

# Modularer Energiespeicher nach dem Sorptionsprinzip mit hoher Energiedichte (MODESTORE)

W. Wagner, D. Jähnig

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**81/2006**

## **Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>  
oder unter:

Projektfabrik Waldhör  
Währingerstraße 121/3, 1180 Wien  
Email: versand@projektfabrik.at

# Modularer Energiespeicher nach dem Sorptionsprinzip mit hoher Energiedichte (MODESTORE)

Ing. Waldemar Wagner, DI Dagmar Jähnig  
DI Charlotta Isaksson, DI Robert Hausner  
AEE – Institut für Nachhaltige Technologien

Ing. Gerald Jungreithmayr  
Solution Solartechnik GmbH

Ing. Werner Pink  
Behältertechnik PINK Ges.m.b.H.

Gleisdorf, Juli 2006

**Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie**



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



## Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines beauftragten Projekts aus der Programmlinie *Haus der Zukunft* im Rahmen des Impulsprogramms *Nachhaltig Wirtschaften*, welches 1999 als mehrjähriges Forschungs- und Technologieprogramm vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie gestartet wurde.

Die Programmlinie *Haus der Zukunft* intendiert, konkrete Wege für innovatives Bauen zu entwickeln und einzuleiten. Aufbauend auf der solaren Niedrigenergiebauweise und dem Passivhaus-Konzept soll eine bessere Energieeffizienz, ein verstärkter Einsatz erneuerbarer Energieträger, nachwachsender und ökologischer Rohstoffe, sowie eine stärkere Berücksichtigung von Nutzungsaspekten und Nutzerakzeptanz bei vergleichbaren Kosten zu konventionellen Bauweisen erreicht werden. Damit werden für die Planung und Realisierung von Wohn- und Bürogebäuden richtungsweisende Schritte hinsichtlich ökoeffizientem Bauen und einer nachhaltigen Wirtschaftsweise in Österreich demonstriert.

Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt dank des überdurchschnittlichen Engagements und der übergreifenden Kooperationen der Auftragnehmer, des aktiven Einsatzes des begleitenden Schirmmanagements durch die Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik und der guten Kooperation mit der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft bei der Projektabwicklung über unseren Erwartungen und führt bereits jetzt zu konkreten Umsetzungsstrategien von modellhaften Pilotprojekten.

Das Impulsprogramm *Nachhaltig Wirtschaften* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie in der Schriftenreihe publiziert, aber auch elektronisch über das Internet unter der Webadresse <http://www.HAUSderZukunft.at> Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>SUMMARY .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Hintergrund und Motivation.....</b>	<b>6</b>
<b>3.2</b>	<b>Aufgabenstellung des Projektes .....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>THEORIETEIL .....</b>	<b>8</b>
<b>4.1</b>	<b>Funktionsprinzip.....</b>	<b>8</b>
<b>4.2</b>	<b>Auswahl des Adsorbens für die Testanlage.....</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>ENTWICKLUNG UND BAU DES PROTOTYPEN DER ZWEITEN GENERATION ALS KOMPAKTSPEICHER .....</b>	<b>12</b>
<b>5.1</b>	<b>Vorarbeiten im Projekt HYDES .....</b>	<b>12</b>
<b>5.2</b>	<b>Vorarbeiten im EU-Projekt MODESTORE .....</b>	<b>14</b>
5.2.1	Speicherkonzept .....	14
5.2.2	Funktionsweise .....	15
5.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	16
<b>5.3</b>	<b>Umsetzung des Konzeptes in einer Pilotanlage.....</b>	<b>18</b>
5.3.1	Konzept der Pilotanlage in Kombination mit einer Solaranlage .....	18
5.3.2	Bau der Pilotanlage .....	19
<b>6</b>	<b>SYSTEMKONZEPT FÜR DIE PILOTANLAGE .....</b>	<b>21</b>
<b>6.1</b>	<b>Auswahl des Einfamilienhauses .....</b>	<b>21</b>
<b>6.2</b>	<b>Hydraulikkonzept.....</b>	<b>21</b>
<b>6.3</b>	<b>Messtechnik.....</b>	<b>23</b>
<b>6.4</b>	<b>Inbetriebnahme.....</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>BETRIEBSERFAHRUNGEN MIT DER PILOTANLAGE .....</b>	<b>26</b>
<b>7.1</b>	<b>Desorptionsbetrieb .....</b>	<b>26</b>
7.1.1	Regelungsstrategie.....	26
7.1.2	Kondensationsprozess .....	27
7.1.3	Kondensation in den Pufferspeicher .....	27
7.1.4	Kondensation über Kollektor .....	29
7.1.5	Kondensation in den Heizkreis .....	32
7.1.6	Zusammenfassung Desorption .....	33
<b>7.2</b>	<b>Adsorptionsbetrieb .....</b>	<b>35</b>
7.2.1	Regelungsstrategie.....	35
7.2.2	Verdampfungsprozess.....	36
7.2.3	Leistungen/Temperaturen .....	38
7.2.4	Hub .....	39
7.2.5	Speicherdichte.....	40
7.2.6	Zusammenfassung Adsorption .....	41
<b>8</b>	<b>SIMULATIONEN .....</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>TAGUNGSTEILNAHMEN UND INFORMATIONSWORKSHOP.....</b>	<b>46</b>
<b>10</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....</b>	<b>47</b>
<b>11</b>	<b>LITERATURHINWEISE.....</b>	<b>48</b>



# 1 Zusammenfassung

Für die Nutzung von Solarwärme zur Warmwasserbereitung und Raumheizung ist es nötig, die im Sommer zur Verfügung stehende Energie für die Wintermonate zu speichern. Ein Energiespeicher, der mit möglichst geringen Verlusten Energie für mehrere Monate speichern kann und dabei eine möglichst hohe Energiedichte aufweist, wäre ein wichtiger Schritt hin zu Solaranlagen, die ohne konventionelle Nachheizenergie wie etwa Gas oder Pellets auskommen. Ein solcher Speicher würde den Deckungsbeitrag von thermischen Solaranlagen zur Gesamtenergieversorgung deutlich verbessern.

Eine Option für einen solchen Energiespeicher ist die Sorptionsspeichertechnologie, bei der mithilfe von Sonnenenergie an ein hochporöses Medium (hier Silikagel) adsorbiertes Wasser desorbiert wird. Die beiden Komponenten können dann getrennt aufbewahrt werden und die Energie somit verlustfrei gespeichert werden. Um den Speicher wieder zu entladen, wird das Wasser auf niedrigem Temperaturniveau wieder verdampft, adsorbiert und dabei wird Wärme frei. Das System ist also im engeren Sinne eine thermisch angetriebene Wärmepumpe.

Aufbauend auf vorangegangenen Projekten, in denen ein solcher Sorptionsspeicher mit der Materialpaarung Silikagel und Wasser entwickelt wurde, wurde das Konzept für den realen Einsatz in einem Einfamilienhaus hochskaliert und eine erste Pilotanlage errichtet.

In diesem Projekt konnte erstmals gezeigt werden, dass die Sorptionstechnologie auch unter realen Einsatzbedingungen technisch umsetzbar ist. Das Systemkonzept und die Regelstrategie haben sich als funktionsfähig und praxistauglich erwiesen.

Obwohl der Betrieb des Systems zufriedenstellend verlaufen ist und das Systemkonzept in dieser Form auch in weiteren Anlagen umgesetzt werden könnte, hat sich herausgestellt, dass mit der verwendeten Materialpaarung die Sorptionsspeicherung zwar technisch umsetzbar ist, aber dass der damit zu erzeugende Temperaturhub nur in einer schmalen Bandbreite von Wasserbeladungen des Silikagels auch technisch nutzbar ist. Wenn das Silikagel sehr trocken ist, erzeugt es einen brauchbaren Temperaturhub, ab einer Beladung von etwa 13% jedoch wird der Temperaturhub so klein, dass er in einer realen Anwendung mit Wärmetauschern, Rohrleitungen und Behältern, die alle verlustbehaftet sind, nicht mehr nutzbar ist. Dies bedeutet, dass die technisch nutzbare Energiedichte dieses Materials weit von der theoretischen und auch weit von der im Labor messbaren Energiedichte entfernt ist. Somit bräuchte man sehr große Mengen des Materials, was weder technisch noch wirtschaftlich sinnvoll ist.

Das Material wurde deshalb ausgewählt, weil es im Großmaßstab hergestellt und somit kostengünstig ist. Bislang gibt es noch kaum Forschungsinstitute, die Sorptionsmaterialien für den Einsatz als Wärmespeicher entwickeln. Meist ist der Fokus auf Wärmepumpen, Kältemaschinen oder Gastrennung und Trocknungsprozesse. Einzelne Projekte haben gezeigt, dass es chemisch und technisch machbar ist, Sorptionsmaterialien auch für den Einsatz als Wärmespeicher zu entwickeln. Bislang sind diese Materialien aber meist sehr teuer oder beispielsweise korrosiv.

Als nächster Schritt in Richtung einer monosolaren (100% solaren) Wärmeversorgung für die Raumheizung wäre eine intensiviertere Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Sorptionsmaterialien. Beispielsweise können vorhandene Zeolithe, die im großen Maßstab unter anderem in der Waschmittelindustrie eingesetzt werden aber den Nachteil haben, dass sie sehr hohe Temperaturen für die Desorption brauchen, so modifiziert werden, dass die Desorptionstemperaturen gesenkt werden, aber gleichzeitig der Temperaturhub höher bleibt, als es bei einfachen Silikagelen der Fall ist.

## 2 Summary

For an efficient use of solar heat for domestic hot water and space heating, it is necessary to store the solar energy available in summer for the winter months. An energy store that can store heat for several months, has a high energy density and small thermal losses would be a big step towards solar thermal systems without the need for an auxiliary heat source such as natural gas or wood pellets. Such a store would improve the contribution of solar thermal systems to the overall energy supply significantly.

One option for such an energy store is a store based on sorption technology where water that is adsorbed on a highly porous material (in this case silica gel), is desorbed using solar energy. The two components can then be stored separately and the energy is stored without thermal losses. To discharge the store, water is evaporated at a low temperature level and adsorbs on the silica gel. During the adsorption process, heat is released. In a narrower sense, this kind of system is not a store but a thermally-driven heat pump.

Based on previous projects where a sorption heat store with the material pair silica gel and water was developed, the system was scaled up for use in a single-family house and a first pilot plant was built.

In this project, it could be shown for the first time that sorption technology for heat storage is technically feasible in a live test. The system concept as well as the control strategy have been proven to be functional under real operating conditions.

The operation of the system was satisfactory and the system concept could be implemented in further systems. It has been shown that sorption storage with the used material combination is technically feasible. However, the temperature lift that can be achieved is only technically useful in a relatively small range of water contents. As long as the silica gel is very dry, the temperature lift is sufficient. But starting at a water content of approximately 13%, the temperature lift is not large enough to compensate for higher losses in heat exchangers, pipes and tanks. That means that the energy density of the material that can be used in a real application is much smaller than both the theoretical one and what has been measured under laboratory conditions. Therefore, a large quantity of materials would be necessary which makes sense neither technically nor economically.

The used material has been chosen because it is manufactured in mass production and therefore inexpensive. Up to now, there are very few research institutes that develop sorption material specifically for heat storage. In most cases, the focus is on heat pumps, cooling machines or gas separation and drying processes. Singular projects have shown that the development of sorption materials for heat storage is technically feasible. So far, these materials have been expensive or for example corrosive.

The next step towards monosolar (100% solar) heat supply for space heating would be an intensified research program on sorption materials for this purpose. Existing zeolites that are used on a grand scale for example in the cleaning agent industry, have the disadvantage that high temperatures are necessary for desorption. One possible development topic could be to modify these zeolites in such a way that the desorption temperatures decrease but the temperature lift still stays at a higher level than it is the case with simple silica gels.

## 3 Einleitung

### 3.1 Hintergrund und Motivation

Bei der weltweiten Verwendung und Bereitstellung von Energie stellt sich grundsätzlich die Problematik der nutzergerechten Umwandlung der zur Verfügung stehenden primären Energiequellen. Die erforderliche Umwandlung umfasst sowohl die Form der Energie – elektrisch, mechanisch oder thermisch als auch ihre zeitgerechte Verfügbarkeit. Bei der Verwendung von Wärme kommt noch hinzu, dass sie oft als Nebenprodukt anderer Prozesse entsteht. Oft ist es nicht möglich, die Wärmeerzeugung dem Bedarf genau anzupassen. Die Wärme entsteht zudem häufig bei ungeeigneter Temperatur oder zum falschen Zeitpunkt. Im Zuge eines bewussteren Umgangs mit Energie und im Zusammenhang mit den drohenden klimatischen Folgen der herkömmlichen Energiebereitstellung wird eine effizientere Nutzung aller Ressourcen immer wichtiger. Soll eine effiziente Nutzung von Energie vorangetrieben werden, ist es nötig, sich mit der Problematik der Wärmeumwandlung und -speicherung intensiv zu befassen.

Ein Wärmetransformationsprozess ist im weiteren Sinne ein durch Wärme angetriebener Prozess zur Nutzbarmachung von Wärme auf nicht nutzbarem Temperaturniveau durch Umwandlung in Wärme auf nutzbarem Temperaturniveau. Diese Prozesse umfassen thermisch angetriebene Wärmepumpen und Kältemaschinen. Unter dem gleichen Oberbegriff sind auch sogenannte Wärmetransformatoren im engeren Sinne bekannt, die einen Wärmestrom mittlerer Temperatur in einen heißeren und einen kälteren Anteil aufspalten.

Im Unterschied dazu steht die Wärmespeicherung, durch die Wärmeumwandlung und deren Nutzung zeitlich entkoppelt wird. Somit wird die Nutzung von Wärme möglich, die in Zeiträumen mit reduziertem Bedarf anfällt. Diese Entkoppelung ist bei der Nutzung regenerativer Energiequellen von besonderer Bedeutung, da sich diese Quellen in der Regel nur schlecht steuern lassen. Mögliche Verfahren zur Wärmetransformation und Speicherung sind sowohl Absorptions- als auch Adsorptionsprozesse. Absorptionsprozesse, also die Lösung von Gasen in Flüssigkeiten unter Bildung einer homogenen Lösungsphase, sind in der technischen Ausführung schon weit fortgeschritten, wie die Vielzahl der auf dem Markt erhältlichen Absorptionskältemaschinen zeigt.

Adsorptionsprozesse, also die Bindung von Gasen an der Oberfläche von Feststoffen, sind umkehrbar, und die bei der Adsorption freiwerdende Adsorptionsenthalpie kann technisch genutzt werden. Bei hochporösen Adsorbentien ist die Adsorptionskapazität besonders groß, da sie eine extrem große innere Oberfläche - typischerweise in der Größenordnung von mehreren hundert Quadratmetern pro Gramm - aufweisen. Die traditionellen Anwendungsfelder der Adsorption sind Gastrennung und Gastrocknung.

Hier wird die selektive Adsorption von Gasen an speziell für diese Anwendung entwickelten Adsorbentien, die unter dem Begriff „technische Adsorbentien“ bekannt sind, genutzt, um aus einem Gasstrom eine bestimmte Komponente zu entfernen. Folglich sind die technischen Adsorbentien auch auf diese Anwendung abgestimmt: von besonderer Bedeutung ist die Trennschärfe, mit der ein Adsorbens unterschiedliche Gase selektiv adsorbiert. Die Adsorbensentwicklung zielt darauf, die Selektivität zu verschärfen und bessere Trennergebnisse zu erzielen, sowie effizientere Gastrennungs- und Reinigungsverfahren zu entwickeln. Bei diesen Prozessen ist der energetische Aspekt zwar nicht unwichtig, da er in die Betriebskosten der Prozesse eingeht, aber er spielt eine

zweitrangige Rolle. Gastrennung durch Adsorption ist meistens deutlich energie- und kostengünstiger als konkurrierende Prozesse wie beispielsweise Destillation.

Die Anwendung der Adsorption für rein energetische Zwecke wurde für die thermische Energiespeicherung erstmals in den siebziger Jahren vorgeschlagen, erreichte aber erst in den letzten Jahren größere Beachtung. Es werden zunehmend adsorptiv arbeitende Verfahren, Prozesse und Anlagen vorgestellt, bei denen die Wärmetransformation die zentrale Rolle spielt. Auch internationale Konferenzen wie die „Fundamentals of Adsorption“, die sich in früheren Jahren allein mit Trennprozessen befassten, schließen neuerdings Wärmetransformationsprozesse ein. Adsorptionsverfahren spielen in zunehmendem Maße auch bei Konferenzen wie der „International Sorption Heat Pump Conference“ eine Rolle, die sich lange Zeit auf Absorptionsprozesse beschränkt hatten.

### **3.2 Aufgabenstellung des Projektes**

Für die Nutzung von Solarwärme zur Warmwasserbereitung und Raumheizung ist es nötig, die im Sommer zur Verfügung stehende Energie für die Wintermonate zu speichern. Ein Energiespeicher, der mit möglichst geringen Verlusten Energie für mehrere Monate speichern kann und dabei eine möglichst hohe Energiedichte aufweist, wäre ein wichtiger Schritt hin zu Solaranlagen, die ohne konventionelle Nachheizenergie wie etwa Gas oder Pellets auskommen. Ein solcher Speicher würde den Deckungsbeitrag von thermischen Solaranlagen zur Gesamtenergieversorgung deutlich verbessern.

Erste Basisarbeiten für das vorliegende Projekt, die Entwicklung eines geeigneten Langzeitspeichers auf der Basis der Feststoffsorption (Silikagel), wurden 1995 von der Firma UFE SOLAR GmbH (BRD) zusammen mit dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) begonnen.

Eine kontinuierliche Fortsetzung der Forschung in diesem Bereich erfolgte durch das von der „Europäischen Kommission“ und durch das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie geförderte Projekt HYDES, an dem auch die AEE INTEC beteiligt war (siehe Kapitel 5.1).

Im EU-Projekt MODESTORE wurde aufbauend auf den Ergebnissen aus HYDES ein Sorptionsspeicher der zweiten Generation entwickelt (siehe Kapitel 5.2).

Das vorliegende Projekt MODESTORE (Haus der Zukunft) baut auf die oben angeführten Projekte auf und hat zum Ziel, in einer ersten Pilotanlage das Funktionieren des Sorptionsspeichers in einer realen Anwendung unter Beweis zu stellen.

## 4 Theorieteil

### 4.1 Funktionsprinzip

Die thermochemische Wärmespeicherung basiert auf einer reversiblen chemischen Reaktion bei der Wärme umgesetzt wird, nach der Formel  $A+B \leftrightarrow AB + \text{Wärme}$ .

Bei der Ladung wird der Substanz  $AB$  Wärme zugeführt, die in die Komponenten  $A$  und  $B$  dissoziiert. Um die Wärme zurückzugewinnen, lässt man die beiden Komponenten  $A$  und  $B$  miteinander reagieren. Solange eine Reaktion zwischen  $A$  und  $B$  verhindert wird, kann die in Form von chemischer Energie gespeicherte Wärme nicht freigesetzt werden. Auf diese Weise kann Wärme grundsätzlich bei beliebigen Temperaturen über beliebig lange Zeiten gespeichert werden. Um eine Trennung zwischen  $A$  und  $B$  zu vereinfachen, liegt gewöhnlich eine der Phasen im gasförmigen Zustand vor.

Die Auswahl der Substanzen  $A$  und  $B$  richtet sich nach dem Temperaturbereich, in welchem die oben skizzierte Reaktion abläuft. Die meisten chemischen Verbindungen haben zu hohe Dissoziationstemperaturen, so dass im Niedertemperaturbereich nur Sorptionsprozesse als Reaktionstyp in Frage kommen. Sorptionsprozesse, wie Adsorption oder Absorption, sind durch geringe Bindungskräfte ausgezeichnet, die je nach Materialpaarung zu Dissoziationstemperaturen unter 100 °C führen, was für die Beladung des Speichers mit Flachkollektoren ideal ist.

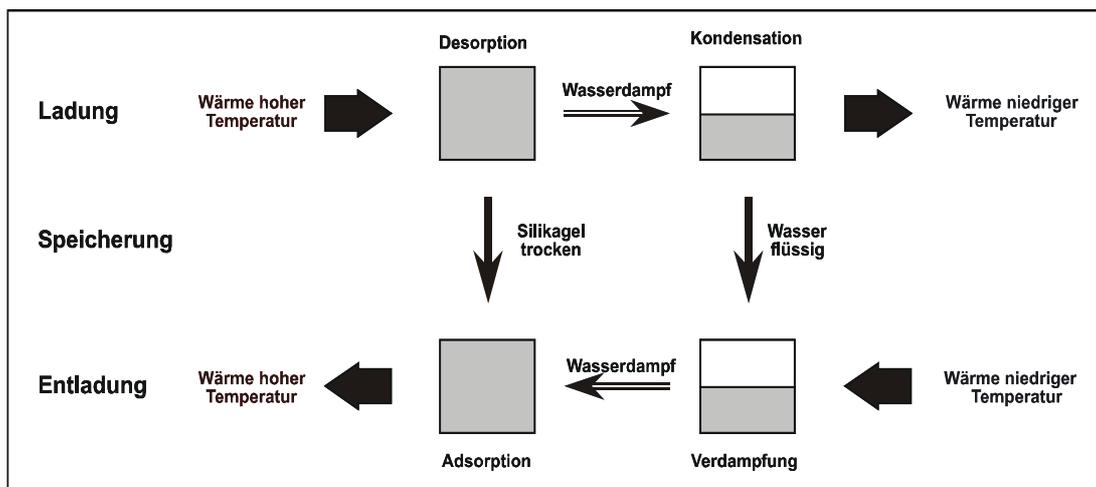


Abb. 1: Grundprinzip des Sorptionsspeichers

Für die Langzeitspeicherung solarer Wärme wurde die Adsorption von Wasserdampf in den Poren von Silikagel ausgewählt. Somit entspricht  $A$  dem trockenen Silikagel,  $B$  dem freien Wasserdampf und  $AB$  dem mit adsorbiertem Wasser gesättigten Silikagel. Diese Wahl hat folgende Gründe: Neben der hohen Verfügbarkeit und der physiologischen Unbedenklichkeit hat Wasser eine sehr hohe Verdampfungsenthalpie, was zu hohen Energiedichten führt. Kondensiert man Wasserdampf bei einer Temperatur von 50°C, wird eine Wärmemenge von etwa 0,65 kWh/kg frei. Da bei der Adsorption von Wasserdampf an der Oberfläche des Silikagels ein Phasenübergang zwischen gasförmiger und flüssiger Phase stattfindet und diese dann an der Feststoffoberfläche sorptiv gebunden wird, setzt sich die freiwerdende Adsorptionsenthalpie aus der Kondensationsenthalpie und Anteilen, die aus den Bindungskräften der Oberfläche herrühren, zusammen. Je höher die Beladung des Adsorbens (d.h. je mehr

Wassermoleküle schon an der Oberfläche adsorbiert sind), desto geringer wird die Bindungsenergie und damit die Reaktionswärme, da die Bindungskräfte nur eine geringe Reichweite besitzen.

Aufgabe des Materials ist es, eine möglichst hohe Wassermenge adsorptiv zu binden. Dies wird bei einer Reihe technischer Adsorbentien wie Silikagele, Zeolithe und Aktivkohlen erreicht. Diese Adsorbentien werden großtechnisch hergestellt.

Wird Wasser als Arbeitsgas verwendet, kann das System offen oder geschlossen ausgeführt werden. Im ersten Fall wird das Wasser durch trockene Luft desorbiert und in die Atmosphäre abgeführt, zur Adsorption ist dann die Zufuhr von feuchter Luft notwendig. Dieses Verfahren wurde in Deutschland in einem Zeolithspeicher umgesetzt. In der Entwicklung des Sorptionsspeichers, auf den dieses Projekt basiert, wurde ein geschlossenes System vorgezogen, in dem der freigesetzte Wasserdampf kondensiert, getrennt als flüssiges Wasser aufbewahrt und vor der Entladung bei niedrigen Temperaturen wieder verdampft wird, um eine Adsorption zu ermöglichen. Dieses Verfahren wurde aus folgenden Gründen vorgezogen:

- Für den Wasserdampftransport ist kein elektrischer Energieaufwand notwendig.
- Der Verzicht auf Luft als Trägermedium ermöglicht auch feineres, ungeordnetes Granulat und somit dichtere und preisgünstigere Materialpackungen.
- Die Entkopplung von Wärme- und Stofftransport führt bei geeigneter Wärmeübertragung im Adsorber zu einer besseren Ausnutzung der Adsorptionskapazität.
- Zur Entladung muss beim offenen System feuchte Luft zur Verfügung stehen. Die Höhe der Luftfeuchtigkeit entscheidet darüber, wieviel Wärme im Speicher erzeugt werden kann.

Wasser eignet sich vor allem aufgrund seiner hohen spezifischen Verdampfungsenthalpie und seiner Polarität für die Verwendung in einem Sorptionssystem. Verglichen mit anderen Adsorbptiven 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
- es ist kostengünstig

Bei einem Einsatz des Sorptionsprinzips als Energiespeicher für ein monosolares (100% solares) Heizsystem wird der Speicher in den Sommermonaten mit Hilfe der von den Solarkollektoren erzeugten Wärme energetisch beladen, d.h. das Adsorbens wird getrocknet (Desorption). Das desorbierte Wasser wird kondensiert und in einem separaten Behälter aufbewahrt.

In den Wintermonaten wird das Wasser auf einem niedrigen Temperaturniveau verdampft, adsorbiert am Silikagel und generiert damit Wärme auf einem höheren Temperaturniveau, die dann über einen Wärmetauscher an das Heizsystem abgegeben werden kann. In strahlungsreichen Perioden kann in den Wintermonaten der Kollektorertrag dazu genutzt werden, einen Teil des adsorbierten Wassers wieder zu desorbieren. Auf diese Art und Weise kann der Adsorptions-Desorptionszyklus mehrfach durchlaufen werden, was die benötigte Speichergröße reduziert.

## 4.2 Auswahl des Adsorbens für die Testanlage

Im Rahmen der Basisarbeiten für das vorliegende Projekt wurden als Adsorbens Silikagel und als Adsorptiv Wasser bzw. Wasserdampf für das Verfahren der thermochemischen Wärmespeicherung gewählt. 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 ( $300 - 800 \text{ m}^2/\text{g}$ ) (Welteroth et al., 2001).

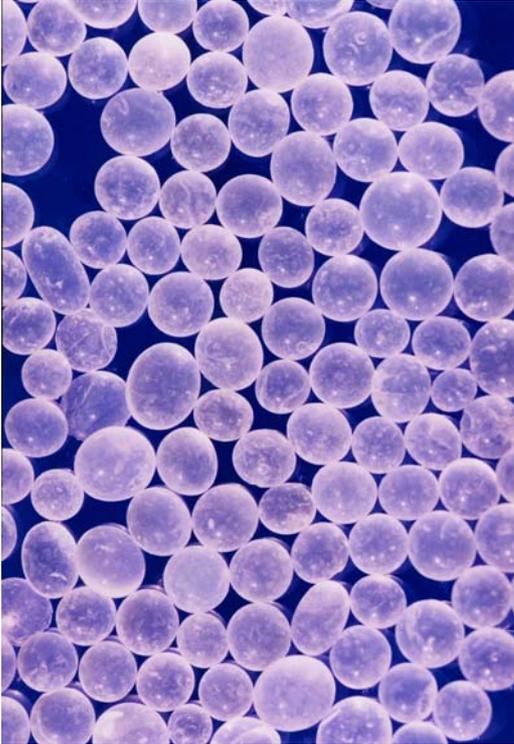


Abb. 2: Makroaufnahme des Silikagels SYLOBEAD® B 127

Für die Testanlage wird das Silikagel mit dem Handelsnamen SYLOBEAD® B 127 der Firma Grace verwendet. Dieses 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. Bei diesen Untersuchungen wurden die Beladungsgleichgewichte experimentell bestimmt und parametrisiert. Die angewandten experimentellen und theoretischen Verfahren werden ausführlich in (Nuñez et al., 2001) beschrieben. Mittels der gewonnenen Daten konnte eine Berechnungsgrundlage geschaffen werden, mit der u.a. anhand des Druckes und der Temperatur im Speicher auf die Beladung des Adsorbens geschlossen werden kann.

Abb. 3 zeigt exemplarisch einige der bei diesen Messungen aufgenommenen Isobaren für das verwendete Silikagel.

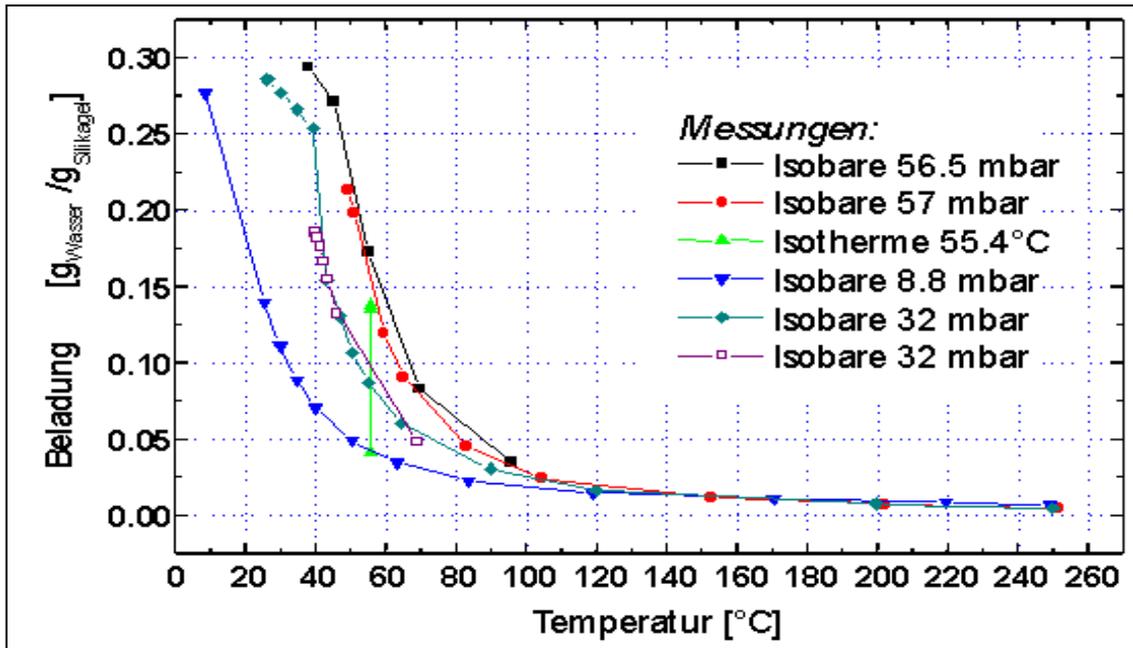


Abb. 3: Isobarenfeld des verwendeten Silikagels (Nuñez, et al. 2001)

## 5 Entwicklung und Bau des Prototypen der zweiten Generation als Kompaktspeicher

### 5.1 Vorarbeiten im Projekt HYDES

Im Vorgängerprojekt HYDES (High Energy Density Sorption Heat Storage for Solar Space Heating) wurde eine Testanlage für einen Sorptionsspeicher errichtet (Welteroth et al., 2001). Die Anlage bestand aus zwei Sorptionsspeichern mit je 1.250 Liter und einem Verdampfer- Kondensatorbehälter (VD/KO) mit 1.250 Liter sowie zwei Wärmequellen (Solaranlage und Durchlauferhitzer) und drei Wärmesenken (Wärmabgabesystem, Warmwasserboiler und eine Regenwasserzisterne). Die beiden Sorptionsspeicher enthielten je einen Wärmetauscher. Die Sorptionsspeicher und der Verdampfer/Kondensatorbehälter waren mit einem Dampfrohr verbunden mit einem Ventil an jedem Speicher. Durch dieses Rohr strömt der Dampf während des Adsorptionsprozesses (in den Sorptionsspeicher) bzw. während des Desorptionsprozesses (zum Kondensator).

Alle hydraulischen Stränge waren an zwei Verteilerschienen (Verteilerschiene 1 und 2) installiert. Die evakuierten Sorptionsspeicher (Sorptionsspeicher 1 und Sorptionsspeicher 2) sowie der VD/KO-Behälter waren mit einer Dampfrohrleitung verbunden.

Der Solarprimärkreis entsprach von der hydraulischen Verschaltung einer konventionellen thermischen Solaranlage, die nach dem „matched flow“- Prinzip betrieben wird. Im Solarprimärkreis wurde als Wärmeträger ein Wasser- Frostschutzgemisch eingesetzt. Die Solarsekundärseite bestand bei der Testanlage aus zwei Kreisen, wobei der Solarsekundärkreis 1 die Verteilerschiene 1 und der Solarsekundärkreis 2 die Verteilerschiene 2 versorgt. Die Systemtrennung zwischen Solarprimärkreis und 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 waren so an die Verteilerschiene 1 angeschlossen, dass diese entweder parallel oder seriell Energie von der Verteilerschiene 1 beziehen bzw. dorthin liefern können.

An der Verteilerschiene 2 waren 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 konnte sowohl über den Solarsekundärkreis 2 als auch über den Durchlauferhitzer mit Wärme versorgt werden. Zusätzlich wurde eine Querverbindung von der Wärmesenke Warmwasserboiler zum Kondensationswärmetauscher installiert, um das Heizen mit der Kondensationswärme zu testen. Um im Sommer einen Heizbetrieb simulieren zu können, wurde während des ersten Testbetriebes der Boiler als Wärmesenke anstelle der Heizung verwendet. Die hydraulische Schaltung bot auch die Möglichkeit, die Sorptionsspeicher mit dem Durchlauferhitzer aufzuheizen und das Silikagel zu trocknen. Siehe Hydraulik in Abb. 4.

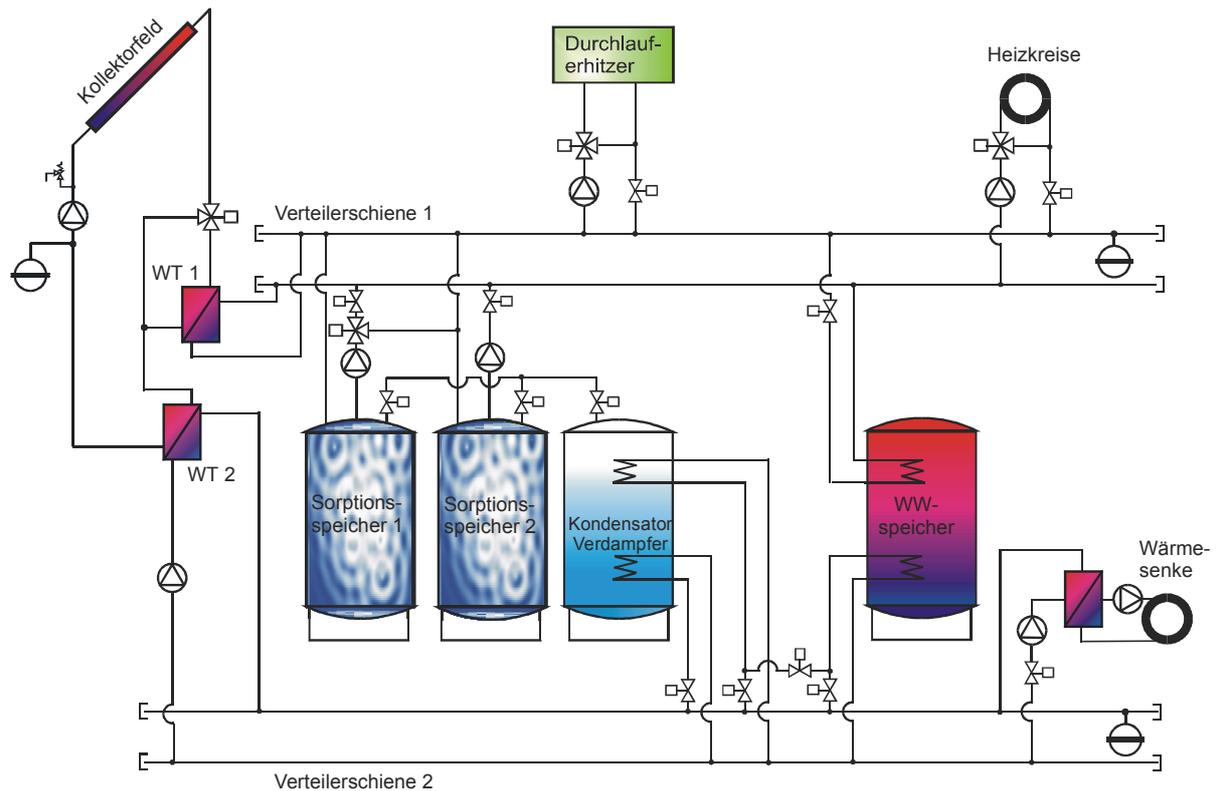


Abb. 4: Schematische Darstellung der Sorptionsspeicheranlage im Projekt HYDES.

Die Wärmetauschertechnik und die Betriebstauglichkeit der Anlagentechnik wurden in diesem Vorprojekt untersucht, und Adsorptions- und Desorptionsversuche wurden im Labor durchgeführt. Ergebnis dieses Projektes war unter anderem, dass die Testanlage im allgemeinen und die thermochemische Wärmespeicherung auf Basis der Adsorption von Wasserdampf in den Poren von Silikagel im speziellen, ein technisch durchführbarer Lösungsansatz für die saisonale Speicherung ist. Die Testanlage lieferte einen Energieoutput von 115-122 kWh pro m<sup>3</sup> Silikagel bei einer minimalen Vorlauftemperatur aus dem Sorptionsspeicher von 32°C. Dies ist eine Erhöhung um das 1,8-2,2-fache gegenüber der Energiedichte von Wasser (67 kWh/m<sup>3</sup> und  $\Delta T=58K$ ). Der Sorptionsspeicher der Testanlage benötigte also ca. die Hälfte im Speichervolumen um den gleichen Energieoutput zu liefern wie der 1 m<sup>3</sup> Wasserspeicher. Bei Beladungsgrößen von kleiner als 10 % Wasserinhalt in der Desorptionsphase war eine mittlere Temperatur im Silikagel von 80-90°C notwendig. Hier musste die Solaranlage über eine lange Zeit hohe Temperaturen (>90°C) liefern und die Niedertemperatursenke für die Kondensation musste eine Rücklauftemperatur von weniger als 20°C liefern.

Mit den Erfahrungen vom Projekt HYDES war es erwünscht, weitere Testläufe bei optimierter Betriebsweise und unter realen Bedingungen durchzuführen. Die theoretische Energiedichte der Paarung Silikagel und Wasser ist etwa 150 kWh/m<sup>3</sup>. Ziel des folgenden EU-Projektes MODESTORE war unter anderem, zu klären, wie weit dieser theoretische Wert unter realen Einsatzbedingungen erreicht werden kann.

## 5.2 Vorarbeiten im EU-Projekt MODESTORE

Im Rahmen des EU-Projektes MODESTORE (Wagner et al., 2006) wurde ein Sorptionsspeicher der zweiten Generation entwickelt, bei dem Kondensator und Verdampfer nicht mehr, wie beim Vorgängerprojekt HYDES, in einem separaten Behälter untergebracht und nur durch ein Rohr mit dem Silikagelspeicher verbunden sind.

### 5.2.1 Speicherkonzept

Bei diesem Sorptionsspeicher der zweiten Generation sind alle wichtigen Komponenten, wie in Abb. 5 dargestellt, in einem Behälter untergebracht. Das heißt, die beiden Reaktionen (Desorption und Kondensation bzw. Verdampfung und Adsorption) finden auf sehr engem Raum statt. Der Vorteil dieser Konstruktion ist, dass der Dampf nur einen sehr kurzen Weg zwischen den Komponenten zurücklegen muss und zudem der dafür vorhandene Querschnitt sehr groß ist. Das heißt, es gibt praktisch keinen Druckverlust beim Dampftransport.

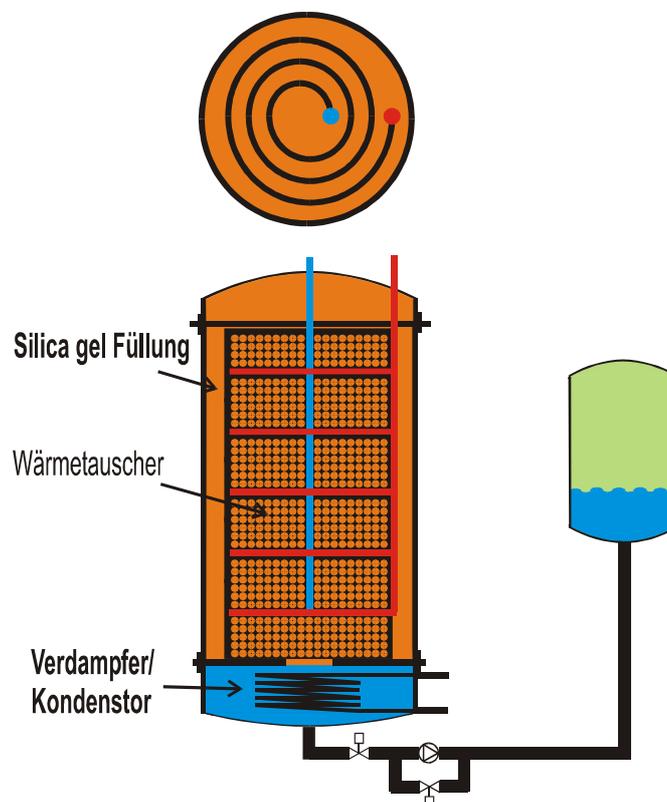


Abb. 5: Prinzipschema des Sorptionsspeichers der zweiten Generation

Bei dieser Konstruktion gibt es nur einen Wärmetauscher, der die Funktionen von Kondensator und Verdampfer erfüllt. Dieser Wärmetauscher ist im unteren Bereich des Speichers angeordnet. Der Wärmetauscher in der Silikagelschüttung wurde neu konstruiert. Er besteht jetzt aus einem gelochten Kupferblech, auf das wie bei einem Solarkollektor Kupferrohre aufgelötet werden. Anschließend wird der Wärmetauscher zu einer Spirale aufgerollt. Diese Konstruktion ist wesentlich einfacher als bei den im HYDES Projekt verwendeten Wärmetauschern. Durch das gelochte Kupferblech wird der Dampftransport durch die Silikagelschicht zudem wesentlich begünstigt und auch der Druckverlust durch den Wärmetauscher ist niedriger.

Die beiden Teile des Speichers sind durch eine Metallplatte mit einem Loch in der Mitte getrennt. Auf dieser Metallplatte liegt die Silikagelschüttung sowie der Wärmetauscher auf. In der Mitte befindet sich ein Dampfkanal mit etwa 20 cm Durchmesser. Dieser dient zur Verteilung des Dampfes über die gesamte Silikagelschüttung. Der Dampfkanal wird durch ein engmaschiges Netz gebildet.



Abb. 6: Blick von oben in den Sorptionsspeicher der zweiten Generation (Dampfkanal in der Mitte und Spiralwärmetauscher mit Silikagel gefüllt)

### 5.2.2 Funktionsweise

Durch die neue Konstruktion hat sich auch die Betriebsweise des Speichers und damit auch die Regelung etwas verändert.

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

Die von der Solaranlage erzeugte Wärmeenergie wird mit Hilfe des im oberen Teil des Speichers befindlichen Spiralrohrwärmetauschers an das Silikagel übertragen und dessen Temperatur steigt. Dadurch steigt der Dampfdruck des adsorbierten Wassers und Wasserdampf wird ausgetrieben. Dieser strömt nun nach unten und wird am Wärmetauscher, der sich im unteren Teil des Speichers befindet, wieder kondensiert, und anschließend über die Zu- und Abflussleitung in einen separaten Behälter gepumpt. Hat das Silikagel im Sorptionsspeicher seine maximale energetische Beladung erreicht, d.h. das Silikagel ist nahezu vollständig ausgetrocknet, bzw. reicht die Vorlauftemperatur der Solaranlage nicht mehr aus, um das Silikagel weiter zu beheizen, so wird dieser Vorgang abgebrochen.

Eine Rückreaktion ist nicht mehr möglich, da das Adsorbens (Wasser) abgeführt wurde und für eine Rückreaktion nicht mehr zu Verfügung steht.

#### **Adsorption (Befeuchten des Silikagels)**

Wenn Heizenergie benötigt wird, wird das Wasser über die Zu- und Abflussleitung in den unteren Teil des Speichers geführt und verdampft dort. Die hier benötigte Verdampfungsenergie wird auf niedrigem Temperaturniveau durch den Kondensator/Verdampferwärmetauscher zugeführt. Ein großer Vorteil gegenüber dem HYDES System ist, dass immer nur eine kleine Wassermenge vom Verdampfer erwärmt werden muss und nicht die gesamte, im Vorratsbehälter befindliche Menge.

Durch den Adsorptionsprozess wird Wärme im Sorptionsspeicher frei. Diese wird über den im oberen Teil befindlichen Spiralwärmetauscher an das Heizungsnetz abgegeben.

### 5.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

#### Desorption

Erste Versuche zeigten, dass Inertgas im Speicher eine Behinderung der Kondensation von Wasserdampf darstellt, wenn der Speicher nicht ganz evakuiert ist, da durch die nötige Diffusion des Wasserdampfs durch das Inertgas hohe Wasserdampfdruckdifferenzen zwischen Sorptionsspeicher und Kondensator zu einer Effizienzminderung führen. Die erhöhte Wasserdampfdruckdifferenz bedeutet, dass eine größere Differenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke notwendig ist. Eine korrekt durchgeführte Evakuierung ist also wichtig für eine korrekt funktionierende Anlage.

Die Desorptionsversuche haben gezeigt, dass ein niedriger Wassergehalt im Silikagel erreicht werden kann, wenn große Temperaturunterschiede zwischen der kalten und der warmen Seite vorhanden sind. Desorptionstests mit relativ hohen Kondensationstemperaturen (38°C) haben gezeigt, dass auch mit diesen Temperaturen ein Wassergehalt von 4% erreicht werden kann. Dies zeigt sich als besonders interessant, da Rücklauftemperaturen einer Niedertemperaturheizung sogar noch niedriger als 38°C liegen: Man könnte also eine Niedertemperaturheizung als Wärmesenke verwenden.

Wenn keine andere Wärmesenke im System vorhanden ist, können die Kollektoren nachts als Wärmesenke dienen. Dafür wird ein alternierender Betrieb gefahren. Hier würde das Silikagel während des Tages von der Sonne sensibel aufgewärmt und der Kondensator in der Nacht über die Kollektoren abgekühlt. Ein solcher Betrieb wurde an der Laboranlage mit Erfolg simuliert.

Bei einer Umsetzung dieser Anlage in einem Einfamilienhaus ist die kritische Frage, bei der Desorption eine passende Wärmesenke zu finden. Die Solaranlage liefert ausreichend hohe Temperaturen, mindestens 90°C, im Sommer und während sonnigen Perioden im Winter. Es gibt für die Wärmesenke mehrere Optionen:

- Der untere Teil eines Brauchwasserspeichers, eines Standardwasserspeichers oder eines Kombispeichers kann verwendet werden. Um einen Brauchwasserspeicher als Wärmesenke verwenden zu können, muss ein kontinuierlicher Verbrauch vorhanden sein. Es wird dann problematisch, wenn sehr wenig Wasserverbrauch herrscht oder während Perioden, wenn das Haus unbewohnt ist (Urlaub).
- Die Solarkollekten können während der Nacht als Wärmesenke verwendet werden. Dafür steht aber nur die im Sorptionsspeicher sensibel gespeicherte Wärme des Vortages zur Verfügung.
- Ein Niedrigtemperaturheizsystem kann als Wärmesenke verwendet werden, wenn das System ganz entladen ist und ein konventioneller Kessel als Zusatzheizung eingesetzt ist. Ist das der Fall, würde der konventionelle Kessel den Adsorber aufheizen und die Kondensationswärme würde als Raumheizung eingesetzt werden.

#### Adsorption

Die Regelung der Adsorption war bei diesem Prototyp komplizierter als bei der Anlage der ersten Generation im Projekt HYDES (beschrieben im Kapitel 5.1). Grund dafür ist das

fehlende Ventil zwischen dem Verdampfer und dem Silikagel. Damit kann die Menge des absorbierten Wasserdampfs nur reguliert werden, in dem weniger oder mehr Wasser in den Verdampferraum hineingelassen wird und/oder durch mehr oder weniger Heizen des Verdampfers.

Bei einer Umsetzung dieser Anlage in einem realen Heizsystem können die Vorlauftemperaturen nicht beliebig eingestellt werden, sondern sind abhängig von den Temperaturen, die gerade in der Solaranlage oder im Energiespeicher vorhanden sind. Die Adsorbentemperaturen konnten mit taktendem Betrieb des Verdampfers gut eingeregelt werden. Wenn der Wassergehalt des Silikagels niedrig war, kam es häufiger außerhalb des Wärmetauschers zu Vereisung. Dies wurde durch Geräusche innerhalb des Wärmetauschers festgestellt, wenn Eiskristalle die Lamellen des Wärmetauschers berührten. Außer dem Geräusch führte die Eisbildung zu keinen Problemen während des Betriebes. Das Eis schmolz wieder im weiteren Verlauf.

Ein ernsthaftes Vereisungsproblem gab unter extremen Betriebsbedingungen. Bei sehr trockenem Silikagel und einer sehr schnellen Auskühlung des Speichers kann der Verdampfer von innen einfrieren, wenn eine Wassermenge unten im Behälter stehen geblieben ist, die mit der Abkühlung des Speichers verdampft. Aufgrund dieser Probleme wurde die Pilotanlage im vorliegenden Projekt mit kleinen Änderungen gegenüber dem Prototypen der zweiten Generation umgesetzt.

Die Zusammenfassung einer detaillierten Analyse der Wärmetauscher der Prototypenanlage der zweiten Generation ist wie folgt:

- Kondensator: Es muss darauf geachtet werden, dass nicht zu viele Rohre parallel geschaltet werden. Dann entsteht laminare Strömung und damit ein schlechterer Wärmeübergang.
- Verdampfer: Messungen des  $k_A$ -Werts des Wärmetauschers zeigten, dass der  $k_A$ -Wert stark vom Wasserniveau außerhalb des Wärmetauschers abhängig ist. Die besten Werte werden erreicht, wenn das Niveau knapp unter dem obersten Rand vom Wärmetauscher ist. Der Wert sinkt bedeutend ab, wenn das Wasser den Wärmetauscher mit einer Schicht bedeckt. Bei zukünftigem Design des Wärmetauschers sollte dessen Form so breit und flach wie möglich sein. Der Grund dafür ist, dass die Verdampfung direkt an der Wasseroberfläche stattfindet. Daher sollte der Abstand zwischen Wasseroberfläche und Wärmetauscher möglichst klein sein. Eine Konstruktion, wie sie im HYDES Projekt verwendet wurde, wo die gesamte vorrätige Wassermenge über dem Verdampferwärmetauscher war, ist also sehr ungünstig.
- Sorptionswärmetauscher: Im Allgemeinen hat der Wärmetauscher gut funktioniert. Der Wärmeübergang könnte aber zwischen den Rohren und dem Kupferblech deutlich erhöht werden, wenn die Rohre in ihrer ganzen Länge auf das Blech gelötet werden. Zur Vereinfachung der Produktion war bei diesem Prototypen die Verlotung nur abschnittsweise erfolgt. Der Abstand zwischen den Spirallagen des Wärmetauschers sollte reduziert werden, um die Temperaturunterschiede innerhalb des Silikagels, die im Raum zwischen zwei Kupferblechen auftreten, zu verringern. Das Verhältnis zwischen der Dicke des Kupferbleches und dem Abstand der Rohre ist ein wichtiger Parameter und konnte theoretisch abgeschätzt werden. Die bei diesem Prototypen gewählte Größenordnung der Parameter hat gute Ergebnisse gebracht.

### 5.3 Umsetzung des Konzeptes in einer Pilotanlage

Im vorliegenden Haus der Zukunft Projekt MODESTORE wurde der im EU-Projekt MODESTORE entwickelte Sorptionsspeicher der zweiten Generation vom Laborgerät für den Einsatz in einer Pilotanlage in einem realen Einfamilienhaus mit Niedertemperaturheizsystem hochskaliert. Dafür wurden die Wärmetauscher sowie alle anderen Komponenten des Systems entsprechend der größeren Dimensionen der Pilotanlage ausgelegt. Um eine Vereisung des Verdampfers auszuschließen, wurde der Verdampfer/Kondensator in einen separaten Behälter verlegt, der konstruktiv mit dem Vorratsbehälter kombiniert ist. Dadurch konnte ein Ventil zwischen Silikagel und Verdampfer installiert werden, der Vorteil des wenigen Wassers im Verdampfererraum jedoch beibehalten werden.

Für die Pilotanlage wurde ein Systemkonzept, das die Wärmequellen (Solaranlage, Nachheizung), die Wärmesenken (Warmwasserbereitung, Niedertemperaturheizung) und die Speicher (Sorptionsspeicher, Pufferspeicher (Wasser) als Niedertemperaturspeicher im Winter) umfasst, entwickelt. Für den Betrieb der Pilotanlage wurde außerdem eine frei programmierbare Regelung entworfen, mit der der Normalbetrieb im Einfamilienhaus sowie spezielle Testsequenzen zur Optimierung des Speichermanagements gefahren wurde.

Der Speicher wurde so ausgelegt, dass ein Großteil des Heizenergiebedarfs solar gedeckt werden konnte. Als Nachheizung stand zusätzlich ein Pelletskaminofen zur Verfügung. Für das Upscaling wurden alle Komponenten insbesondere der Wärmetauscher in der Silikagelschüttung und der Wärmetauscher, der als Verdampfer/Kondensator dient, entsprechend ausgelegt und gefertigt. Bei der Auslegung wurden die Erfahrungen aus dem vorangegangenen EU-Projekt berücksichtigt.

#### 5.3.1 Konzept der Pilotanlage in Kombination mit einer Solaranlage

Der Sorptionsspeicher vom EU-Projekte MODESTORE wurde für die Pilotanlage auf Grund der Erfahrungen im vorangegangenen Projekt adaptiert (siehe Kapitel 5.2.3). Abb. 7 zeigt das Konzept für die Pilotanlage.

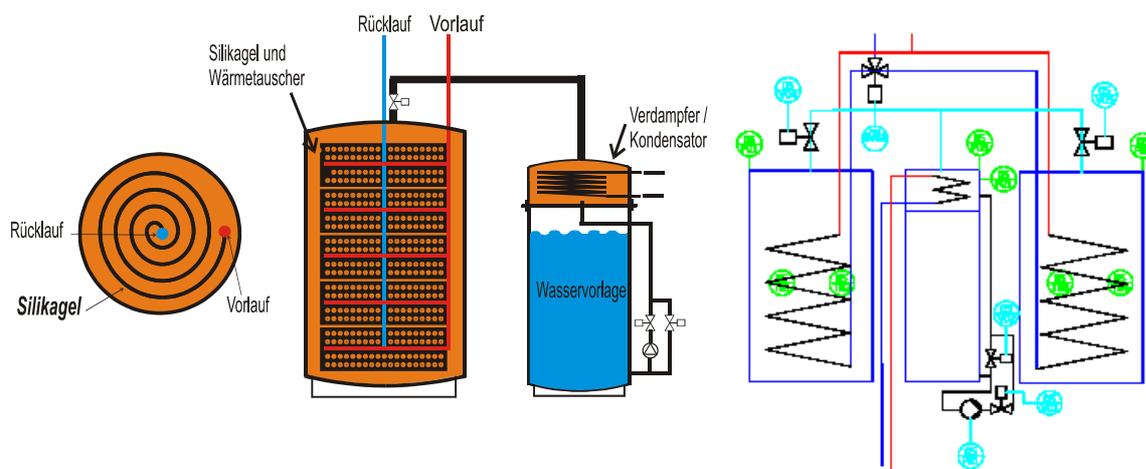


Abb. 7: Das Konzept des Sorptionsspeichers bei der Pilotanlage

Es wurden zwei Sorptionsspeicher mit je ca. 500 kg Silikagel und ein weiterer Behälter, der den Verdampfer/Kondensator-Wärmetauscher sowie den Wasservorrat enthält, installiert.

Zwischen dem Verdampfer/Kondensator-Bereich und dem Sorptionsspeicher gibt es eine Dampfleitung mit je einem Ventil zu den beiden Sorptionsspeichern. Einfrieren kann damit verhindert werden, indem das Ventil zugemacht wird. Mit der Pumpengruppe mit einem Bypassventil kann Wasser vom Wasservorrat zum Verdampfer gepumpt werden. Wenn genug Wasserdampf im Verdampfer vorhanden ist, wird auch das Ventil zu einem der beiden Sorptionsspeicher geöffnet und die Adsorption beginnt. Während des Kondensationsvorgangs, wird das Bypassventil geöffnet und das Kondensat kann direkt in den Vorratsbehälter abfließen.

Der Verdampfer/Kondensator-Wärmetauscher wurde so ausgelegt, dass in den Rohren immer turbulente Strömung herrscht.

Die Kupferbleche wurden enger gerollt, diesmal mit einem Abstand von ca. 4 cm statt ca. 5 cm bei der alten Anlage. Weiters wurden die Rohre in ihrer ganzen Länge auf das Kupferblech gelötet, um den Wärmeübergang zwischen den Rohren und dem Blech zu verbessern.

### 5.3.2 Bau der Pilotanlage

Die beiden Sorptionsspeicher für die Pilotanlage wurden von der Firma Behältertechnik Pink GesmbH gebaut. Der Wärmetauscher wurde „enger“ gerollt, d.h. die Abstände zwischen den Kupferblechen waren kleiner als im Vorprojekt. Die Rohre wurden in einem Lötöfen, wie er auch bei der Produktion von Solarkollektoren verwendet wird, auf ihrer ganzen Länge auf das Kupferblech gelötet, um einen besseren Wärmeübergang zu schaffen, siehe Abb. 8. Der Vorratsbehälter ist in zwei „Abteilungen“ aufgeteilt: Oben ist der Verdampfer/Kondensator - Wärmetauschers befestigt, und unten ist das Wasser für die Absorption- und Desorption gespeichert. Die beiden Teile sind durch ein eingeschweißtes Blech voneinander getrennt. In Abb. 9 ist der Schweißbrand auf dem Behälter zu erkennen, wo die Aufteilung verläuft.



Abb. 8: Anfertigung des Sorptionswärmetauschers bei der Firma „Behältertechnik Pink GesmbH“, Rohre werden ganzseitig in einem Lötöfen gelötet (links) und nachher eng zusammengerollt und auf Dichtheit getestet (rechts).



Abb. 9: Der Wasservorratsbehälter

Alle Komponenten (Speicher, Wärmetauscher, Pumpengruppe) wurden mit einem Heliumlecktest auf Vakuumdichtheit überprüft. Alle Tests wurden im ersten Versuch bestanden, so dass keine Nacharbeiten notwendig waren.

## 6 Systemkonzept für die Pilotanlage

### 6.1 Auswahl des Einfamilienhauses

Im Sommer 2005 wurde die Pilotanlage in einem Einfamilienhaus in Haag am Hausruck in Oberösterreich installiert, siehe Abb. 10. Der konventionelle Teil des Systems besteht aus 32,5 m<sup>2</sup> Flachkollektoren, die zum Teil im Balkongeländer (12,5 m<sup>2</sup>) und zum Teil auf dem Dach (20 m<sup>2</sup>) installiert sind und einem Pufferspeicher mit 900 Litern. Für die Warmwasserbereitung gibt es einen separaten Warmwasserboiler.

Dazu kommen dann die beiden Sorptionsspeicher sowie der Behälter, der den Wasservorrat und den Verdampfer/Kondensator enthält.



Abb. 10: Das Haus der Pilotanlage mit Dach- und Balkonkollektoren.

Das Haus wurde nach Niedrigenergiebauweise gebaut. Das Wärmeabgabesystem funktioniert mittels Niedertemperatur-Fußbodenheizung. Die Nachheizung wird durch ein Pelletswohnraumgerät gewährleistet. Im Haushalt leben zwei Personen.

### 6.2 Hydraulikkonzept

Abb. 11 zeigt das Hydraulikschema der Pilotanlage mit der Solaranlage, zwei Sorptionsspeichern, Pufferspeicher, Brauchwarmwasserspeicher, Wärmeabgabesystem und Pelletswohnraumgerät.

Die Systemhydraulik wurde so geplant, dass eine Reihe von verschiedenen Wärmequellen und Wärmesenken über den Verteilerbalken in der Mitte angesteuert werden kann.

Im Folgenden werden jetzt die verschiedenen Schaltungsmöglichkeiten mit den jeweiligen Ventilstellungen beschrieben. Die Bezeichnungen der Ventile beziehen sich dabei auf die in Abb. 11 verwendeten Bezeichnungen.



Die Energie von der **Solaranlage** kann in die beiden Sorptionsspeicher (Ventil „VE\_SG“, „VE\_SORBI\_1“ oder „VE\_SORBI\_2“, „VE\_SG\_3W“, „VE\_VERT\_1“ und „VE\_SOLAR\_SEK“ sind offen), in den Warmwasserbehälter (Ventil „VE\_BOILER\_RL“ und „VE\_SOLAR\_SEK“ sind offen) oder in den Pufferspeicher (Ventil „VE\_PUFFER\_VL“, „VE\_PUFFER\_RL“ und „VE\_SOLAR\_SEK“ sind offen) eingebracht werden. Eine Zusatzfunktion für die Solaranlage ist die Nachtkühlung, wo die Solaranlage als Wärmesenke fungiert. Hierfür kann der Solarkreis direkt mit dem Kondensatorwärmetauscher verbunden werden (Ventile „VE\_SOLAR\_SEK“, „VE\_VERT\_1“, „VE\_VERT\_2“, „VE\_VK\_VERT“ und „VE\_VK“ sind offen).

Wärme kann in den **Heizkreis** aus drei Quellen eingespeist werden. Primär wird aus dem Pufferspeicher geheizt. In diesem Fall ist das 3-Wegeventil „VE\_VK\_3W“ so eingestellt, dass die Temperatur aus dem oberen Pufferbereich geholt wird. Das Ventil „VE\_VK\_VERT“ ist offen.

Die zweite Möglichkeit zu heizen ist direkt aus dem Sorptionsspeicher. Dies ist im Adsorptionsbetrieb der Fall. Hier wird das 3-Wegeventil „VE\_VK\_3W“ so geschaltet, dass hohe Temperaturen vom Pufferspeicher (von ganz oben) für die Verdampfung geholt werden. Die Ventile „VE\_VK“, „VE\_SG“ und „VE\_VERT\_2“ sind offen. Das 3-Wegeventil „VE\_SG\_3W“ kann auf den einen oder anderen Sorptionsspeicher eingestellt werden.

Die dritte Variante für die Heizung ist es, direkt mit dem Pelletskessel heizen. In diesem Fall ist das Ventil „VE\_VERT\_2“ offen.

Wenn die Heizung mittels Pelletskessel oder Pufferspeicher erfolgt und Solarenergie vorhanden ist, kann die Solaranlage gleichzeitig in den Pufferspeicher einspeisen. Dies ist mittels der Parallelstrategie der Hydraulik möglich. Die Ventile „VE\_PUFFER\_VL“ und „VE\_SOLAR\_SEK“ sind bei solarer Einspeisung in den Puffer offen.

Bei der Desorption des Sorptionsspeichers kann das Kondensat mittels Nachtkühlung über die Solaranlage oder bei vorhandenen niedrigen Temperaturen im Pufferspeicher über diesen gekühlt werden. Dazu wird das 3-Wegeventil „VE\_VK\_3W“ so eingestellt, dass Wasser aus dem kälteren unteren Speicherbereich zum Kondensator geführt wird.

Der **Brauchwarmwasserspeicher** kann von der Solaranlage (die Ventile „VE\_SOLAR\_SEK“ und „VE\_BOILER\_RL“ sind offen) oder vom Pelletskessel (die Ventile „VE\_BOILER\_RL“ und „VE\_VERT\_1“ sind offen) beheizt.

### 6.3 Messtechnik

Zur genauen Analyse des Pilotbetriebs wurde eine große Zahl von Betriebsparametern aufgezeichnet. Diese sind in

Tabelle 1 zusammengefasst. Zunächst wurden die Klimadaten mit Außentemperatur und Globalstrahlung sowie die Temperatur im Wohnraum erfasst. In allen hydraulischen Kreisen wurde die Wärmemenge sowie Durchfluss mit Vor- und Rücklauftemperaturen aufgezeichnet. In allen Speichern befinden sich 2 oder 3 Temperatursensoren. In jedem Sorptionsspeicher gibt es zusätzlich einen Drucksensor, der zur Berechnung des Beladezustands des Speichers dient. Auch im Kondensator/Verdampfer-Bereich gibt es einen Drucksensor sowie einen Füllstandssensor, der anzeigt, wenn die maximale Füllhöhe für den Verdampfungsbetrieb erreicht ist.

Zusätzlich wurde aufgezeichnet, welche Ventile jeweils geöffnet waren. Dies vereinfacht die Analyse der jeweiligen Betriebszustände erheblich.

Tabelle 1: Liste der Messstellen

Messgerät	Messgröße	Bezeichnung	Gerätetyp	Genauigkeit
<b>Klima</b>				
Pyranometer	Strahlung	Pyranometer	SSR81	+/- 8%
Temperaturfühler	Außentemp	T_Aussen	PT1000	1/3 DIN B
Raumtemperatur	Raumtemperatur	T_Raum	PT1000	1/3 DIN B
<b>Solarkreis</b>				
Temperaturfühler	Kollektortemp Dach		PT1000	1/3 DIN B
Temperaturfühler	Kollektortemp Balkon		PT1000	1/3 DIN B
Temperaturfühler	Solar-VL pri Dach	T_VL_Koll_2_Dach	PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Solar-VL pri Balkon		PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Solar-RL pri	T_RL_Solar_Pri	PT1000	DIN A
Volumsstrom	Volumsstrom Koll1		Ista Sensonic	+/- 3%
WMZ	Energie Koll1			+/- 8%
Volumsstrom	Volumsstrom Koll2		Ista Sensonic	+/- 3%
WMZ	Energie Koll2			+/- 8%
Temperaturfühler	Solar-VL sek		PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Solar-RL sek		PT1000	DIN A
Volumsstrom	Volumsstrom Solar sek		Ista Sensonic	+/- 3%
WMZ	Energie Solar			+/- 8%
<b>Boilerkreis</b>				
Temperaturfühler	Boilertemp oben	T_Boiler_oben	PT1000	1/3 DIN B
Temperaturfühler	Boilertemp unten	T_boiler_unten	PT1000	1/3 DIN B
Temperaturfühler	Boiler-VL		PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Boiler-RL		PT1000	DIN A
Volumsstrom	Volumsstrom Boiler		Ista Sensonic	+/- 3%
WMZ	Energie Boiler			+/- 8%
<b>Pufferkreis</b>				
Temperaturfühler	Puffertemp oben	T_Puffer_oben	PT1000	1/3 DIN B
Temperaturfühler	Puffertemp Mitte	T_Puffer_mitte	PT1000	1/3 DIN B
Temperaturfühler	Puffertemp unten	T_Puffer_unten	PT1000	1/3 DIN B
Temperaturfühler	Puffer-VL		PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Puffer-RL		PT1000	DIN A
Volumsstrom	Volumsstrom Puffer		Ista Sensonic	+/- 3%
WMZ	Energie Puffer			+/- 8%
<b>Kesselkreis</b>				
Temperaturfühler	Kesseltemp		PT1000	1/3 DIN B
Temperaturfühler	Kessel-VL		PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Kessel-RL		PT1000	DIN A
Volumsstrom	Volumsstrom Kessel		Ista Sensonic	+/- 3%
WMZ	Energie Kesselkreis			+/- 8%
<b>Sorptionsspeicher</b>				
Drucksensor	Sorbidruck		E+H PMC 131	+/- 2mbar
Drucksensor	Sorbidruck		E+H PMC 131	+/- 2mbar
Temperaturfühler	Sorptionsspeicher 1/Fühler1	T_Sorbi_11	PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Sorptionsspeicher 1/Fühler2	T_Sorbi_12	PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Sorptionsspeicher 2/Fühler1	T_Sorbi_21	PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Sorptionsspeicher 2/Fühler2	T_Sorbi_22	PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Sorbi-VL-Silikagel	T_VL_SG	PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Sorbi-RL-Silikagel	T_RL_SG	PT1000	DIN A
Volumsstrom	Volumsstrom Silikagel		Ista Sensonic	+/- 3%
WMZ	Energie Silikagel	WMZ_SG		+/- 8%
Temperaturfühler	Sorbi-VL-Verd/Kond	T_VL_VK	PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Sorbi-RL-Verd/Kond	T_RL_VK	PT1000	DIN A
Volumsstrom	Volumsstrom Verd/Kond		Ista Sensonic	+/- 3%
WMZ	Energie Verd/Kond	WMZ_VK		+/- 8%
Drucksensor	Wassertankdruck		E+H PMC41	+/- 0,1mbar
Füllstandssensor	Füllstand		E+H Schwinggabel	
<b>Heizkreis</b>				
Temperaturfühler	Heizkreis VL vor Mischer	T_VL_HZ	PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Heizkreis VL nach Mischer	T_HZ_nach_Mischer	PT1000	DIN A
Temperaturfühler	Heizkreis RL	T_RL_HZ	PT1000	DIN A
Volumsstrom	Volumsstrom Heizkreis		Ista Sensonic	+/- 3%
WMZ	Energie Heizkreis	WMZ_HZ		+/- 8%

Die Daten wurden zunächst als 15 min-Mittelwerte aufgezeichnet. Im Verlauf des Messphases wurde dann auf 5 min-Mittelwerte umgestellt, um die Schaltzustände der Regelung besser erfassen zu können.

## 6.4 Inbetriebnahme

Die beiden Sorptionsspeicher wurden zum Einfamilienhaus in Haag geliefert und vor Ort mit Silikagel befüllt. Es war nicht möglich, die Speicher schon befüllt anzuliefern, da sie sonst für den Transport zu schwer gewesen wären. Anschließend wurden die Speicher evakuiert. Wasser wurde in den Vorratsbehälter gefüllt und auch dieser Bereich inklusive dem Vereilrohr für den Dampf evakuiert. Nach der Inbetriebnahme und ersten Messungen wurde festgestellt, dass die Speicher nicht ausreichend evakuiert waren. Darum wurde der Evakuervorgang noch einmal wiederholt. Im weiteren Verlauf der Testphase (1 Jahr) musste dann nicht noch einmal nachevakuiert werden. Die Dichtheit des Systems konnte damit unter Beweis gestellt werden.



Abb. 12: Installation der Pilotanlage (Anlieferung der Speicher (links oben), Dampfventil an einem Sorptionsspeicher (rechts oben), Sorptionsspeicher, Pufferspeicher und Vorratsbehälter (links unten), Installation der Hydraulikkreise (rechts unten))

## 7 Betriebserfahrungen mit der Pilotanlage

Im Folgenden werden die mit der Pilotanlage gemachten Betriebserfahrungen zusammengefasst. Der erste Teil beschreibt den Desorptionsbetrieb – die Beladung des Speichers, der zweite Teil beschäftigt sich mit der Entladung also der Adsorption.

### 7.1 Desorptionsbetrieb

Die Desorption des Speichers findet bei einem saisonalen Speicher in den Sommermonaten statt. Für die Desorption muss neben der Energiequelle (Solarenergie) auch eine Wärmesenke zur Verfügung stehen. Während der Messperiode wurden verschiedene Möglichkeiten getestet, die im Folgenden beschrieben werden. Der Pufferspeicher kann als Wärmesenke dienen, solange er kalt genug ist. Nachts können die Kollektoren als Wärmesenke fungieren. Als weitere Möglichkeit wurde der Heizkreis als Wärmesenke getestet. Auch während der Wintermonate kann in sonnigen Perioden Desorption stattfinden.

#### 7.1.1 Regelungsstrategie

Während der Sommermonate wird, wenn die Solaranlage den Warmwasserboiler bis zu einer vorgegebenen Temperatur erwärmt hat, einer der beiden Sorptionsspeicher solar beheizt. Die schwierigste Regelaufgabe ist es nun zu entscheiden, ob eine Temperatursenke zur Verfügung steht, die kalt genug ist, um Desorption zu ermöglichen. Dies wird mithilfe der Druckdifferenz zwischen Sorptionsspeicher und potentieller Wärmesenke ermittelt. Wenn der Dampfdruck, den die Wärmesenke am Kondensator erzeugen kann niedriger ist als der Druck im Sorptionsspeicher, findet Desorption statt.

In den beiden Sorptionsspeichern wird der aktuelle Druck direkt gemessen. Der potentielle Druck am Kondensator wird über den Satttdampfdruck bei der Temperatur der zur Verfügung stehenden Wärmesenken errechnet.

Bei Kondensation in den Pufferspeicher wurde die unterste Speichertemperatur verwendet, da diese direkt in den Kondensator geleitet werden kann. Bei Kondensation über die Kollektoren wurde die Kollektortemperatur verwendet.

Wenn der erste Sorptionsspeicher soweit erwärmt ist, dass die Solaranlage ihn nicht weiter beheizen kann oder wenn er eine vorgegebene Temperatur erreicht hat, wird der andere Sorptionsspeicher solar beheizt.

Auch in den Wintermonaten kann Desorption stattfinden, wenn genug Solarenergie zur Verfügung steht. In diesem Fall werden erst Boiler und Pufferspeicher solar erwärmt. Wenn der Pufferspeicher oben 45°C erreicht hat, wird in den Desorptionsbetrieb, wie oben beschrieben, umgeschaltet. Ab 15:00 Uhr (später wurde auf 13:00 Uhr umgestellt) wird der Pufferspeicher wiederum solar beheizt, um möglicherweise niedrigere Kollektortemperaturen am Nachmittag noch nutzen zu können, wenn die Sorptionsspeicher schon zu warm sind.

Die beiden Kollektorfelder (Balkon und Dach) haben jeweils eine eigene Primärpumpe. Sie können also getrennt geregelt werden. Wenn in einem Kollektorfeld die Temperatur nicht ausreicht, um den aktuell zu beladenden Speicher zu erwärmen, wird dieser Kreis abgeschaltet.

### 7.1.2 Kondensationsprozess

Während der Kondensation wird das Bypassventil zur Zahnrادpumpe geöffnet, so dass das kondensierte Wasser sofort nach unten in den Vorratsbehälter abfließen kann. Das bedeutet, dass der Kondensator nicht im Wasser steht sondern von Wasserdampf umgeben ist. Abb. 13 zeigt einen Kondensationsvorgang mit zu Beginn etwa 3 kW übertragener Leistung (WMZ\_VK). Die Leistung nimmt dann mit steigender Temperatur der Wärmesenke ab. In der Abbildung sind Vor- und Rücklaufemperatur des Kondensatorwärmetauschers dargestellt ( $T_{VL\_VK}$ ,  $T_{RL\_VK}$ ), wobei der Vorlauf hier die kalte, von der Wärmesenke (hier Pufferspeicher) kommende Seite ist. Zusätzlich ist in blau die Satttdampfemperatur dargestellt, die über den im Kondensatorbehälter gemessenen Druck berechnet wurde ( $T_{sattdampf\_pWasser}$ ). Diese Satttdampfemperatur liegt während der Kondensationsphase fast auf der Rücklaufemperatur des Kondensators. Wie in Abb. 13 zu erkennen ist, liegt die Rücklaufemperatur sogar knapp über der Satttdampfemperatur. Dies ist mit Ungenauigkeiten in der Temperatur- oder Druckmessung zu erklären. Normalerweise kann die Austrittstemperatur aus dem Wärmetauscher nicht über der Temperatur des umgebenden Dampfes liegen. Dass die beiden Temperaturen aber sehr eng beieinander liegen zeigt, dass ein sehr guter Wärmeübergang zwischen Dampfphase und Wärmetauscher vorliegt.

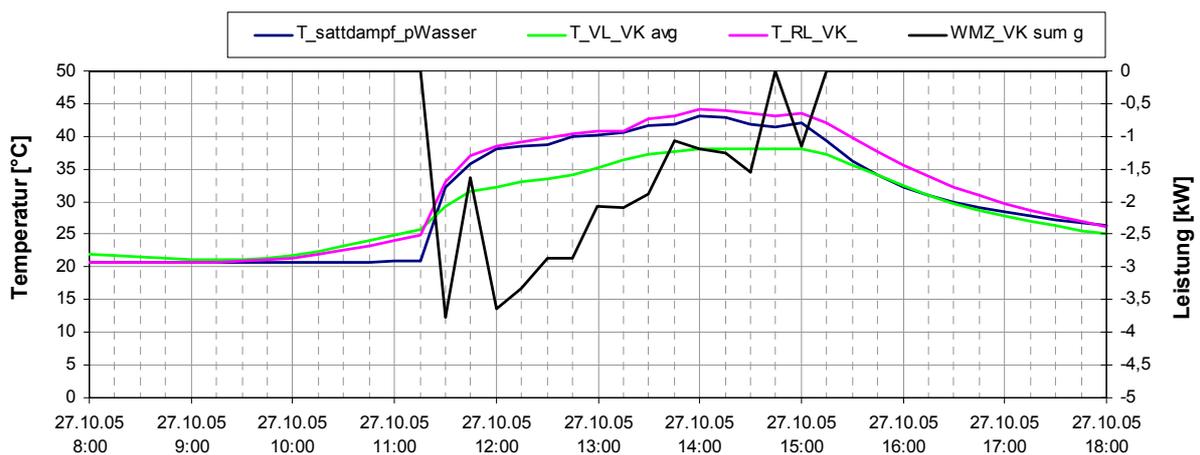


Abb. 13: Temperaturen und übertragene Leistung bei der Kondensation

### 7.1.3 Kondensation in den Pufferspeicher

In der folgenden Abb. 14 sind die zu der oben gezeigten Kondensation gehörenden Puffertemperaturen dargestellt. Ab etwa 10 Uhr morgens wird der Sorptionsspeicher Nr. 1 solar beheizt. Der Pufferspeicher hat unten eine Temperatur von 30°C. Um etwa 11:15 Uhr erreicht der Sorptionsspeicher eine Temperatur von knapp 63°C und die Kondensation setzt ein. Zunächst sinkt die oberste Temperatur im Pufferspeicher leicht ab. Danach steigen die Temperaturen im Pufferspeicher. Die Temperatur im Sorptionsspeicher steigt immer noch an aber weniger steil als vorher. Offenbar liefert der Kollektor mehr Energie in den Speicher als durch die Kondensation abgeführt werden kann.

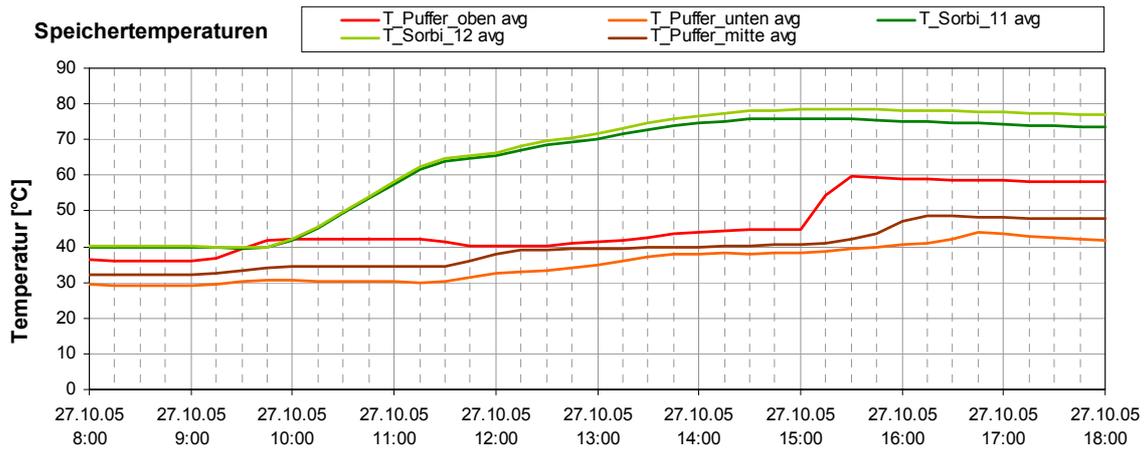


Abb. 14: Speichertemperaturen während der Kondensation in den Pufferspeicher

Um 15 Uhr schaltet die Regelung wieder auf Beheizung des Puffers durch die Solaranlage, um sicherzustellen, dass genug Wärme für die Warmwasserbereitung zur Verfügung steht.

Solange der Pufferspeicher unten kalt genug ist, ist dies eine sehr gute Möglichkeit die Kondensationsenergie abzuführen, sie aber gleichzeitig im System zu halten. Der Pufferspeicher wird durch die Kondensation vorgewärmt.

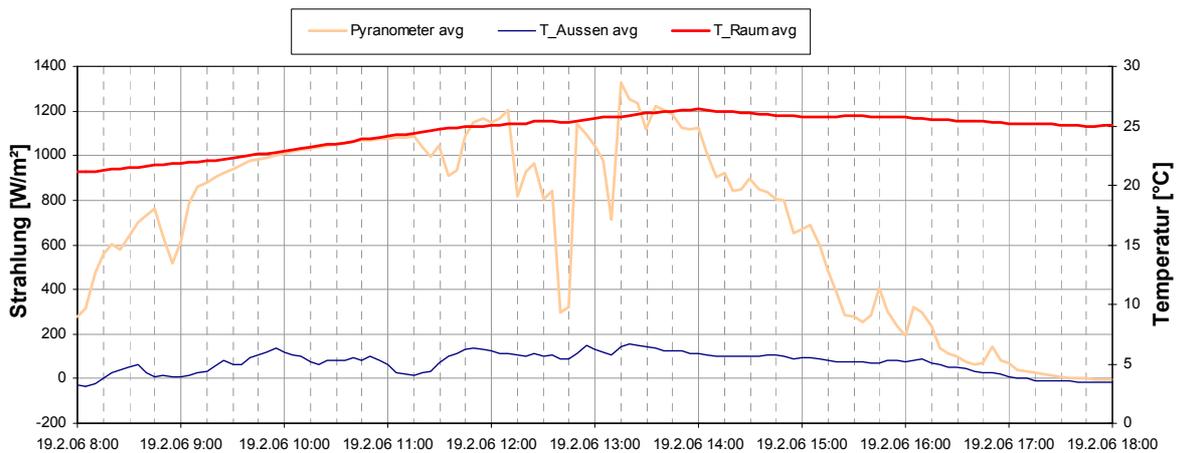


Abb. 15: Strahlung, Außen- und Raumtemperatur an einem Tag im Februar

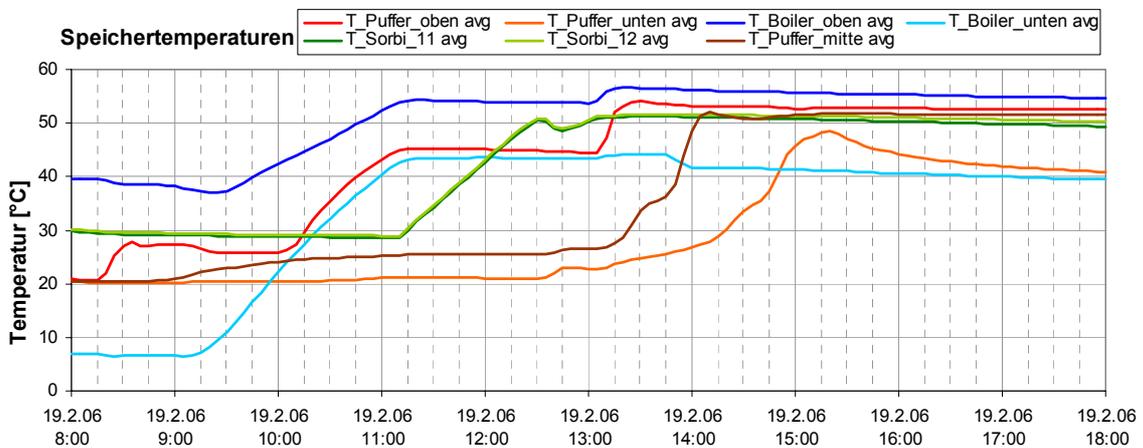


Abb. 16: Speichertemperaturen an einem Tag im Februar

Abb. 15 und Abb. 16 zeigen beispielhaft einen Tag im Februar 2006. Der Tag war sehr sonnig mit einem kurzen Einbruch kurz nach Mittag. Man sieht, dass zuerst Boiler und Puffer solar beladen werden. Wenn der Puffer oben 45°C erreicht, wird auf den Sorptionsspeicher Nr. 1 umgeschaltet. Zu diesem Zeitpunkt hat der Puffer unten immer noch nur knapp über 20°C. Da der Tag sehr sonnig war, hat der Kollektor sehr schnell hohe Temperaturen erreicht, so dass der Pufferspeicher unten kalt bleibt und der Solarertrag oben eingeschichtet wird. Dies ist ideal für die anschließende Kondensation in den Pufferspeicher. An einem nur mittelmäßig sonnigen Tag sieht die Situation nicht so gut aus. Allerdings wird an einem solchen Tag auch die Solarenergie nicht zum Desorbieren reichen. In dem gezeigten Beispiel setzt die Kondensation kurz ein. Direkt danach gibt es allerdings den schon erwähnten Einbruch in der Solarstrahlung und die Desorption wird wieder gestoppt. Immerhin gab es aber einen kurzen Leistungspeak von knapp 6 kW am Kondensator. Kurz darauf wird dann auch schon wieder auf Beheizung des Puffers zurückgeschaltet. Eine weitere Kondensation erfolgte dann erst wieder über die Nachtkühlung (siehe nächster Abschnitt).

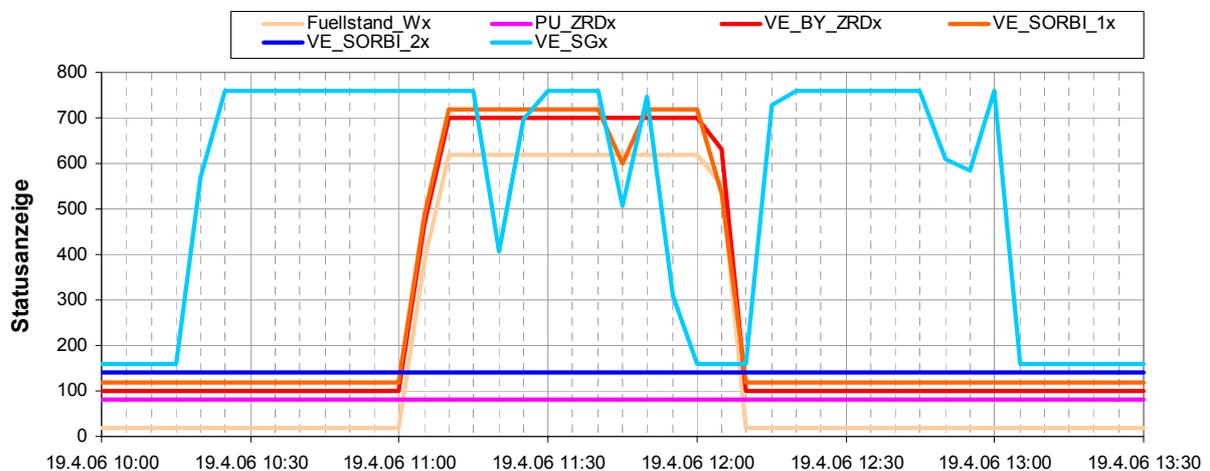


Abb. 17: Ventilschaltungen während eines Desorptionsvorgangs

Abb. 17 zeigt die Ventilschaltungen während eines Desorptionsvorgangs. Auf der y-Achse ist der Schaltzustand dargestellt, wobei 0 bedeutet, dass das Ventil während des gesamten Messzeitschritts von 5 Minuten geschlossen war. 600 bedeutet entsprechend, dass das Ventil immer geöffnet war. Die Kurven sind zur besseren Lesbarkeit in der Höhe leicht versetzt aufgetragen. Die hellblaue Kurve zeigt die Freischaltung des Beladevorgangs für die Sorptionsspeicher an. Ab 10:15 Uhr ist das Ventil zum Adsorberwärmetauscher geöffnet. Ab kurz nach 11:00 Uhr beginnt dann die Kondensation: Das Dampfventil zum Sorptionsspeicher Nr. 1 und der Bypass der Zahnradpumpe werden geöffnet, so dass das kondensierte Wasser in den Vorratsbehälter abfließen kann. Gleichzeitig wird der Füllstandssensor im Kondensatorbereich aktiviert. Er zeigt 600 an, was bei diesem Sensor bedeutet, dass der maximale Füllstand NICHT erreicht ist, wie es auch bei einer Desorption zu erwarten ist. Die Kondensation endet um etwa 12:10 Uhr. Der Sorptionsspeicher wird aber noch bis etwa 13:00 Uhr weiter beheizt, mit kleineren Einbrüchen, die durch Bewölkung zustande kamen.

#### 7.1.4 Kondensation über Kollektor

Nachts können die Kollektoren als Wärmesenke verwendet werden. In diesem Fall werden die Sorptionsspeicher tagsüber sensibel beheizt. Wenn die Temperatur im Pufferspeicher nicht ausreicht, um als Wärmesenke zu dienen, bleiben die Sorptionsspeicher warm. Es findet keine Desorption statt. Nachts kann dann der Kondensator über die Kollektoren gekühlt werden. Sobald der Kondensator eine ausreichend niedrige Temperatur erreicht, beginnt die Kondensation. Damit entsteht eine

Druckdifferenz zwischen Kondensator und Sorptionsspeicher und es wird Wasserdampf desorbiert. Durch die Desorption kühlt der Sorptionsspeicher sukzessive ab, bis die Druckdifferenz nicht mehr zur Desorption ausreicht.

Für diese Nachtkühlfunktion wurden nur die auf dem Dach montierten Kollektoren verwendet, da hier durch die Neigung eine Abstrahlung gegen den Himmel zu erwarten war. Das heißt, es stand eine Absorberfläche von 20 m<sup>2</sup> zur Verfügung. Die mit maßgebliche Strahlungstemperatur des Himmels liegt bei klarem Wetter wesentlich unter der Lufttemperatur.

Die Nachtkühlfunktion war von Mitternacht bis 5 Uhr morgens freigeschaltet. Nur bei Außentemperaturen unter dem Gefrierpunkt war diese Funktion nicht zugelassen, da sonst das Risiko zu groß ist, dass der Sekundärkreis einfriert.

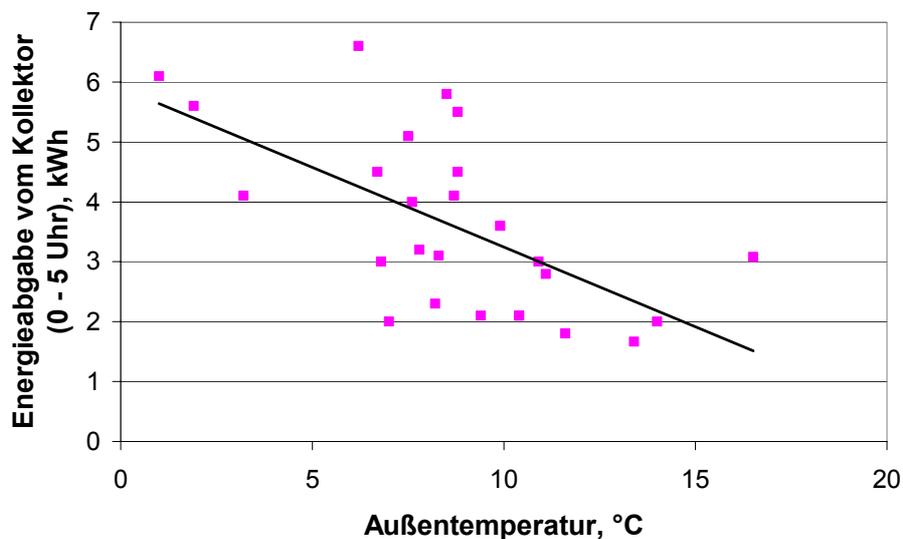


Abb. 18: Vom Kollektor abgegebene Energie pro Nacht in Abhängigkeit von der mittleren Außentemperatur

Abb. 18 zeigt die vom Kollektor abgegebene Energie pro Nacht (5 Stunden) in Abhängigkeit von der mittleren Außentemperatur für eine Reihe von Nachtkühlungszyklen. Man sieht, dass es einen generellen Trend gibt, dass die Energieabgabe mit steigender Außentemperatur sinkt. Das ist natürlich zu erwarten. Die Daten streuen aber sehr stark, weil als weitere Faktoren hinzukommen, welcher Beladungszustand jeweils vorlag, welche Temperatur der Sorptionsspeicher hatte und welche Himmelstemperatur vorlag. Je höher die Temperatur im Sorptionsspeicher und je feuchter das Silikagel, desto höher ist auch die Kondensationstemperatur. Das bedeutet dann auch eine höhere Eintrittstemperatur in den Kollektor und damit je nach Außentemperatur eine größere Energieabgabe.

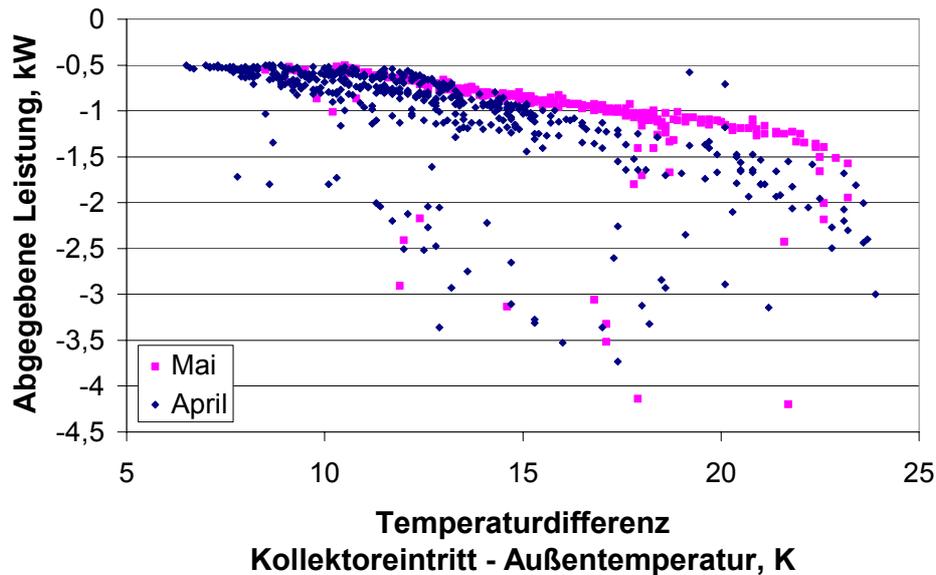


Abb. 19: Über den Kollektor abgegebene Leistung

In Abb. 19 ist daher die aktuell abgegebene Leistung als Funktion der Differenz zwischen Kollektoreintrittstemperatur und Außentemperatur dargestellt. Die Werte sind 5 min-Mittelwerte. Die abgegebene Leistung ist jeweils zu Beginn der Kühlphase sehr hoch, nimmt dann schnell ab und bleibt dann über mehrere Stunden auf einem niedrigeren, leicht sinkenden Wert. Die stark streuenden Werte sind also durch die jeweils höheren Startwerte zu erklären. Die meisten Werte liegen aber recht eng beieinander zwischen 0,5 und 1,5 kW je nach Temperaturdifferenz.

Die Steigung der Verlustkennlinie ist 1200 W pro 20 K Temperaturdifferenz. Da die für die Kühlung verwendeten Dachkollektoren 20 m<sup>2</sup> Absorberfläche haben, entspricht das einem Verlustkoeffizient von 3 W/(m<sup>2</sup> K). Das ist ein für selektive Flachkollektoren üblicher Wert und entspricht damit auch den Erwartungen. Für die Abstrahlung vom Kollektor ist außerdem die Himmelstemperatur von Bedeutung, die deutlich unter den Außentemperaturen liegen kann. Auch aus diesem Grund liegen einige der Werte deutlich über der Kurve mit dem Verlustkoeffizient von 3 W/(m<sup>2</sup> K).

Das folgende Beispiel zeigt zwei Nachtkühlungszyklen. In Abb. 20 sind die Sorptionsspeichertemperaturen dargestellt, in Abb. 21 die Vor- und Rücklauftemperaturen im Solarkreis (primär) sowie die abgegebene Leistung. Am 3.5.2006 war der Sorptionsspeicher Nr. 1 auf etwa 65°C aufgeheizt worden. Bis zum Start der Nachtkühlung kühlt er wieder bis auf 58°C ab. Um 0 Uhr beginnt dann die Nachtkühlung. In diesem Fall war bei beiden Temperaturen die nötige Druckdifferenz zwischen Wärmesenke und Speicher gegeben. Daher wurden beide Ventile geöffnet und es findet ein gewisser Druck- und Temperatenausgleich statt. Eine nennenswerte Desorption gibt es aber nur im Sorptionsspeicher Nr. 1. Man sieht, wie die Temperatur dort sinkt. Die an den Kollektor übertragene Leistung ist aber recht gering, da der Sorptionsspeicher schon relativ trocken war und zu einer stärkeren Desorption eine größere Temperaturdifferenz notwendig wäre.

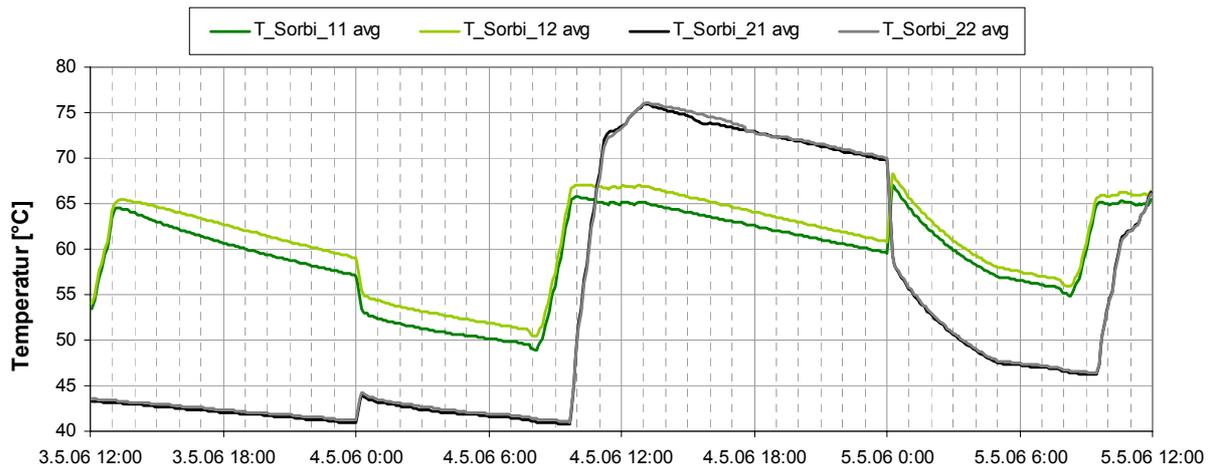


Abb. 20: Sorptionsspeichertemperaturen - Nachtkühlung

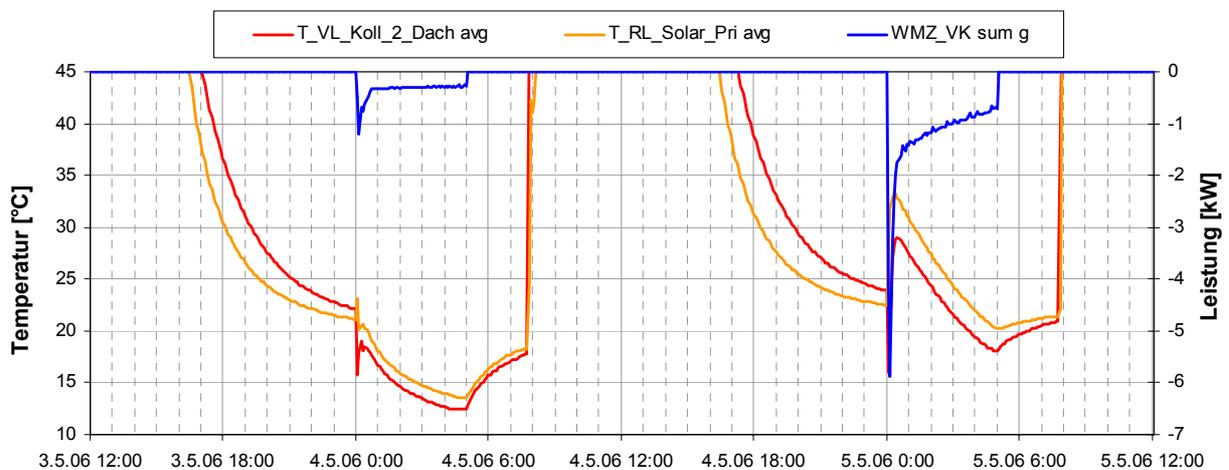


Abb. 21: Kollektortemperaturen und Kollektorleistung – Nachtkühlung

Am folgenden Tag werden beide Sorptionsspeicher solar aufgeheizt. Sorptionsspeicher Nr. 2, der noch wesentlich feuchter ist, erreicht 75°C. Der Knick in der Temperatur um etwa 11:00 Uhr zeigt, dass hier schon Kondensation in den Pufferspeicher stattfand. Um Mitternacht beginnt dann die Nachtkühlung mit deutlich höherer Leistung als am Tag zuvor, da der Speicher feuchter ist und damit die notwendige Temperaturdifferenz zwischen Wärmesenke und Speicher wesentlich kleiner ist.

Es konnte gezeigt werden, dass Nachtkühlung des Kondensators über die Kollektorfläche sinnvoll umsetzbar ist. Wichtig ist eine gute Isolierung der Speicher, um so wenig wie möglich Wärme zwischen Tag und Nachtbetrieb zu verlieren. Die Nachtkühlung ist in diesem Projekt zur Vereinfachung der Regelung immer um Mitternacht gestartet worden. Möglich und auch sinnvoll wäre es, die Nachtkühlung schon früher (in Abhängigkeit von der Außen- und Kollektortemperatur) zuzulassen. So könnte mehr Energie pro Nacht abgeführt werden sowie die Auskühlung zwischen Tag- und Nachtbetrieb reduziert werden.

### 7.1.5 Kondensation in den Heizkreis

Um zu testen, ob der Heizkreis selbst als Wärmesenke für die Kondensation dienen kann, wurde am 14.4.2006 Sorptionsspeicher Nr. 2 mit dem Pelletskaminofen aufgeheizt und gleichzeitig der Heizkreis an den Kondensator angeschlossen (siehe Abb. 22).

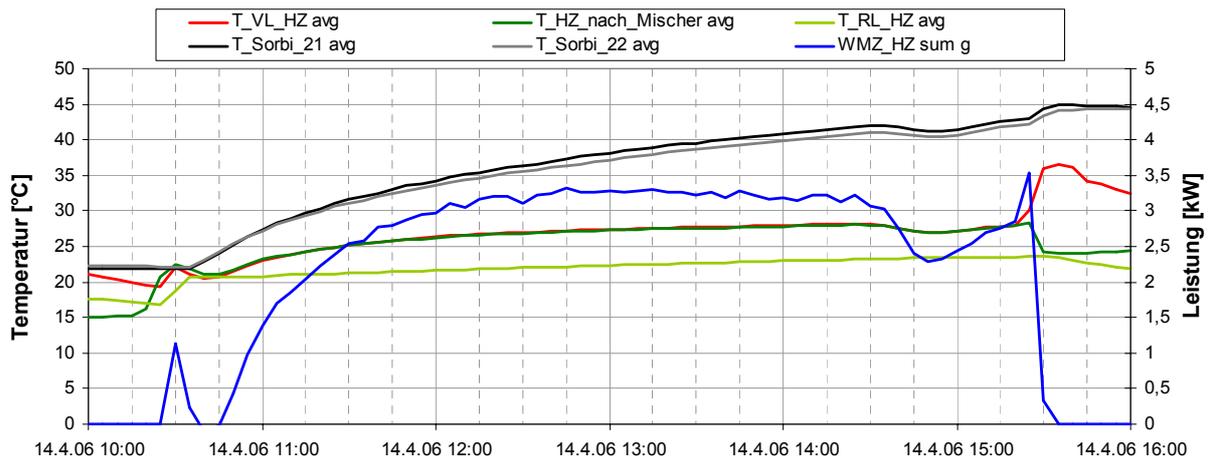


Abb. 22: Heizkreis als Wärmesenke für die Desorption

Der Sorptionsspeicher war zu Beginn des Tests kalt (22°C) und wurde zwischen 10:30 Uhr und 15:30 Uhr auf 45°C aufgeheizt. Die Kondensation in den Heizkreis begann um etwa 10:45 Uhr. Zu diesem Zeitpunkt hat der Sorptionsspeicher gerade einmal 25°C erreicht. Der Sorptionsspeicher war zu diesem Zeitpunkt sehr feucht, so dass nur eine kleine Temperaturdifferenz ausreichte, um zu kondensieren. Die in den Heizkreis abgeführte Leistung steigt relativ schnell an und erreicht nach etwa 1,5 Stunden Betrieb 3 kW. Mit dieser Leistung kann ein Niedrigenergiehaus gut beheizt werden. Die Heizkreisvorlauftemperatur lag in diesem Test bei maximal 28°C.

Das Experiment hat gezeigt, dass eine Kondensation in den Heizkreis durchaus möglich ist. Je trockener der Speicher wird, desto höher muss die Temperatur im Sorptionsspeicher sein, um auf dem Temperaturniveau des Heizkreises eine Kondensation zu ermöglichen.

Im vorangegangenen EU-Projekt MODESTORE konnte gezeigt werden, dass bei einer Sorptionsspeichertemperatur von 88°C und einer Kondensationstemperatur von 38°C eine Desorption bis auf 0,04 kg Wasser pro kg Silikagel möglich ist. Das bedeutet, der Heizkreis kann sehr gut als Wärmesenke dienen. Allerdings brauchen Niedrigenergie- oder Passivhäuser an sonnigen Tagen, wenn Solarenergie zur Desorption zur Verfügung steht, meist keine Heizung. Bei einem rein saisonalen Speicher (d.h. Desorption im Sommer) stellt der Heizkreis sowieso keine sinnvolle Möglichkeit der Wärmesenke dar, da hier die Desorption und damit auch die Kondensation ausschließlich im Sommer stattfindet, wenn kein Heizbetrieb ist.

Wenn eine Nachheizung über einen konventionellen Kessel vorhanden ist, kann dieser genutzt werden, um den Sorptionsspeicher wieder zu desorbieren. Dies macht aber nur dann Sinn, wenn der Kessel sowieso in Betrieb wäre, weil sowohl Puffer- als auch Sorptionsspeicher leer sind. Die hohe Betriebstemperatur des Kessels, die für den Heizkreis gar nicht nötig ist, kann für die Desorption genutzt werden. Die nach Ende des Desorptionsbetriebs im Sorptionsspeicher vorhandene sensible Wärme sollte allerdings im Anschluss ebenfalls im Heizkreis genutzt werden, um eine positive Energiebilanz zu erzielen. In einem solchen Betrieb ist es positiv, dass fast 100% der zugeführten Desorptionsenergie wieder bei der Kondensation abgeführt werden müssen.

### 7.1.6 Zusammenfassung Desorption

Der Betrieb der Pilotanlage hat gezeigt, dass die Desorption in den Sommermonaten relativ unproblematisch ist. Als Wärmesenken können sowohl der Pufferspeicher als auch nachts die Kollektoren dienen. Der Pufferspeicher als Wärmesenke ist dadurch begrenzt,

wie viel Wärme aus ihm entnommen wird (das bedeutet in diesem Fall, wie viel Warmwasser verbraucht wird). Beim Betrieb dieser Pilotanlage war so gut wie kein Warmwasserverbrauch vorhanden, da das Haus erst im Herbst bezogen wurde. Die Kühlung über die Kollektoren hat gut funktioniert, die Regelung kann aber noch optimiert werden (Beginn und Ende des Kühlbetriebs in Abhängigkeit von Außentemperaturen, Speichertemperaturen und Beladung). Die Kollektoren sind eine kostengünstige Alternative als Wärmesenke, da sie im System sowieso schon vorhanden sind. Andere Möglichkeiten wären Erdreichwärmetauscher, Erdsonden oder Wasser-Luftwärmetauscher mit Umgebungstemperaturen.

Es konnte außerdem gezeigt werden, dass eine Desorption auch an sonnigen Wintertagen durchaus möglich ist. Hier können die Kollektoren wegen der niedrigen Außentemperaturen noch effektiver als Wärmesenke genutzt werden. Auch der Pufferspeicher kann hier als Wärmesenke genutzt werden, da der untere Teil des Speichers häufig auf relativ niedrigen Temperaturen (Heizungsrücklauftemperatur) ist. Vorsicht ist allerdings geboten bei Außentemperaturen unter dem Gefrierpunkt. Ein Einfrieren des Solarwärmetauschers und damit des gesamten Sekundärkreises wurde in diesem Projekt durch Abschalten der Nachtkühlung bei niedrigen Außentemperaturen gewährleistet.

Der Betrieb des Kondensators hat gezeigt, dass ein sehr guter Wärmeübergang zwischen Dampf und Wärmetauscher vorliegt. Der Wärmetauscher ist also als Kondensator gut geeignet.

## 7.2 Adsorptionsbetrieb

Der Adsorptionsbetrieb ist die energetische Entladung des Speichers. Das Wasser im Vorratsbehälter wird in den Verdampferbereich gepumpt, dort verdampft und adsorbiert dann in einem der beiden Sorptionspeicher. Dort wird die Adsorptionsenergie frei, die dann über den Adsorberwärmetauscher direkt in den Heizkreis abgeführt werden kann. Als Niedertemperaturwärmequelle dient die Solaranlage, die Energie in einen Pufferspeicher liefert.

### 7.2.1 Regelungsstrategie

Die Regelstrategie der Pilotanlage ist in folgender Grafik dargestellt:

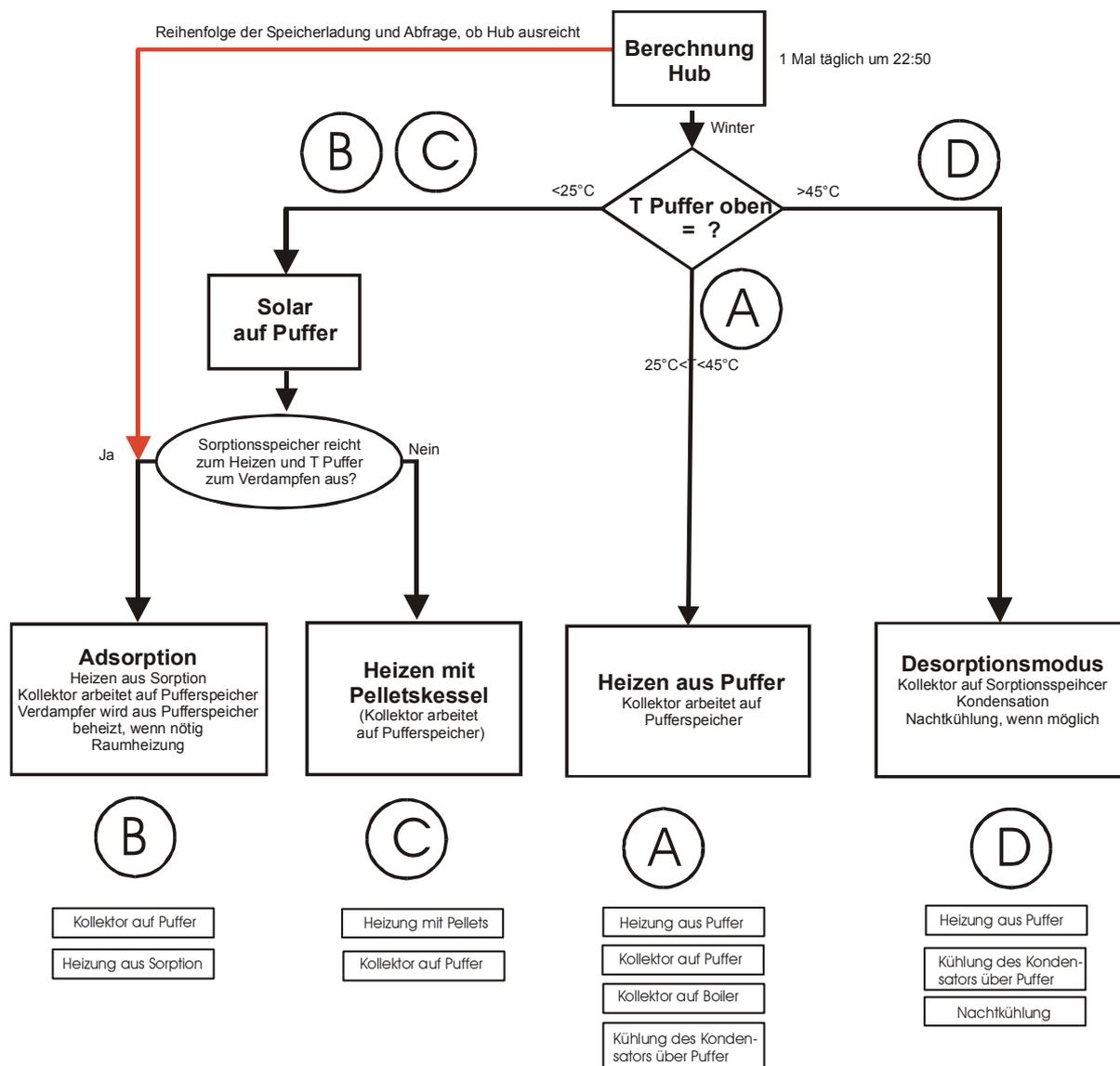


Abb. 23: Regelschema Pilotanlage

Im Winterbetrieb werden grundsätzlich immer zuerst der Boiler und der Pufferspeicher solar beladen. Reicht die Temperatur oben im Pufferspeicher aus, um damit direkt in den Heizkreis zu gehen, wird das System wie eine ganz normale solare Kombianlage betrieben (Betriebsmodus A). Die Grenztemperatur, bei der noch direkt aus dem Puffer

geheizt wird, lag anfänglich bei 30°C und wurde dann auf 25°C gesenkt, da auch mit 25°C noch eine ausreichende Heizleistung mit der Fußbodenheizung erreicht werden konnte.

Wenn die Puffertemperatur diese 25°C unterschreitet, wird auf Adsorptionsbetrieb umgestellt (Betriebsmodus B). Das heißt, es wird Wasser aus dem Vorratsbehälter nach oben in den Verdampferbereich gepumpt. Der Füllstandssensor zeigt die Position an, bei der der Verdampfer gerade noch nicht ganz mit Wasser bedeckt ist. Die Zahnradpumpe wird dann zyklisch ein- und ausgeschaltet, um den Wasserstand im Verdampfer konstant zu halten.

Über den gemessenen Druck und die gemessene Temperatur in den beiden Sorptionsspeichern wird der jeweils aktuelle Beladungszustand berechnet. Diese Messung findet einmal pro Tag statt, und um annähernd Gleichgewichtsbedingungen zu bekommen, werden die Dampfventile 5 Minuten vor der Messung geschlossen.

Für jeden Sorptionsspeicher wird die Sattdampf Temperatur zum aktuell gemessenen Druck berechnet. Die Sattdampf Temperatur entspricht der Verdampfungs- bzw. Kondensationstemperatur bei der aktuellen Sorptionsspeichertemperatur. Der erreichbare Hub berechnet sich dann als Differenz aus Sorptionsspeichertemperatur und Sattdampf Temperatur.

$$T_i^{sat} = f(p_i)$$

$$Hub = T_{S,i} - T_i^{sat}$$

mit  $i=1..2$  (Sorptionsspeicher 1 bzw. 2)

Der Temperaturhub wird dann zur Temperatur der Wärmequelle (Temperatur im Puffer oben) addiert, um die maximal erreichbare Sorptionsspeichertemperatur zu bestimmen. Ist diese Temperatur höher als die im Heizkreis benötigte Temperatur, kann dieser Speicher für die Adsorption verwendet werden. Reicht die Temperatur in beiden Speichern aus, wird der mit der niedrigeren maximalen Temperatur verwendet, um den trockeneren Speicher für eventuell später benötigte höhere Heizkreistemperaturen aufzusparen.

Wenn der Beladungszustand in beiden Speichern nicht mehr ausreicht, um damit zu heizen, wird auf Pelletskesselbetrieb umgestellt (Betriebszustand C).

An besonders sonnigen Tagen kann auch im Winter die Grenztemperatur von 45°C im Pufferspeicher oben überschritten werden. In diesem Fall wird auf Desorptionsbetrieb geschaltet, der ähnlich dem Sommerbetrieb ist (Betriebszustand D).

### 7.2.2 Verdampfungsprozess

Während des Verdampfungsprozesses ist der Raum um den Verdampferwärmetauscher mit Wasser gefüllt. Ein Ergebnis des vorangegangenen EU-Projektes MODESTORE war, dass die Wasseroberfläche knapp unterhalb der obersten Kante der Wärmetauscherrippen liegen soll. Die Verdampfung findet direkt an der Wasseroberfläche statt. Je größer der Abstand vom Wärmetauscher zur Wasseroberfläche, desto schlechter wird der Wärmeübergang und damit der  $k \cdot A$ -Wert des Wärmetauschers.

Aus diesem Grund wurde der Füllstandssensor so montiert, dass er genau diesen Punkt knapp unterhalb der oberen Kante des Wärmetauschers anzeigt.

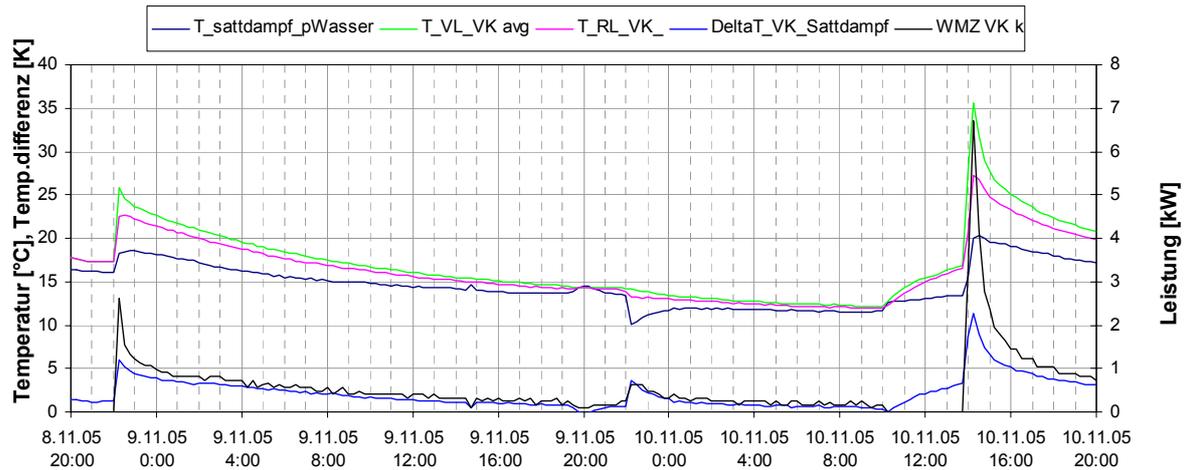
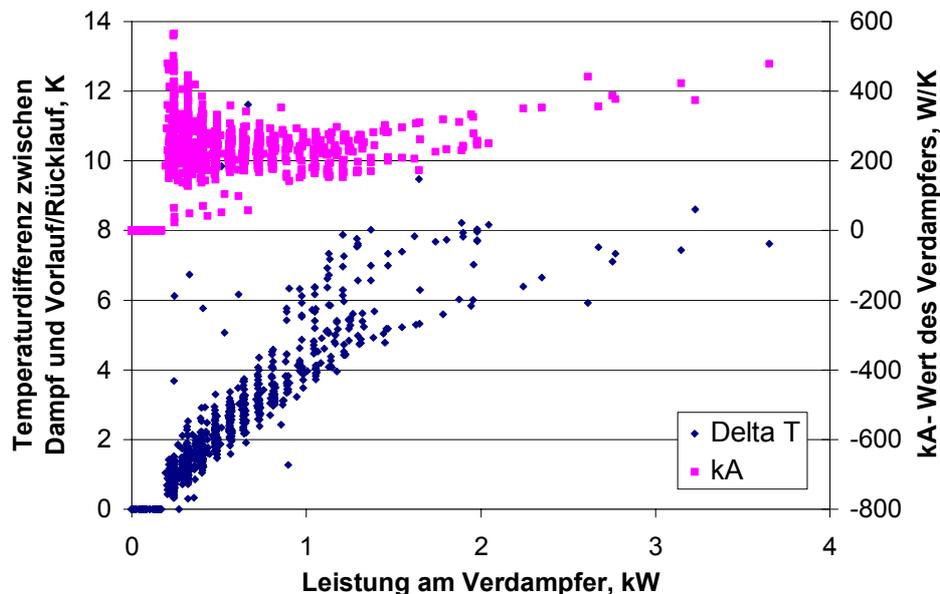


Abb. 24: Verdampfungsprozess

Abb. 24 zeigt beispielhaft die Vor- und Rücklauftemperaturen, die Sattdampf-temperatur, die aus dem gemessenen Dampfdruck oberhalb der Wasseroberfläche berechnet wurde sowie die im Wärmetauscher übertragene Leistung für einen Verdampfungsprozess im November 2005. Zusätzlich ist noch die Temperaturdifferenz zwischen Wärmetauscher (Mittelwert zwischen Vor- und Rücklauf) und Sattdampf-temperatur dargestellt. Zu Beginn der Adsorption ist die Wärmetauscherleistung etwa 2,5 kW und sinkt dann schnell ab. Die Temperatur im Sattdampf liegt während des Verdampfungsprozesses immer recht deutlich unter der Wärmetauschertemperatur. Dies zeigt, dass der  $k \cdot A$ -Wert des Wärmtauschers wesentlich niedriger ist, als beim Kondensationsprozess, wo praktisch keine Temperaturdifferenz zwischen Wärmetauscher und Dampf zu beobachten war.

In Abb. 25 ist diese Temperaturdifferenz in Abhängigkeit von der Leistung am Verdampfer dargestellt.

Abb. 25: Wärmeübertragung am Verdampfer (Temperaturdifferenz und  $k \cdot A$ -Wert)

Man sieht deutlich, dass die Temperaturdifferenz mit steigender Leistung stark zunimmt. Der  $k \cdot A$ -Wert des Wärmetauschers ist auf der rechten Achse dargestellt. Er liegt für die meisten Messpunkte zwischen 150 und 350 W/K. Ein solcher Wert war nach den Ergebnissen des EU-Projektes MODESTORE in etwa zu erwarten.

Leider liegt die Temperaturdifferenz zwischen Wärmetauscherfluid und erzeugtem Dampf mit bis zu 8 K (bei 2 kW) immer noch relativ hoch. In der Praxis hat das folgende Auswirkungen: Ab einer Pufferspeichertemperatur von 25°C wird auf Adsorptionsbetrieb umgeschaltet. Das heißt, der Verdampfer wird mit 25°C beheizt. Der erzeugte Dampf hat aber eine um bis zu 8 K niedrigere Temperatur (17°C). Das bedeutet, dass der Temperaturhub mindestens 23 K betragen muss, um eine Speichertemperatur von 40°C zu erreichen. Ohne Temperaturverlust im Wärmetauscher würden 15 K Temperaturhub ausreichen. Der bei Silikagel ohnehin schon recht niedrige Temperaturhub wird als in der Praxis durch den Temperaturverlust im Verdampfer de facto reduziert. Zusätzlich hat auch der Adsorberwärmetauscher einen Temperaturverlust, der den nutzbaren Temperaturhub weiter reduziert.

Effiziente Wärmetauscher sind also extrem wichtig für eine effiziente Nutzung eines Sorptionsspeichers. Eine Verbesserung des Wärmeübergangs für die Verdampfung könnte z.B. durch den Einsatz von Sprühdüsen und damit einer weiteren Reduzierung des Wasservolumens erreicht werden.

### 7.2.3 Leistungen/Temperaturen

Beispielhaft sind in Abb. 26 und Abb. 27 gemessene Temperaturen und Leistungen eines Adsorptionsbetriebs dargestellt. In Abb. 26 sind die Speichertemperaturen ( $T_{\text{Sorbi}_11}$  und  $T_{\text{Sorbi}_12}$  für Sorptionsspeicher Nr. 1 bzw.  $T_{\text{Sorbi}_21}$  und  $T_{\text{Sorbi}_22}$  für Sorptionsspeicher Nr. 2) sowie die Temperaturen im Pufferspeicher und Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmetauscher dargestellt. Am 31.10.2005 wurde der Sorptionsspeicher Nr. 1 entladen. Die Puffertemperatur startet auf 25°C und sinkt dann stetig ab. Der Temperaturhub bleibt in etwa gleich, so dass die Sorptionsspeichertemperatur auch sinkt. Um 22 Uhr wird dann auf Sorptionsspeicher Nr. 2 umgeschaltet, da der Sorptionsspeicher Nr. 1 inzwischen unter 30°C liegt. Da dieser Speicher noch trockener ist, kann er mit derselben Verdampfungstemperatur aus dem Pufferspeicher eine höhere Temperatur erreichen. Zwischen 2 und 6 Uhr morgens am 1.11.2005 gab es einen Messdatenausfall. Der Pufferspeicher wird bis auf 10°C abgekühlt. Am 11.11. wird der Pufferspeicher wieder solar bis auf 20°C aufgeheizt. Man sieht deutlich, wie die höheren Puffertemperaturen auch zu einer Erhöhung der Sorptionsspeichertemperatur führen. Die Vorlauftemperatur aus dem Sorptionsspeicher liegt die meiste Zeit bei etwa 25°C. Am Nachmittag des 1.11.2005 wird der Adsorptionsbetrieb gestoppt, da die Raumtemperatur ausgereicht hat. Man sieht deutlich die auf Umgebungstemperatur absinkenden Vor- und Rücklauftemperaturen. Die Eintrittstemperaturen in den Verdampfer liegen immer auf dem gleichen Wert wie die Temperaturen oben im Pufferspeicher.

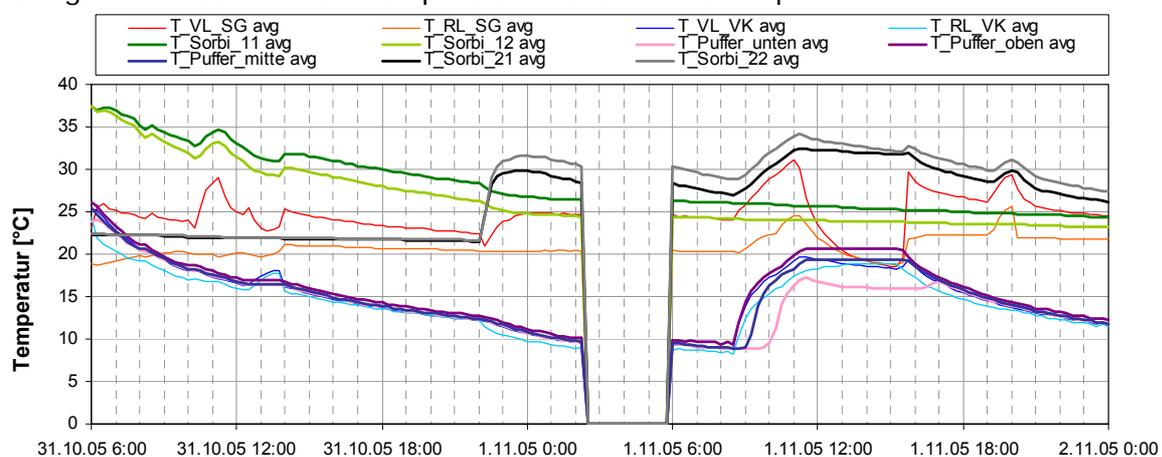


Abb. 26: Adsorptionsbetrieb, Temperaturen

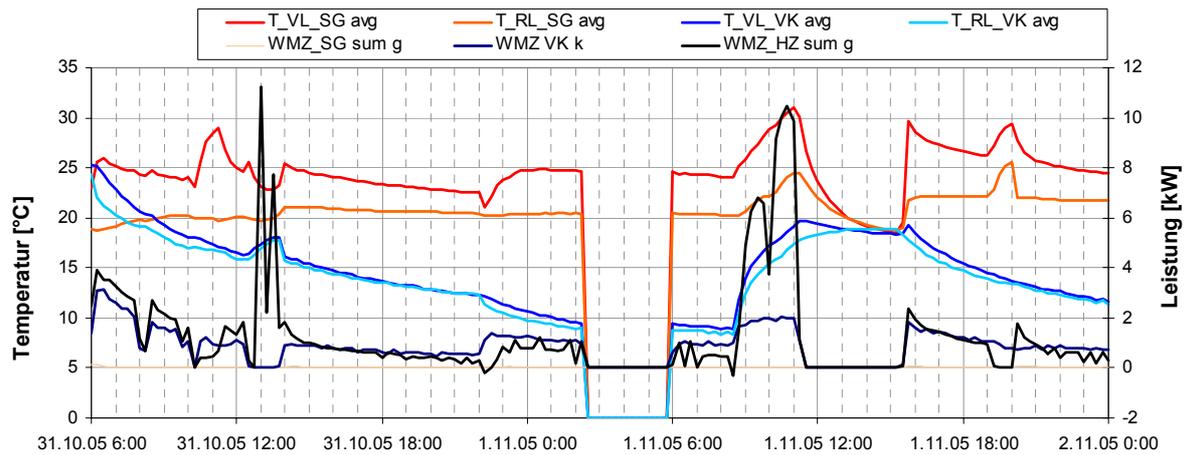


Abb. 27: Adsorptionsbetrieb, Leistungen

In Abb. 27 sieht man noch einmal die Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmetauscher sowie die übertragenen Leistungen. Die aus dem Sorptionspeicher in den Heizkreis abtransportierte Leistung liegt meist zwischen 0,5 und 2 kW. Die Verdampferleistung liegt meist knapp darunter. In diesem Beispiel wurde, wenn die Solaranlage in Betrieb war, auch noch Energie direkt in den Heizkreis gefördert, weshalb die Heizkreisleistung dann stark ansteigt.

### 7.2.4 Hub

Wie schon oben erwähnt, ist der Temperaturhub des Sorptionsmaterials als die Temperaturdifferenz zwischen Sorptionspeicher und Verdampfungstemperatur definiert (theoretischer Temperaturhub). Durch die Temperaturverluste in den Wärmetauschern ist der praktisch nutzbare Temperaturhub jedoch geringer (nutzbarer Temperaturhub).

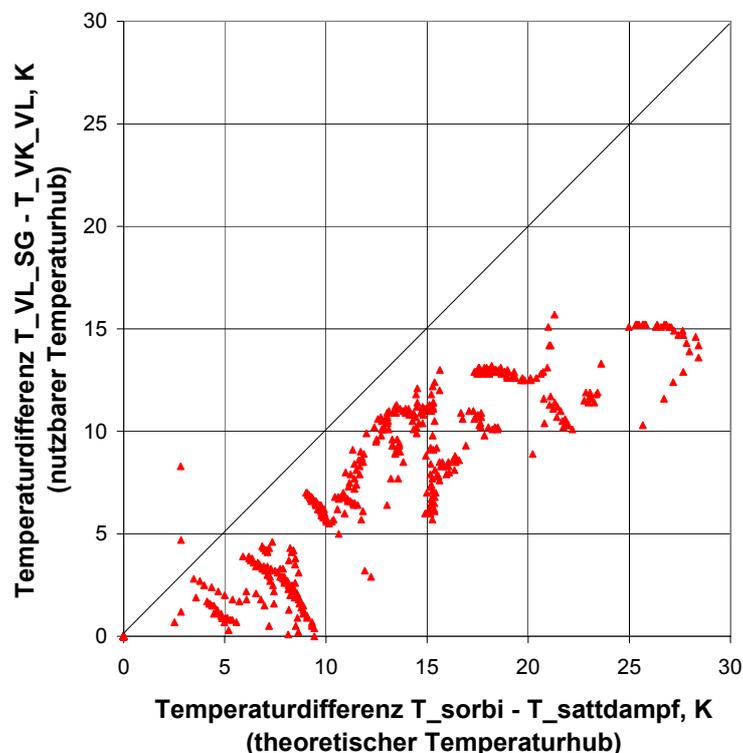


Abb. 28: Vergleich theoretischer und nutzbarer Temperaturhub

In Abb. 28 ist dieser nutzbare Temperaturhub als Funktion des theoretischen Temperaturhubs dargestellt. Es handelt sich hier um 15 Minuten Mittelwerte für die

Hauptadsorptionsphase im November 2005. Bei idealen Wärmetauschern müssten alle Punkte auf der Winkelhalbierenden liegen. Wie man sieht, liegen jedoch fast alle Punkte deutlich darunter. Bei einem theoretischen Temperaturhub von 15 K erreichen wir also nur einen nutzbaren Temperaturhub zwischen 6 und 13 K. Die starke Streuung liegt an den unterschiedlichen übertragenen Leistungen sowie Start- und Stoppvorgängen. Man sieht aber gut den Trend, dass der tatsächlich nutzbare Temperaturhub deutlich niedriger liegt als der theoretische.

Eine Verbesserung kann hier nur durch bessere Wärmetauscher erreicht werden. Bei der Verdampfung kann, wie oben erwähnt eine Verbesserung wahrscheinlich durch Sprühvorrichtungen oder ähnliches bewirkt werden. Beim Adsorberwärmetauscher ist dies durch die schlechte Wärmeleitfähigkeit von porösen Sorptionsmaterialien begrenzt. Dadurch sind sehr große Wärmetauscherflächen notwendig, die dann auch sehr kostenintensiv sind.

### 7.2.5 Speicherdichte

Die maximale Beladung des Silikagels mit Wasser beträgt 35%. Dies ist in Abb. 29 zu erkennen, die die charakteristische Kurve der Materialpaarung Silikagel – Wasser darstellt. Dies entspricht einer Speicherdichte von etwa 190 kWh/m<sup>3</sup>. Diese **theoretische** Speicherdichte ist etwa 2,7 mal größer als bei einem Wasserspeicher.

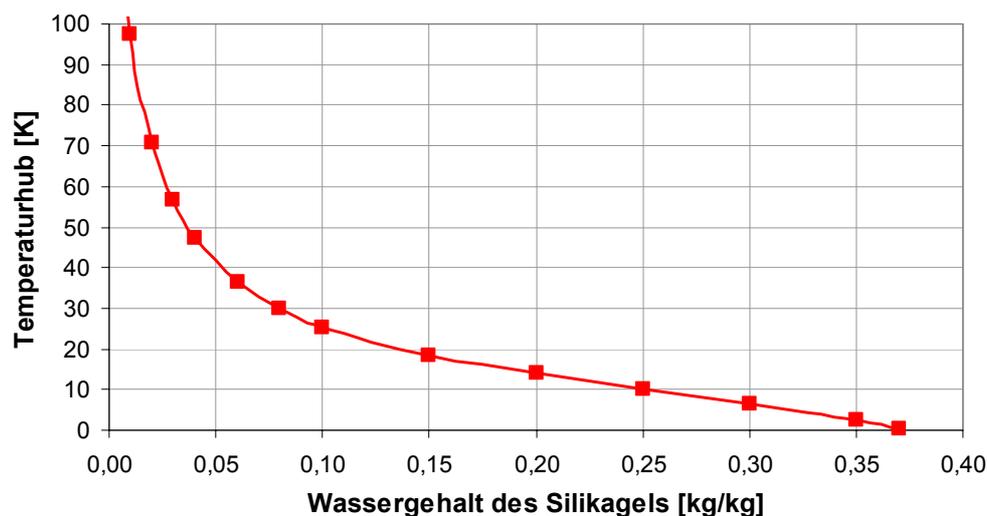


Abb. 29: Temperaturhub der Materialpaarung Silikagel – Wasser (bei 23 mbar Dampfdruck)

Ganz niedrige Beladungen von unter 3% sind nur schwer erreichbar, weil hier sehr hohe Temperaturen notwendig wären.

Der über große Beladungsbereiche geringe nutzbare Temperaturhub, sensible Wärmeverluste beim Aufheizen der Sorptionsspeicher auf Betriebstemperatur sowie größere Wärmeverluste durch die aufwendigere Verrohrung und größere Anzahl von Behältern im Vergleich mit einer einfachen solaren Kombianlage führen dazu, dass nur ein Beladungsbereich bis etwa 13% energetisch sinnvoll genutzt werden kann. Wenn der nutzbare Temperaturhub unter ca. 10 K liegt, ist es energetisch sinnvoller, einen konventionellen Pufferspeicher zu verwenden. Speicherung nach dem Sorptionsprinzip macht nur dann energetisch Sinn, wenn die Energie über eine längere Zeit gespeichert wird (verlustfreie Speicherung durch Trennung der Komponenten) und wenn die gespeicherte Energie mit einem ausreichend großen Temperaturhub wieder entladen werden kann.

In dieser Pilotanlage wurden 1000 kg trockenes Silikagel verwendet. Bei einer Beladung des Speichers zwischen 3 und 13% bedeutet das eine effektiv am Prozess beteiligte Wassermenge von 100 kg. Die Adsorptionsenergie des Wassers beträgt für diesem Beladungsbereich 70 kWh wovon etwa 96% als Verdampfungsenergie auf niedrigem Temperaturniveau bereitgestellt werden müssen. Das Volumen des Silikagels liegt bei etwa 1,4 m<sup>3</sup>. Das bedeutet, die Energiedichte des Materials liegt bei

$$50 \text{ kWh/m}^3$$

Zusätzlich zum Silikagelvolumen ist aber auch noch Volumen für den Adsorberwärmetauscher und Dampfdiffusionskanäle im Silikagel notwendig. Auch die Wasservorlage und der Verdampfer/Kondensator-Wärmetauscher benötigen Platz.

Tabelle 2: Benötigte Volumina für einen Sorptionsspeicher mit 1000 kg Silikagel

	Volumen in m <sup>3</sup>
Sorptionsspeicher mit Wärmetauscher und Dampfkanälen	1,6
Wasservorlage	0,1
Verdampfer/Kondensator-Wärmetauscher	0,08
<b>Gesamt</b>	<b>1,78</b>

Insgesamt kommt man auf ein Volumen von 1,78 m<sup>3</sup>. Das bedeutet eine Energiedichte von

$$39 \text{ kWh/m}^3$$

Zum Vergleich, ein konventioneller Wasserspeicher liegt bei einer Nutzung zwischen 25 und 85°C bei etwa

$$70 \text{ kWh/m}^3$$

Das heißt, ein Sorptionsspeicher mit der Materialpaarung Silikagel und Wasser liegt, auch wenn die Wärmetauscher und damit der Beladungsbereich noch etwas verbessert werden, unterhalb der Energiedichte von Wasserspeichern. Der Vorteil eines Sorptionsspeichers liegt allein in der verlustfreien Speicherung. Das heißt, die Vorteile eines Sorptionsspeichers kommen erst bei einem Langzeitspeicher zum Tragen. Für einen solchen Langzeitspeicher sind aber wesentlich größere Speichervolumina notwendig.

### 7.2.6 Zusammenfassung Adsorption

Innerhalb dieses Pilotprojektes konnte für den Adsorptionsbetrieb eine funktionierende Regelstrategie gefunden werden. Hierbei dient der Pufferspeicher als Puffer für die Niedrigtemperaturquelle. Gleichzeitig kann er, wenn genug Solarertrag da ist, als konventionelle Kombianlage betrieben werden.

Der Verdampfer hat die erwarteten Leistungen gebracht. Der k\*A-Wert könnte jedoch beispielsweise durch Versprühen des Wassers aus dem Vorratsbehälter noch verbessert werden.

Die aus dem Sorptionsspeicher in den Heizkreis abgeführten Leistungen liegen verhältnismäßig niedrig. Dies ist vor allem auf die schlechte Wärmeleitfähigkeit des Sorptionsmaterials zurückzuführen. Für ein Niedrigstenergiehaus können diese Leistungen jedoch ausreichen.

Der tatsächlich nutzbare Temperaturhub des Systems liegt aufgrund der Temperaturverluste der Wärmetauscher deutlich unter dem vom Material selbst erzeugten Hub. Dadurch wird der Beladungsbereich des Silikagels noch weiter reduziert. Insgesamt ist für diesen Silikageltyp nur ein Bereich zwischen etwa 3 und 13% technisch sinnvoll nutzbar. Daher liegt die erreichte Energiedichte des Speichers unter dem von Wasser. Der große Vorteil des Sorptionsprinzips gegenüber Wasser ist die verlustfreie Speicherung. Dieser Vorteil kommt aber erst bei der Langzeitspeicherung zum Tragen. Aber auch hier ist es wichtig, dass der erzeugte Temperaturhub nicht zu klein ist.

Eine höhere Speicherdichte kann nur mit einem anderen Sorptionsmaterial oder sogar einer anderen Materialpaarung erreicht werden. Weitere Entwicklungstätigkeit vor allem auf dem Materialsektor ist eine wichtige Voraussetzung für eine energetisch sinnvolle Nutzung des Sorptionsprinzips als Wärmespeicher. Dabei sind vor allem folgende Kriterien wichtig:

- ausreichender Temperaturhub über eine große Beladungsbandbreite
- hohe Energiedichte
- nicht zu hohe Austreibungstemperaturen (Solarkollektor)
- möglichst bessere Wärmeleitfähigkeit

Derzeit sind bessere Sorptionsmaterialien durchaus verfügbar. Sie sind allerdings sehr teuer oder beispielsweise korrosiv. Diese Materialien wurden meist für andere Anwendungen entwickelt (Trocknung, Kühlmaschinen, Wärmepumpen) und sind daher nicht genau auf die Erfordernisse der Wärmespeicherung abgestimmt. Eine Materialentwicklung speziell für diese Anwendung ist notwendig, um die sorptive Wärmespeicherung einen weiteren Schritt nach Vorne zu bringen.

## 8 Simulationen

Für die Simulation eines Sorptionsspeichers eingebunden in eine Simulation des Gesamtsystems wurde für die Simulationsumgebung TRNSYS (Klein et al., 2002) ein Modell erstellt, das auf einer einfachen Energie- und Stoffbilanz im Sorptionsspeicher und im Kondensator/Verdampfer beruht.

Abb. 30 zeigt schematisch die Stoffbilanz für einen Sorptionsspeicher in einem geschlossenen System. Die Massenbilanz ist in diesem Fall nicht sehr kompliziert: Bei einer Desorption wird Wasserdampf vom Adsorber zum Kondensator transportiert, bei einer Adsorption genau in die umgekehrte Richtung. Durch den Stofftransport ändert sich die Zustandsgröße im System (gestrichelte Linie): der Beladezustand des Silikagels  $x$  im Adsorber.

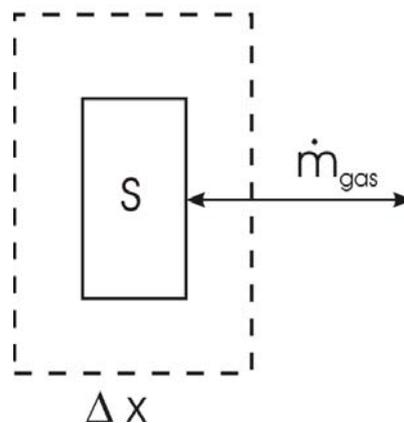


Abb. 30: Stoffbilanz für einen Sorptionsspeicher

Die Energiebilanz dagegen ist etwas komplizierter. Es kommen dabei mehr Terme vor und einige davon hängen davon ab, wieviel Stoffmenge (Wasserdampf) gleichzeitig zwischen den Behältern transportiert wird.

Abb. 31 zeigt schematisch diese Energiebilanz. Dabei ist darauf zu achten, dass einige der Terme nur im Desorptions- andere nur im Adsorptionsmodus vorkommen.

Bei der Energiebilanz des Adsorbers kommen bei der **Desorption** folgende Terme vor: Der Adsorber wird über die Solarkollektoren beheizt ( $Q_{coll}$ ). Der Wasserdampf, der den Speicher verlässt hat innere Energie ( $U_m$ ) und trägt mit sich die Adsorptionsenergie ( $Q_{ads}$ ), die aufgebracht werden musste, um den Dampf vom Silikagel zu desorbieren. Die Adsorptionsenergie setzt sich aus der Bindungsenergie und der Energie zusammen, die aufgebracht werden muss, um die flüssigen adsorbierten Wassermoleküle zu verdampfen. Die Adsorptionsenergie hängt davon ab, wie hoch die aktuelle Wasserbeladung des Silikagels ist (die sogenannte charakteristische Kurve, siehe unten).

Bei der **Adsorption** wird Wärme aus dem Adsorber zur Last abgeführt ( $Q_{load}$ ). Die Energie, die mit dem Wasserdampf bewegt wird, der vom Verdampfer in den Sorptionsspeicher kommt, ist die gleiche wie bei der Desorption, nur in umgekehrter Richtung.

In beiden Betriebsmodi gibt es Speicherverluste. Der jeweilige Zustand des Systems wird durch die innere Energie im Speicher ( $U_s$ ) dargestellt. Dies ändern sich kontinuierlich aufgrund des Energie- und Stofftransports.

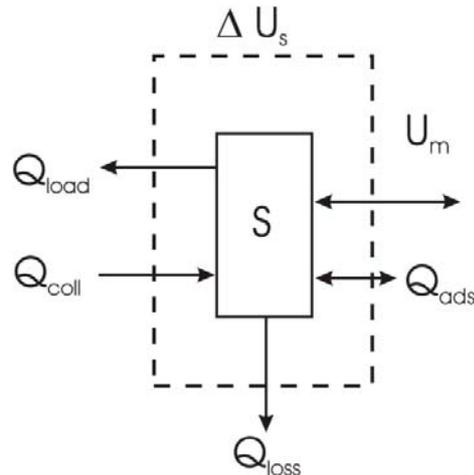


Abb. 31: Energiebilanz für einen Sorptionspeicher

Die Adsorption von Wasserdampf in den Poren von Silikagel kann nach der Dubinin-Theorie mit der sogenannten charakteristischen Kurve beschrieben werden. Diese Kurve kann messtechnisch bestimmt werden und zeigt, wie viel freie Energie bei gegebener Beladung pro Kilogramm adsorbierten Wasserdampfes frei wird bzw. wie viel Energie aufgewendet werden muss, um ein Kilogramm Wasserdampf zu desorbieren.

Die charakteristische Kurve des verwendeten Silikagels (Grace 127 B) in Abb. 32 wurde für das Modell aus zwei Gleichungssegmenten zusammengesetzt

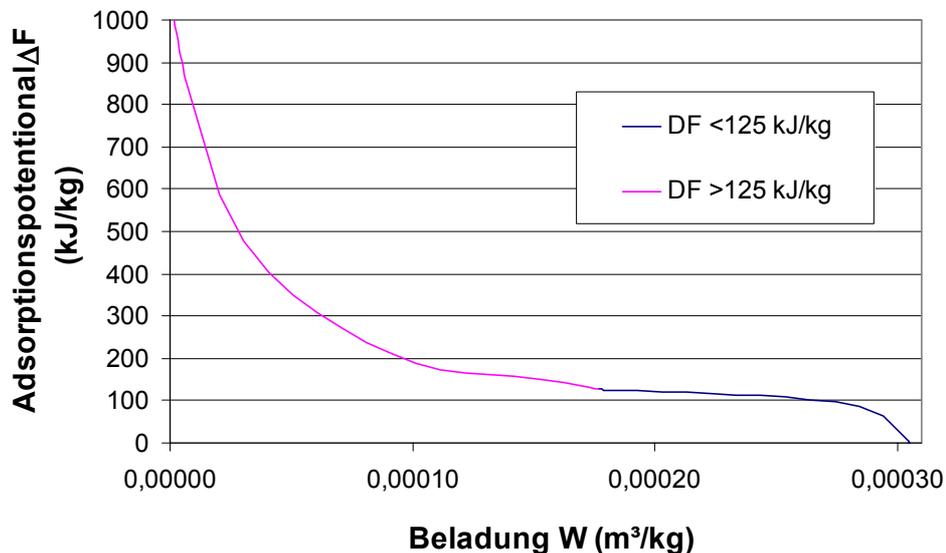


Abb. 32: Charakteristische Kurve für das Stoffpaar Silikagel – Wasser (Silikagel Grace 127 B)

Der Verdampfer/Kondensator wird in dem Modell als einfacher Wärmetauscher mit logarithmischer Temperaturdifferenz dargestellt mit der Besonderheit, dass auf der ‚Speicherseite‘ des Tauschers eine konstante Temperatur herrscht, nämlich die aktuelle Sattdampf Temperatur. Der Wärmetauscher im Silikagel wird mit einem Standardwärmetauschermodell dargestellt.

Neben der Gleichung, die die charakteristische Kurve des Materials beschreibt, kommen in dem Modell damit nur noch 2 Variablen vor:

- kA-Wert des Adsorberwärmetauschers
- kA-Wert des Verdampfer/Kondensators
- kA-Wert für die Wärmeverluste des Sorptionspeichers an die Umgebung

Dieses Modell des Sorptionspeichers kann jetzt in eine Systemsimulation, die das Kollektorfeld, das Gebäude mit seiner Heizlast, den Pufferspeicher und alle anderen für ein Heizungssystem notwendigen Komponenten umfasst, integriert werden. Das Modell wurde mit Daten aus dem EU-Projekt MODESTORE validiert und zeigt recht gute Übereinstimmung. Für andere Speichergrößen müsste das Modell aber jeweils neu validiert werden, da es nicht selbstverständlich ist, dass sich die kA-Werte der Wärmetauscher linear verhalten werden. Sie werden auch stark von der jeweiligen Speicher- und Wärmetauscherkonstruktion abhängen.

Abb. 33 zeigt ein Prinzipschema des Simulationsmodells für den Sorptionspeicher der zweiten Generation.

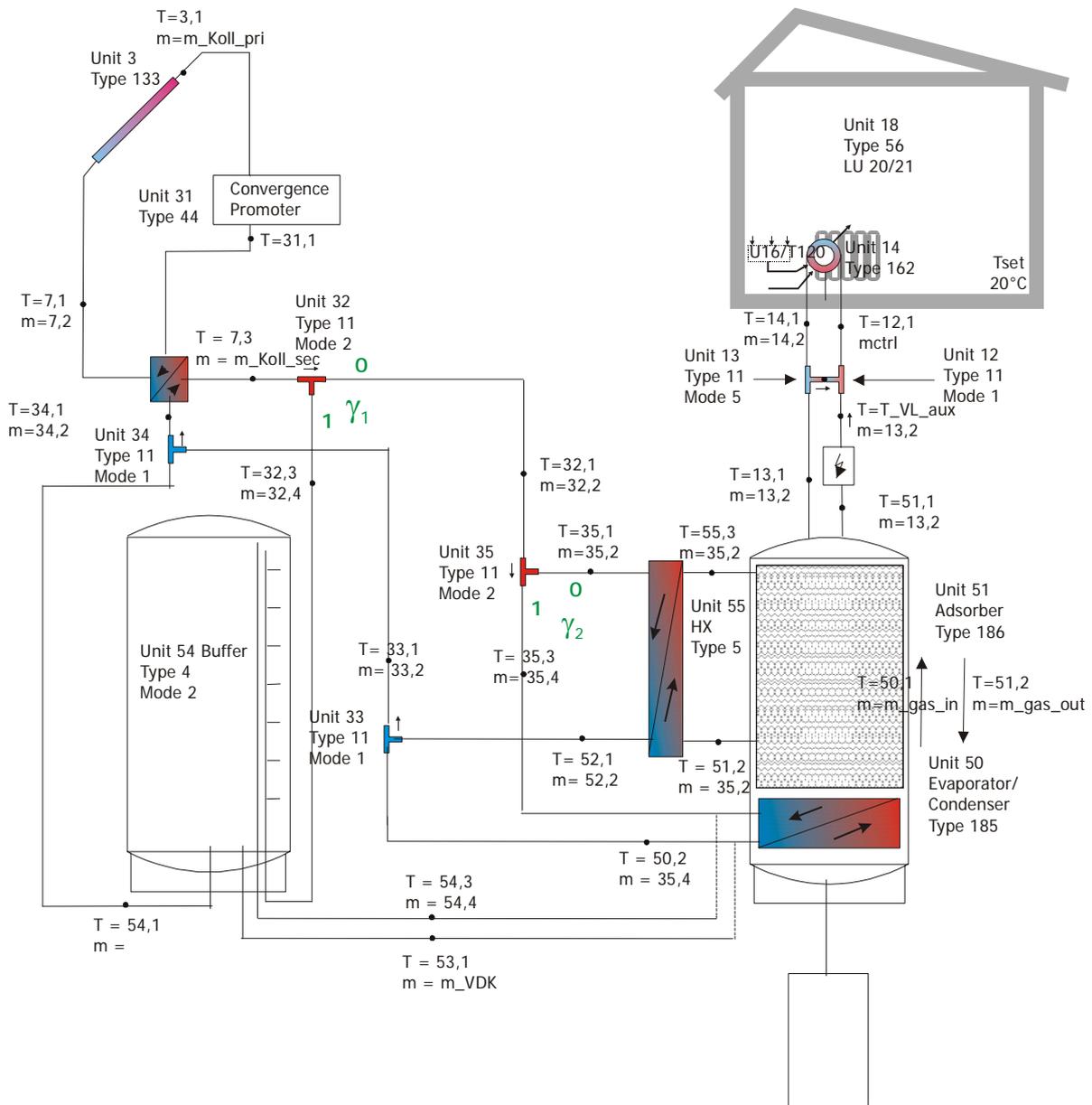


Abb. 33: Aufbau des Simulationsmodells für das Systemkonzept

## 9 Tagungsteilnahmen und Informationsworkshop

Gartler G., Jähnig D., Purkarthofer G., Wagner W. (2004): Development of a High Energy Density Sorption Storage System, Proceedings of the Eurosun 2004 conference, Freiburg, Germany.

Jähnig, Dagmar; Hausner, Robert; Wagner, Waldemar; Isaksson, Charlotta (2006): Betriebserfahrungen mit einem Sorptionsspeicher in einer ersten Pilotanlage, Zeitschrift erneuerbare energie, ee 2-06, Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE.

Jähnig, Dagmar; Hausner, Robert; Wagner, Waldemar; Isaksson, Charlotta (2006): Thermo-Chemical Storage for Solar Space Heating in a Single-Family House, ECOSTOCK conference, Richard Stockton College, New Jersey, Mai 2006.

Jähnig, Dagmar; Hausner, Robert; Wagner, Waldemar; Isaksson, Charlotta (2006): Solares Heizen mit einem Sorptionsspeicher in einem Einfamilienhaus - Erste Betriebserfahrungen mit einer Pilotanlage, OTTI - Symposium Thermische Solarenergie, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V.

Jähnig, Dagmar; Hausner, Robert; Wagner, Waldemar; Isaksson, Charlotta (2006): Derzeitige Möglichkeiten und Grenzen von Sorptionsspeichern – Ergebnisse aus dem Testbetrieb in einem Einfamilienhaus, Symposium Gleisdorf Solar 2006.

Teilnahme und Präsentation des Projektes bei zahlreichen Meetings des IEA-SHC Task 32 (Advanced storage concepts for solar and low energy buildings)

Jähnig, Dagmar; Hausner, Robert; Wagner, Waldemar; Isaksson, Charlotta (2006): Sorptionsspeicher – Ergebnisse aus Laborversuchen und einer Pilotanlage, Tagungsbeitrag bei der Tagung „Innovative Solar Speicherkonzepte“, Wien, 17.3.2006, AEE INTEC.

Informationsworkshop Technologieplattform – Solarnet Styria, Graz 20.3.2006: Dagmar Jähnig, AEE INTEC Gleisdorf: Sorptionsspeicher – ein Beispiel steirischer Technologieentwicklung

Jähnig, Dagmar; Hausner, Robert; Wagner, Waldemar; Isaksson, Charlotta (2006): Sorptive Wärmespeicher – eine Schlüsseltechnologie für die Zukunft? Teil 1: Solares Heizen mit einem Sorptionsspeicher in einem Einfamilienhaus - Erste Betriebserfahrungen mit einer Pilotanlage, Tagungsbeitrag beim Solarthermieforum bei der Intersolar 2006, Freiburg, 22.6.2006.

## 10 Schlussfolgerungen und Ausblick

In diesem Projekt konnte erstmals eine Sorptionsspeicheranlage für die Speicherung von Solarenergie zur Raumheizung in einer realen Anwendung, einem Einfamilienhaus umgesetzt werden. Bau und Funktion der Systemkomponenten verliefen dabei zufriedenstellend. Das erarbeitete Systemkonzept mit Regelstrategie hat sich als umsetzbar und funktionsfähig erwiesen.

Gegenüber der im Vorgängerprojekt getesteten Laboranlage konnte der Wärmeübergang im Wärmetauscher während des Verdampfungsvorgangs deutlich verbessert werden, auch wenn hier noch weiteres Verbesserungspotential auf konstruktiver Ebene besteht. Auch der Wärmetauscher in der Silikagelschüttung konnte durch ein besseres Lötverfahren und verringerte Abstände zwischen den Kupferblechlagen verbessert werden. Ein kleinerer Nachteil wurde durch die Einführung eines Dampfrohres mit Ventil zwischen Verdampfer/Kondensator-Wärmetauscher und Silikagelschüttung in Kauf genommen. Dies war zur Erhöhung der Betriebssicherheit in dieser ersten Pilotanlage notwendig. In zukünftigen Anlage könnte dies allerdings durch eine gute Regelstrategie auch vermieden werden.

Obwohl der Betrieb des Systems zufriedenstellend verlaufen ist und das Systemkonzept in dieser Form auch in weiteren Anlagen umgesetzt werden könnte, hat sich herausgestellt, dass mit der verwendeten Materialpaarung die Sorptionsspeicherung zwar technisch umsetzbar ist, aber dass der damit zu erzeugende Temperaturhub nur in einer schmalen Bandbreite von Wasserbeladungen des Silikagels auch technisch nutzbar ist. Wenn das Silikagel sehr trocken ist, erzeugt es einen brauchbaren Temperaturhub, ab einer Beladung von etwa 13% jedoch wird der Temperaturhub so klein, dass er in einer realen Anwendung mit Wärmetauschern, Rohrleitungen und Behältern, die alle verlustbehaftet sind, nicht mehr nutzbar ist. Dies bedeutet, dass die technisch nutzbare Energiedichte dieses Materials weit von der theoretischen und auch weit von der im Labor messbaren Energiedichte entfernt ist. Somit bräuchte man sehr große Mengen des Materials, was weder technisch noch wirtschaftlich sinnvoll ist.

Das Material wurde deshalb ausgewählt, weil es im Großmaßstab hergestellt und somit kostengünstig ist. Bislang gibt es noch kaum Forschungsinstitute, die Sorptionsmaterialien für den Einsatz als Wärmespeicher entwickeln. Meist ist der Fokus auf Wärmepumpen, Kältemaschinen oder Gastrennung und Trocknungsprozesse. Einzelne Projekte haben gezeigt, dass es chemisch und technisch machbar ist, Sorptionsmaterialien auch für den Einsatz als Wärmespeicher zu entwickeln. Bislang sind diese Materialien aber meist sehr teuer oder beispielsweise korrosiv.

Als nächster Schritt in Richtung einer monosolaren (100% solaren) Wärmeversorgung für die Raumheizung wäre eine intensiviertere Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Sorptionsmaterialien. Beispielsweise können vorhandene Zeolithe, die im großen Maßstab unter anderem in der Waschmittelindustrie eingesetzt werden und den großen Nachteil haben, dass sie sehr hohe Temperaturen für die Desorption brauchen, so modifiziert werden, dass die Desorptionstemperaturen gesenkt werden, aber gleichzeitig der Temperaturhub höher bleibt, als es bei einfachen Silikagelen der Fall ist.

## 11 Literaturhinweise

### **Klein et al., 2002**

Klein, S.A.; Beckman, W.A.; Mitchell, J.W.; Duffie, J.A.; Duffie, N.A., Freeman, T.L.; Mitchell, J.C.; Braun, J.E.; Evans, B.L.; Kummer, J.P.; Urban, R.E.; Fiksel A.; Thornton, J.W.; Blair, N.J.; Williams, P.M.; Bradley, D.E., Holst, S.: TRNSYS – A Transient System Simulation Program, Version 15, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin – Madison.

### **Núñez, 2001**

Núñez, Tomas: Charakterisierung und Bewertung von Adsorbentien für Wärmetransformationsanwendungen, Dissertation, Fakultät für Physik der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg im Breisgau, Deutschland.

### **Wagner et al., 2006**

Wagner, Waldemar; Jähnig, Dagmar; Hausner, Robert; Isaksson, Charlotta: Endbericht EU Projekt MODESTORE (Modular High Energy Density Sorption Storage), 5. Rahmenprogramm DG TREN, Vertragsnummer: NNE5/2001/979, Endberichte, Deliverable D6: System prototype storage module (Austria), Deliverable D9: Installed system equipped with monitoring devices in Austria, Deliverable D14: Final Report on Austrian Field Test Period (Performance and Evaluation).

### **Welteroth et al., 2001**

Welteroth, J., Mittelbach, W.: High Energy Density Sorption Heat Storage for Solar Space Heating (HYDES HEAT STORAGE), Endbericht des EU-Projektes im JOULE III Programm, Vertragsnummer JOR3-CT98-0199.