernd erreicht werden.

Ein Pufferspeicher - Wasser als Speichermedium - mit 1 m<sup>3</sup> Speichervolumen, hat einen Energieoutput von 67 kWh bei einer maximalen Speichertemperatur von 90 °C und einer minimalen Speichertemperatur von 32 °C ( $\Delta T = 58$  K). Der Minimalwert entsprach auch der minimalen Vorlauftemperatur aus dem Sorptionsspeicher während der Testreihen. Vergleicht man die beiden Ergebnisse - Energieoutput aus einem Pufferspeicher mit 1 m<sup>3</sup> Wasser und Energieoutput aus dem Sorptionsspeicher mit 1 m<sup>3</sup> Silikagel - so errechnet sich für den Sorptionsspeicher die 1,8-Fache, im optimalen Fall die 2,2-Fache Energiedichte. Daraus ergibt sich, dass der Sorptionsspeicher der Testanlage etwa die Hälfte an Speichervolumen benötigt, um den gleichen Energieoutput zu liefern wie der 1 m<sup>3</sup>-Wasserspeicher.

Bei den Desorptionsversuchen hat sich gezeigt, dass bei sinkender Beladung kleiner 10 Gew% Wasser pro Kilogramm Silikagel Trockensubstanz eine mittlere Temperatur in der Silikagelschüttung von 80 bis 90 °C notwendig ist. Dazu muss einerseits die Solaranlage über längere Zeit Temperaturen von weit über 90 °C liefern und andererseits muss die Niedertemperatursenke für die Kondensation eine Rücklauftemperatur von unter 20°C aufweisen. Mit der Regenwasserzisterne als Senke, konnten Rücklauftemperaturen zwischen 20 und 25 °C erreicht werden. Um die Beladung auf 2 Gew% Wasser pro Kilogramm Silikagel Trockensubstanz zu reduzieren, ist bei solaren Vorlauftemperaturen von 95°C eine Kondensationssenke mit einem Rücklauftemperaturniveau von 15 bis 20 °C notwendig.

## 4 Literaturverzeichnis

- Eder, et. al. 1997 Eder M., Fink C., Streicher W., Themeßl A., Weiß W. (1997); Heizen mit der Sonne, Handbuch zur Planung und Ausführung von solaren Heizungssystemen für Einfamilienhäuser, Hrsg.: AEE-Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, A-8200 Gleisdorf
- Meadows, 1972 Meadows D. (1972); Die Grenzen des Wachstums, Bericht an den „Club of Rome“ zur Lage der Menschheit; Stuttgart
- Mittelbach, 2000 Mittelbach W. (2000); Sorptionspeicher – Neue Perspektiven für solare Raumheizung, Gleisdorf Solar 2000 (5. Internationales Symposium für thermische und photovoltaische Sonnenenergienutzung), Hrsg.: AEE-Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, A-8200 Gleisdorf
- E.V.A., 1997 EnergieVerwertungsAgentur (1997); Energieflussdiagramm Österreich Homepage: [www.eva.ac.at](http://www.eva.ac.at)