

UNIVERSITÄT STUTTGART  
INSTITUT FÜR THERMODYNAMIK UND WÄRMETECHNIK  
Kommissarischer Leiter: apl. Prof. Dr.-Ing. Klaus Spindler



# Abschlussbericht

für das Projekt

## SolSpaces

### Entwicklung und Erprobung einer autarken solaren Wärmeversorgung für energieeffiziente Kompaktgebäude

Förderkennzeichen 0325984A / 0325984B

**Autoren: Rebecca Weber, Sebastian Asenbeck, Henner Kerskes, Ralf Jaudas**

Stuttgart, den 19.08.2016



<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart	<b>Förderkennzeichen:</b> 0325984A
<b>Ansprechperson:</b> Dr. Henner Kerskes Tel.: +49 (0) 711 / 685 - 63534, E-Mail: kerskes@itw.uni-stuttgart.de	
<b>Projektpartner:</b> SchwörerHaus KG Hans-Schwörer Str. 8, 72531 Hohenstein-Oberstetten	<b>Förderkennzeichen:</b> 0325984B
<b>Ansprechpersonen:</b> Johannes Schwörer, Ralf Jaudas Tel.: +49 (0) 7387 / 16 - 0, Fax: +49 (0) 7387 / 16 - 238, E-Mail: info@schwoerer.de	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung und Erprobung einer autarken solaren Wärmeversorgung für energieeffiziente Kompaktgebäude	
<b>Laufzeit:</b> 01.03.2012 – 28.02.2016	

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	5
2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....	6
2.1	Errichtung des Gebäudes (AP1) .....	6
2.2	Messtechnische Erfassung des energetischen Ist-Zustands des Gebäudes (AP2) .....	7
2.2.1	Messtechnik .....	7
2.2.2	Messprogramm .....	7
2.2.3	Messung von Temperatur, Feuchte, Strahlung und Luftvolumenstrom .....	8
2.2.4	Messtechnische Erfassung des Wärmebedarfs .....	10
2.2.5	Prognose zur Deckung des Wärmebedarfs mit dem neuen Heizsystem .....	12
2.3	Speichermaterialuntersuchungen und Zyklenstabilität (AP3) .....	13
2.4	Entwicklung eines saisonalen Sorptionswärmespeichers (AP4) .....	15
2.4.1	Modellspeicher im Labormaßstab .....	16
2.4.2	Entwicklung und Konstruktion des Sorptionswärmespeichers .....	20
2.5	Entwicklung eines detaillierten numerischen Modells zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens des Heizsystems (AP5) .....	29
2.5.1	Gebäudemodell .....	29
2.5.2	Modell des Sorptionswärmespeichers .....	31
2.6	Entwicklung eines Konzepts zur vollständigen Wärmeversorgung auf solarthermischer Basis (AP6) .....	32
2.6.1	Betriebszustände .....	33
2.6.2	Segmentauswahl .....	34
2.6.3	Regelstrategie .....	34
2.6.4	Umsetzung der Regelstrategie (Reglerbibliothek) .....	35
2.6.5	Kollektorauslegung .....	36
2.6.6	Berechnung der Heizleistung des Sorptionswärmespeichers .....	37
2.6.7	Speicherperipherie .....	37
2.7	Einbau, Inbetriebnahme und messtechnische Erfassung der solarthermischen Wärmeversorgung (AP7) .....	38
2.7.1	Montage des Kollektors .....	38
2.7.2	Aufbau und Befüllung des Sorptionswärmespeichers .....	39
2.7.3	Einbau der Messtechnik .....	42
2.7.4	Verrohrung .....	42
2.8	Monitoring und energetische Bewertung der solarthermischen Wärmeversorgung (AP8) .....	43
2.8.1	Verhalten und Leistungsfähigkeit des Sorptionswärmespeichers .....	43

---

2.8.2	Verhalten und Leistungsfähigkeit des Kollektors.....	51
2.8.3	Betrieb des solaren Heizsystems an ausgewählten Tagen .....	52
2.8.4	Monatliche Auswertung des Heizbetriebs .....	55
3	Zusammenfassung .....	59
4	Veröffentlichungen.....	60
	Literatur.....	62

## 1 Einleitung

Durch die vermehrte Energiegewinnung aus regenerativen Quellen, deren Verfügbarkeit zeitlichen Schwankungen unterworfen ist, gewinnt die Speicherung von Energie zunehmend an Bedeutung. Im Bereich der Solarthermie gab es in den letzten Jahren zahlreiche Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet der thermochemischen Energiespeicher, zu denen auch Sorptionswärmespeicher gehören und die sich aufgrund der nahezu verlustfreien Speicherung sehr gut für die Speicherung von thermischer Energie über längere Zeiträume eignen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts SolSpaces wurde ein solares Heizungskonzept mit Langzeitwärmespeicherung für energieeffiziente Gebäude entwickelt. Der zentrale Bestandteil des Konzepts ist ein Sorptionswärmespeicher zur saisonalen Wärmespeicherung, der über einen Vakuumröhren-Luftkollektor beladen wird. Durch die saisonale sorptive Wärmespeicherung soll eine Wärmeversorgung des Gebäudes mit einem sehr hohen solaren Deckungsanteil erreicht werden.

Erste Erfahrungen mit einem Sorptionswärmespeicher zur Gebäudebeheizung im Labormaßstab wurden am ITW in dem Projekt MonoSorp gewonnen. In weiteren nationalen und internationalen Projekten wurde das Know-how auf dem Gebiet der thermischen Energiespeicherung durch Sorptionsprozesse weiter ausgebaut. Bisher ist jedoch kein anderes Projekt bekannt, bei dem ein offener Sorptionsprozess für die Langzeitwärmespeicherung im realen Maßstab demonstriert wurde. An dieser Stelle setzt das Projekt SolSpaces an. Durch die Entwicklung eines segmentierten Sorptionswärmespeichers konnte erstmals ein offener Prozess für die Gebäudebeheizung realisiert und in einem realen Gebäude demonstriert werden. Durch das Konzept der Speichersegmentierung wurde die Realisierung großer Speicherkapazitäten möglich.

Das Heizungskonzept wurde am Beispiel des neuen innovativen Gebäudetyps „Flying Spaces“ der Firma SchwörerHaus KG erarbeitet, aufgebaut und erprobt. Nach der Gebäudeerrichtung erfolgte ein Monitoring des zunächst mit konventioneller Heizungstechnik ausgestatteten Gebäudes zur Bestimmung des Heizwärmebedarfs. Im Anschluss an die Entwicklung des neuen solaren Heizsystems erfolgte dessen Einbau in das Gebäude mit anschließender messtechnischer Untersuchung.

## 2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die während der Projektlaufzeit durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse beschrieben. Die Gliederung bezieht sich auf die im Projektantrag spezifizierten Arbeitspakete (AP).

### 2.1 Errichtung des Gebäudes (AP1)

Das solare Heizsystem wurde in einem Gebäude vom Typ „Flying Spaces“ der Firma SchwörerHaus KG [10] erprobt. Diese Gebäude werden vollständig vorgefertigt und per LKW angeliefert. Die Errichtung des Gebäudes auf dem Universitätscampus in Stuttgart-Vaihingen erfolgte Ende November 2013 durch die SchwörerHaus KG (siehe Abbildung 1). Die Nutzfläche beträgt knapp 43 m<sup>2</sup>. Das Gebäude ist unterteilt in Wohnraum, Bad und Schlafrum. Letzterer wird für das Forschungsprojekt als Technikraum genutzt. Dort befinden sich die gesamte Heiztechnik inklusive des Sorptionswärmespeichers sowie die Messdatenerfassung für das Monitoring der Wärmeversorgungsanlage und des Gebäudes. Das Gebäude wurde zunächst mit der Heizungsvariante „Lüftungsanlage mit integrierter Kompaktwärmepumpe“ (Ist-Zustand) aufgebaut, die später durch die solare Heizungsvariante ersetzt wurde.

Das kompakte Gebäude weist aufgrund seines relativ großen Oberflächen- zu Volumenverhältnisses einen vergleichsweise hohen spezifischen Wärmebedarf pro Quadratmeter auf. Der absolute Wärmebedarf größerer energieeffizienter Gebäude liegt deshalb in einer ähnlichen Größenordnung. Das solare Heizungskonzept kann daher an dem kleinen Gebäude erprobt und später auch auf größere Gebäude mit ähnlichem Wärmebedarf übertragen werden.



Abbildung 1: Anlieferung des SolSpaces Gebäudes



Abbildung 2: SolSpaces Gebäude auf dem Campus der Universität Stuttgart

## 2.2 Messtechnische Erfassung des energetischen Ist-Zustands des Gebäudes (AP2)

Für AP2 wurde im Gebäude umfangreiche Messtechnik installiert, ein Programm zur Erfassung der Messdaten erstellt und eine Vermessung des Ist-Zustands des Gebäudes mit der zu Beginn installierten Heizungsvariante „Lüftungsanlage mit integrierter Kompaktwärmepumpe“ vorgenommen. Dieses Monitoring diente der Erprobung der Messtechnik, der Bereitstellung von Messdaten für die Validierung des Gebäudesimulationsmodells (AP4) sowie für die energetische Bewertung des Gebäudes.

### 2.2.1 Messtechnik

Um eine energetische Bilanzierung des Gebäudes durchführen und wichtige raumlufttechnische Parameter wie Raumtemperatur, Raumluftfeuchte und die Luftwechselrate messen zu können sowie zur Generierung von Daten für die Validierung des Gebäudesimulationsmodells wurde im Gebäude die entsprechende Messtechnik installiert. Die Temperaturmessung erfolgt mit kalibrierten Pt100-Widerstandsthermometern, die Feuchte wurde mit kapazitiven Feuchtemessgeräten gemessen, die Globalstrahlung mit einem Pyranometer (Fa. Kipp&Zonen), der Normvolumenstrom der Luft mit Hitzdrahtanemometern (Fa. Höntzsch, Typ TA/U10a,), der Warmwassermassenstrom mit einem magnetisch induktiven Durchflussmessgerät (Fa. Endress&Hauser, Typ Promag 50P). In Abbildung 3 sind die Positionen der Messgeräte auf dem Grundriss des SolSpaces Gebäudes dargestellt.

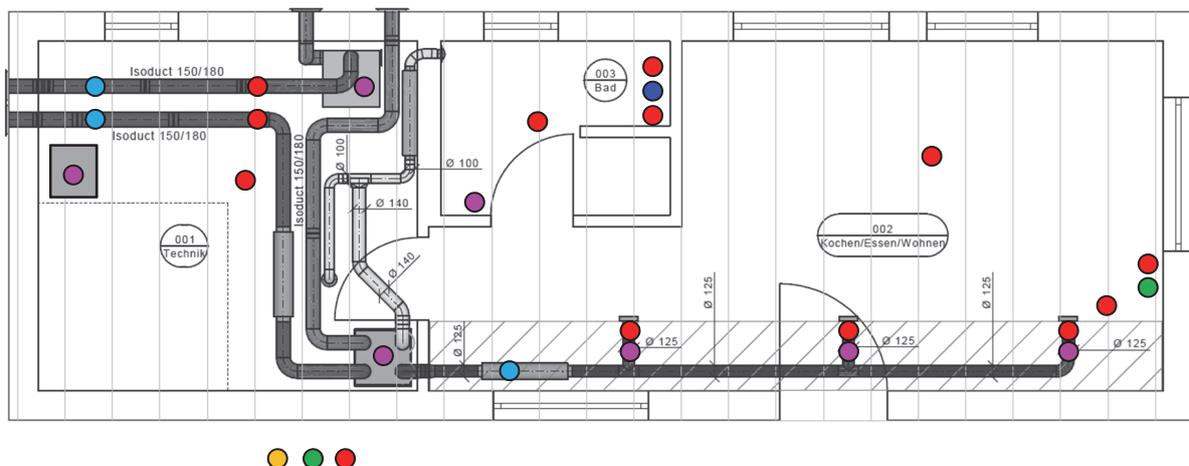


Abbildung 3: Grundriss des SolSpaces Gebäudes (Heizungsvariante „Lüftungsanlage mit integrierter Kompaktwärmepumpe“), Positionen der installierten Messgeräte: rot...Temperatur, grün...Feuchte, hellblau...Luftnormvolumenstrom, blau...Warmwassermassenstrom, gelb...Strahlung, violett...elektrische Energie

### 2.2.2 Messprogramm

Zur Erfassung, Visualisierung und Aufzeichnung der Messdaten sowie zur Ansteuerung von Ventilen, Stellmotoren, Lüftern, etc. wurde ein Programm mit der Software LabVIEW erstellt. Mit dem Programm lässt sich weiterhin eine definierte Entnahme von Warmwasser aus dem Warmwasserspeicher durchführen, um den Warmwasserverbrauch von Bewohnern nachzu-

bilden. Über die Dusche kann dreimal am Tag zu definierten Uhrzeiten eine definierte Wärmemenge entnommen werden. Teile der Bedien- und Visualisierungsoberfläche sind exemplarisch in Abbildung 4 dargestellt.

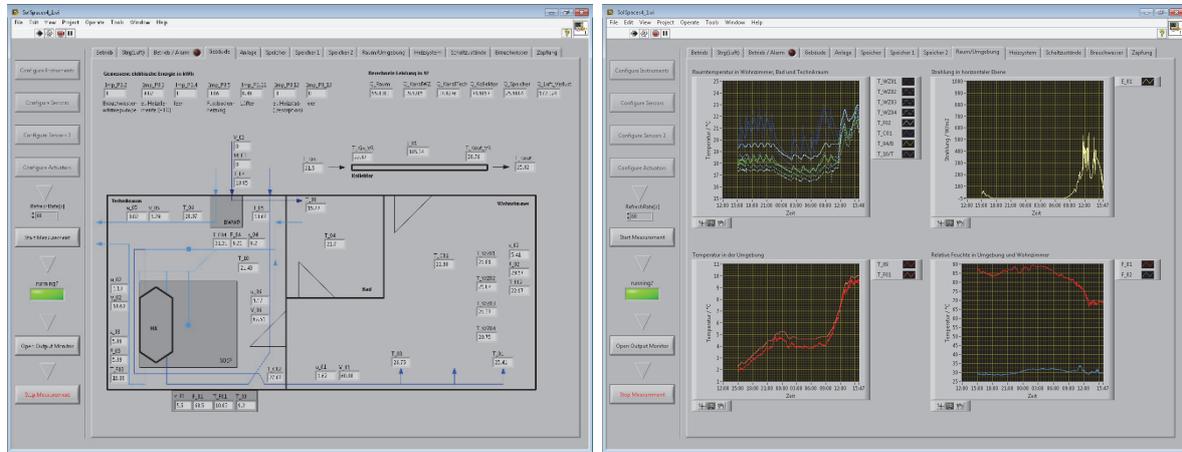


Abbildung 4: Auszug aus der Bedien- und Visualisierungsoberfläche des Messprogramms, Darstellung der aktuellen Messwerte auf dem schematischen Grundriss des Gebäudes (links), zeitlicher Verlauf verschiedener Messgrößen (rechts)

### 2.2.3 Messung von Temperatur, Feuchte, Strahlung und Luftvolumenstrom

Die messtechnische Untersuchung des Gebäudes mit der Heizungsvariante „Lüftungsanlage mit integrierter Kompaktwärmepumpe“ erfolgte von Mitte Dezember 2013 bis Mitte Mai 2015.

Die konventionelle Heiztechnik besteht aus einer die Umgebungsluft nutzenden Wärmepumpe für die Trinkwassererwärmung sowie einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und integrierter Kompaktwärmepumpe zur Raumheizung. Das Gebäude verfügt zudem über PTC (Positive Temperature Coefficient)-Heizelemente zur bedarfsweisen elektrischen Nachheizung der in den Wohnraum eintretenden Luft (max. 1,5 kW) sowie über eine elektrische Fußbodenheizung im Bad (max. 375 W).

Die zeitlichen Verläufe von Temperatur, relativer Feuchte und Solarstrahlung sind in Abbildung 5 beispielhaft für den 23.12.2013 gezeigt. Die relative Feuchte im Wohnraum liegt an diesem Tag knapp über 30 % während die Umgebungsfeuchte zwischen 62 % und 85 % schwankt.

In Abbildung 6 sind die Temperaturen von Frischluft, Abluft und Fortluft der Lüftungsanlage mit integrierter Kompaktwärmepumpe sowie der Zuluftnormvolumenstrom dargestellt. Die Peaks bei der Fortlufttemperatur resultieren aus dem Enteisungsvorgang der Wärmepumpe. Die Lüftungsanlage wurde an dem gezeigten Beispieltag mit Nachtabsenkung betrieben. Während der Zeit von 22 Uhr bis 6 Uhr ist, wie in Abbildung 6 links dargestellt, der Luftvolumenstrom reduziert. Die Temperatur der Zuluft in den Wohnraum (jeweils nach dem PTC-Element gemessen) ist im rechten Diagramm dargestellt. Die PTC-Elemente vor den drei Zuluftöffnungen im Wohnraum ermöglichen ein elektrisches Nachheizen der Zuluft. An dem Beispieltag war die elektrische Nachheizung (PTC) häufig aktiv. Die Zuluft im Kernstrom direkt

hinter den PTC-Elementen erreicht dabei Temperaturen von bis zu 95 °C. Trotz dieser hohen Temperaturen konnte im Wohnraum keine Geruchsbelästigung, die eventuell durch Staubverschmelzung auftreten könnte, festgestellt werden.

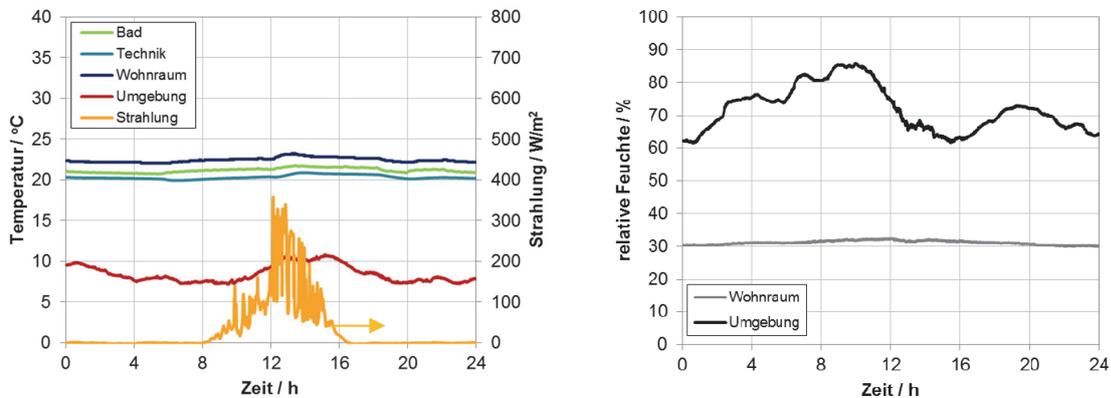


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen in Wohnraum, Bad, Technikraum und der Umgebung sowie Strahlung in horizontaler Ebene (links) und zugehörige relative Feuchte in Wohnraum und Umgebung (rechts) am 23.12.2013

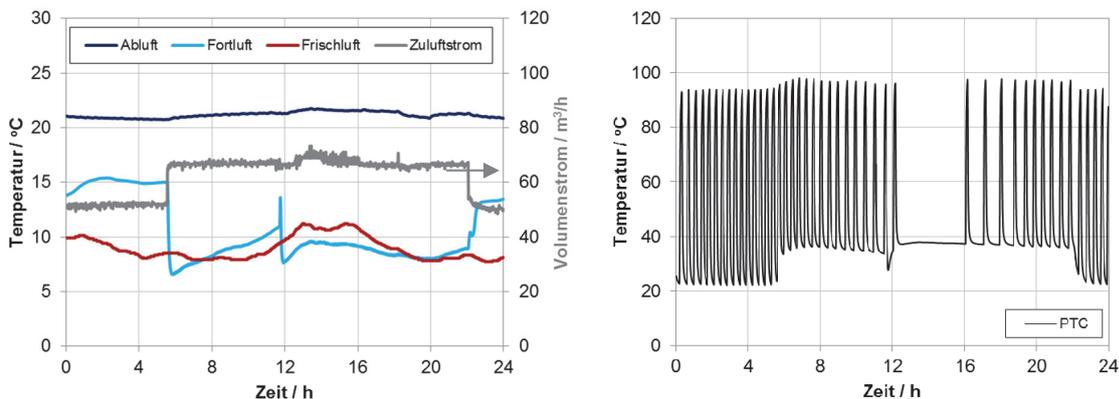


Abbildung 6: Zuluftnormvolumenstrom sowie Frischluft-, Fortluft- und Ablufttemperaturen der Lüftungsanlage mit integrierter Kompaktwärmepumpe (links), mittlere Zulufttemperatur zum Wohnraum (jeweils nach den PTC-Elementen gemessen) (rechts) am 23.12.2013

Die Tagesmittelwerte der Raumtemperaturen und der Umgebungstemperatur für das Jahr 2014 sind in Abbildung 7 gezeigt. Von Anfang Juni bis Ende August war die Lüftungsanlage im Sommerbetrieb, d.h. die Kühlfunktion der Wärmepumpe war in diesem Zeitraum freigegeben.

Die Tagesmitteltemperatur im Wohnraum unterschreitet 20 °C nur an wenigen Tagen des Jahres. Im Sommer treten, trotz Verschattung der Fenster, an einigen Tagen Raumtemperaturen über 30 °C auf.

Die gemessene Raumfeuchte in dem unbewohnten Gebäude betrug in der Zeit von November 2014 bis Februar 2015 durchschnittlich etwa 4,5 g/kg (Monatsmittel 2014: März 4,3 g/kg, April

5,6 g/kg, Oktober 8,1 g/kg, November 5,9 g/kg, Dezember 4,4 g/kg, 2015: Januar 4,0 g/kg, Februar 3,4 g/kg).

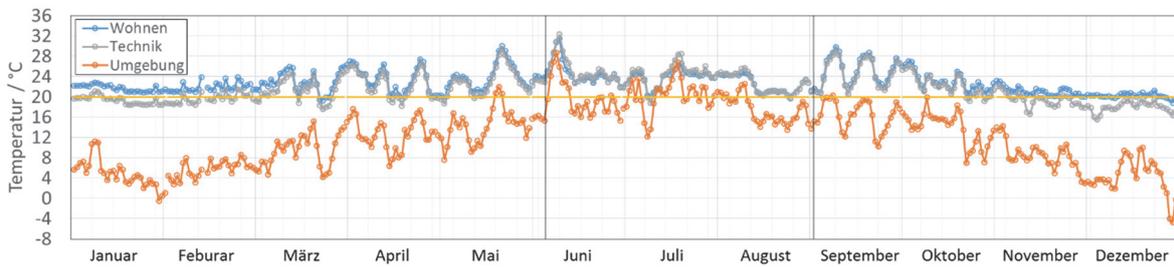


Abbildung 7: Tagesmittelwerte der Temperaturen in Wohnraum, Technikraum und Umgebung für das Jahr 2014

## 2.2.4 Messtechnische Erfassung des Wärmebedarfs

Der dem Forschungsgebäude zugeführte Heizwärmestrom ( $\dot{Q}_{Heiz}$ ) berechnet sich aus dem thermischen Anteil der durch die Wärmepumpe aufgebracht wird ( $\dot{Q}_{WP,th}$ ) und dem Anteil des Wärmeübertragers der Lüftungsanlage (Wärmerückgewinnung) ( $\dot{Q}_{WÜ}$ ). Weitere Anteile stellen die elektrischen Leistungen für Fußbodenheizung ( $P_{FuBo}$ ), PTC-Heizelemente ( $P_{PTC}$ ), Abwärme von Steuerung und Lüfter der Lüftungsanlage ( $P_{Steu.+Lüfter}$ ) sowie von Messrechner und Messtechnik ( $P_{Mess}$ ) dar. Hinzu kommen die Wärmeverluste des Warmwasserspeichers ( $\dot{Q}_{WWS}$ ), der sich im Technikraum befindet.

$$\dot{Q}_{Heiz} = \dot{Q}_{WP,th} + \dot{Q}_{WÜ} + P_{FuBo} + P_{PTC} + P_{Steu.+Lüfter} + P_{Mess} + \dot{Q}_{WWS} \quad (1)$$

Die Leistungen bzw. Wärmeströme nach Gleichung 1 sind in Abbildung 8 beispielhaft für den Monat März aufgetragen.

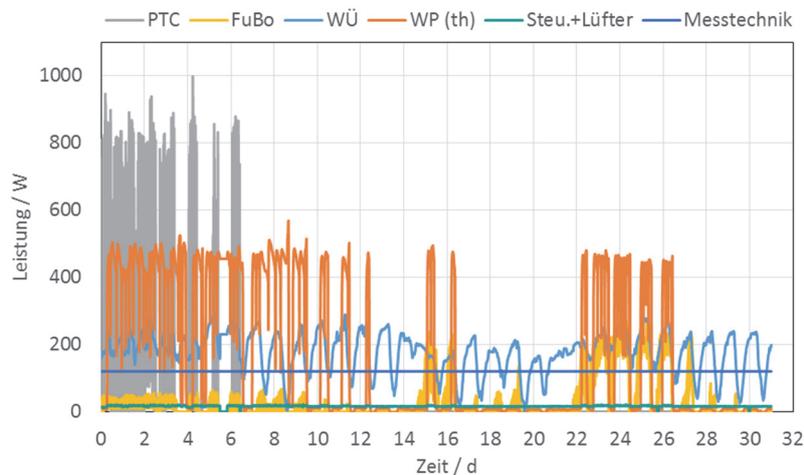


Abbildung 8: Dem Gebäude zugeführte Leistungen (thermisch und elektrisch) im Monat März

Die aus Gleichung 1 resultierende monatlich zugeführte Heizwärme ist in Abbildung 9 dargestellt<sup>1</sup>. In einem Jahr summieren sich die Werte für das unbewohnte Forschungsgebäude auf 4220 kWh/a. Der Trinkwassererwärmung ist darin nicht enthalten.

Bei diesem relativ hohen Wert ist zu berücksichtigen, dass das Forschungsgebäude unbewohnt ist. In einem von 2 Personen bewohnten Gebäude würden durch diese Personen sowie durch elektrische Geräte wie Kühlschrank, Herd, Computer etc. interne Gewinne in der Größenordnung von 200 W anfallen [9].

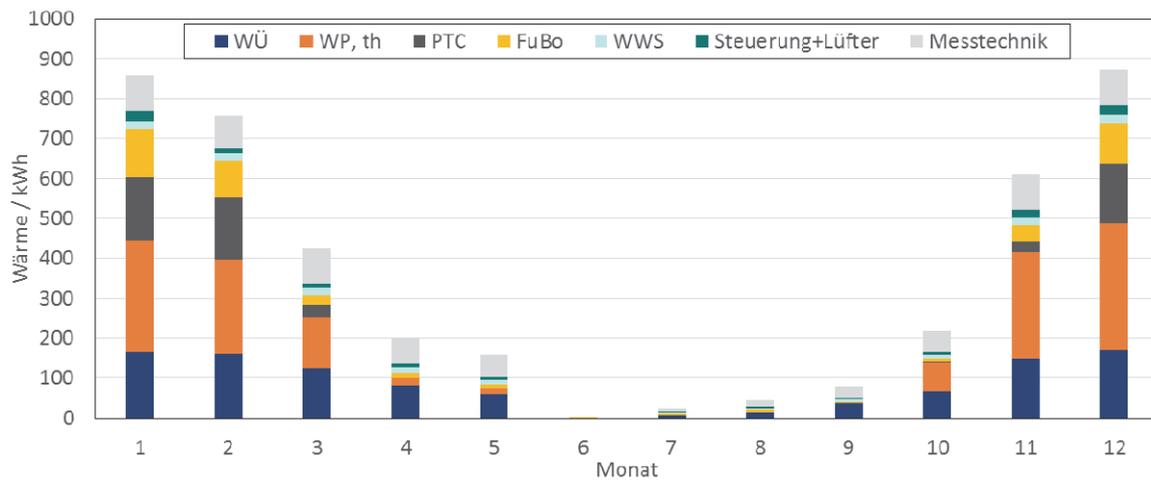


Abbildung 9: Dem unbewohnten Forschungsgebäude monatlich zugeführte Heizwärme (ermittelt aus Messdaten des konventionellen Heizsystems)<sup>2</sup>

In Tabelle 1 ist der Heizwärmebedarf eines bewohnten und unbewohnten SolSpaces Gebäudes jeweils ohne und mit Wärmerückgewinnung (WRG) zusammengefasst (Luftwechselrate ca. 0,5/h). Da sich der Warmwasserspeicher in der beheizten Zone befindet wurden dessen relevante<sup>1</sup> Wärmeverluste in Höhe von 143 kWh/a vom Heizwärmebedarf abgezogen. Der Wert für das bewohnte Gebäude wurde mit der Annahme von 200 W für die internen Gewinne berechnet.

Tabelle 1: Heizwärmebedarf des SolSpaces Gebäudes (aus Messdaten)

	unbewohntes Gebäude	bewohntes Gebäude
Gebäude ohne WRG	4076 kWh/a	2992 kWh/a
Gebäude mit WRG	2912 kWh/a	1978 kWh/a

<sup>1</sup> Die Anteile Wärmerückgewinnung, Steuerung und Lüfter, Messtechnik und Warmwasserspeicher werden dem Gebäude unabhängig vom Wärmebedarf zugeführt. Wenn die Raumtemperatur über die Solltemperatur ansteigt, kann aus den Messdaten nicht bestimmt werden, zu welchem Teil diese zwangsläufig zugeführten Wärmeströme tatsächlich benötigt würden. Diese Anteile werden daher nur an Heiztagen  $HT_{20/15}$ , d.h. wenn die Tagesmitteltemperatur der Umgebung unter 15 °C liegt, als Wärmebedarf berücksichtigt.

<sup>2</sup> Messdaten: Januar und Februar 2015, März bis Dezember 2014

Zum Vergleich sind Beispiele für die Größenordnung des Energiebedarfs von energieeffizienten Einfamilienhäusern für Raumheizung (RH) + Trinkwarmwasser (TW) aufgeführt:

KfW-Effizienzhaus 70 (EnEV 2009)  $\leq 45 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ :

→  $120 \text{ m}^2 \cdot 45 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) = 5400 \text{ kWh/a}$  (3900 kWh/a (RH) + 1500 kWh/a (TW))

KfW-Effizienzhaus 55 (EnEV 2009)  $\leq 35 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ :

→  $120 \text{ m}^2 \cdot 35 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) = 4200 \text{ kWh/a}$  (2700 kWh/a (RH) + 1500 kWh/a (TW))

### 2.2.5 Prognose zur Deckung des Wärmebedarfs mit dem neuen Heizsystem

Von dem neu entwickelten solaren Heizsystem – bestehend aus Sonnenkollektor, Sorptionswärmespeicher und Wärmeübertrager zur Wärmerückgewinnung – müssen entsprechend der Messdaten 2865 kWh/a bereitgestellt werden. Dieser Wert ergibt sich aus dem Wert für das bewohnte Gebäude ohne Wärmerückgewinnung abzüglich dem Anteil für Steuerung und Lüfter, da dieser Anteil beim solaren Heizsystem in gleicher Größenordnung auftritt. In Abbildung 10 ist, basierend auf den Messdaten, eine Vorhersage dargestellt inwieweit und aus welchen Quellen dieser Bedarf mit dem neu entwickelten solaren Heizsystem gedeckt werden kann, wenn das Gebäude von 2 Personen bewohnt wird. Dieser Berechnung liegen folgende Annahmen und Randbedingungen zugrunde:

- 26 m<sup>2</sup> Kollektorfläche, Kollektornutzungsgrad von 0,45 für das direkte Heizen mit dem Sonnenkollektor (Kollektor direkt)
- Überschusswärme vom Kollektor kann auch als fühlbare Wärme gespeichert werden, ein Drittel davon sei zum Heizen nutzbar (Kollektor indirekt)
- die Heizleistung des Sorptionswärmespeichers ergibt sich aus der zur Verfügung stehenden Feuchtigkeit (Luftfeuchte aus Messdaten des unbewohnten Gebäudes, Luftwechselrate 1,0/h) und einer mittleren Adsorptionsenthalpie von 3600 kJ/kg [4]
- der Anteil der Wärmerückgewinnung (WÜ) an der Deckung des Heizwärmebedarfs entspricht dem des konventionellen Heizsystems
- interne Gewinne von 200 W

Unter diesen Voraussetzungen kann der Heizwärmebedarf im Januar und Dezember zu 85 % bzw. 87 % gedeckt werden, in allen anderen Monaten zu 100 % (siehe auch Abbildung 10). Dies entspricht einer jährlichen Deckung des Heizwärmebedarfs von 94 % [11]. Dem Sorptionswärmespeicher müssen in diesem Szenario 850 kWh entnommen werden.

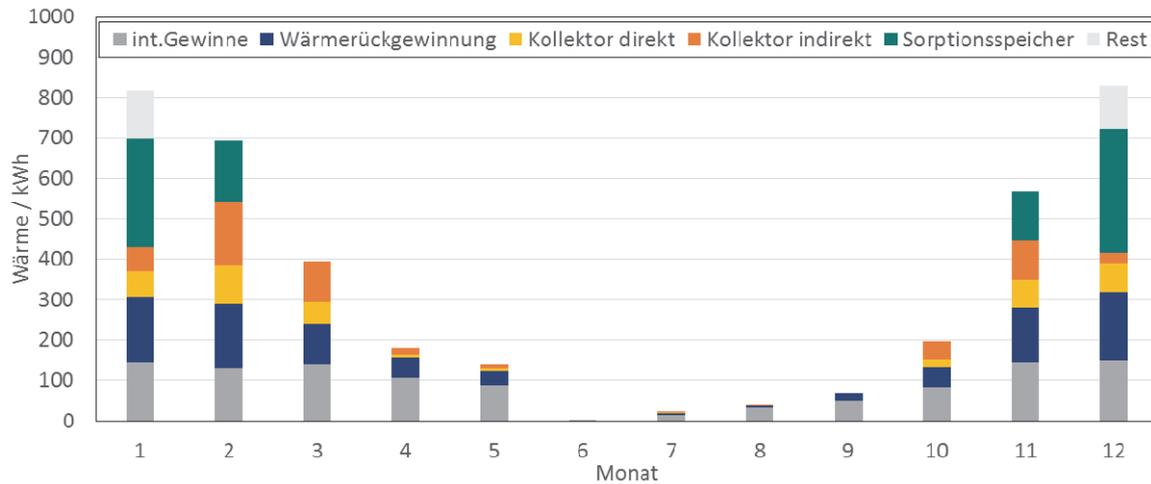


Abbildung 10: Prognose zur Deckung des Heizwärmebedarfs durch das solare Heizsystem

### 2.3 Speichermaterialuntersuchungen und Zyklenstabilität (AP3)

Der zugrundeliegende Mechanismus des Sorptionswärmespeichers für die Energiespeicherung beruht auf dem Prinzip der Ad- und Desorption. Als Adsorbens wird Zeolith verwendet, der im Sorptionswärmespeicher als Festbett aus kugelförmigem Granulat vorliegt. Als Adsorptiv dient der in der Raumabluft vorhandene Wasserdampf.

Bei einer Adsorption wird der Speicher thermisch entladen, die thermische Beladung erfolgt durch die Desorption. Wie in Abbildung 11 gezeigt, strömt beim Adsorptionsprozess feuchte Raumluft durch das Festbett aus Zeolithkugeln. Der Wasserdampf wird vom Zeolith adsorbiert. Dabei wird die Adsorptionsenthalpie frei, wodurch sich eine Temperaturerhöhung der den Speicher durchströmenden Luft ergibt.

Durch die Zufuhr von heißer Luft kann adsorbierter Wasserdampf desorbiert werden. Der Wasserdampf wird dabei mit dem Luftstrom aus dem Sorptionsmaterial transportiert.

**Adsorption:** trockener Zeolith + Wasserdampf → feuchter Zeolith + Wärmefreisetzung

**Desorption:** feuchter Zeolith + Wärmezufuhr → trockener Zeolith + Wasserdampf

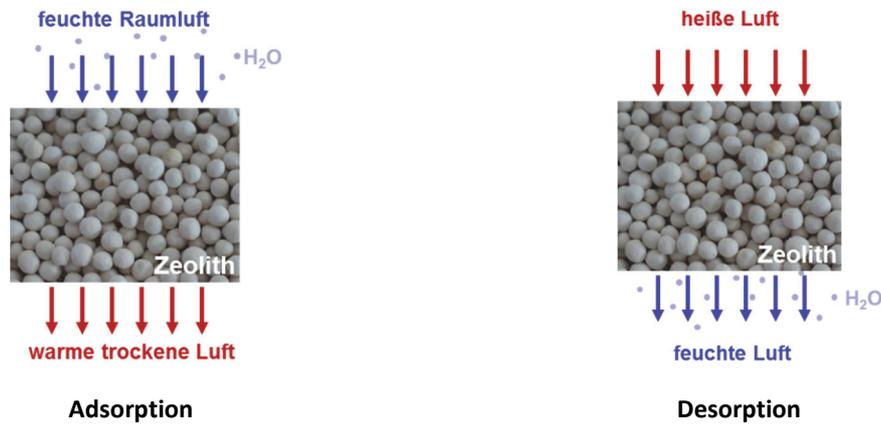


Abbildung 11: Nutzung des Prinzips der Adsorption zur Wärmespeicherung

Mit einem Sorptionsanalysator der Firma Hiden Isochema wurden Sorptionsisothermen verschiedener Speichermaterialien bestimmt. Die Materialien wurden bei Temperaturen bis zu 250 °C und bei Partialdrücken des Wasserdampfs bis zu 50 mbar untersucht, um sowohl den Bereich der Ad- als auch der Desorption abzudecken.

Ein beispielhaftes Ergebnis dieser Messungen ist in Abbildung 12 dargestellt. Dort sind Sorptionsisothermen des binderfreien Zeolithen 13X der Firma Chemiewerke Bad Köstritz und des Zeolithen NaY dargestellt. Auf der x-Achse ist der Wasserdampfpartialdruck in mbar und auf der y-Achse die Wasserbeladung der Sorptionsmaterialien in g/kg aufgetragen. Im Diagramm sind Sorptionsisothermen verschiedener Temperaturen dargestellt. Der Verlauf der Beladung von 13XBF (binderfrei) zeigt bei niedrigem Wasserdampfpartialdruck einen deutlich steileren Anstieg als NaYBF. Zudem ist die absolute mögliche Wasseraufnahme von 13XBF um etwa 3 % größer als bei NaY (bei 15 °C). Dies deutet darauf hin, dass mit dem Material 13XBF eine höhere Energiespeicherdichte zu erzielen ist als mit NaYBF.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind insbesondere von Bedeutung für die numerischen Simulationen in AP5. Um verlässliche numerische Modelle erstellen zu können ist eine möglichst genaue Kenntnis der Sorptionsisothermen des im Modell verwendeten Sorptionsmaterials notwendig.

Neben den eigenen Materialuntersuchungen wurden zusätzlich aktuelle Entwicklungen bezüglich neuer Materialein aufmerksam verfolgt. Aluminophosphate (AlPO), Silicoaluminophosphate (SaPO) sowie Metallorganische Gerüstmaterialien (MOF – metal organic framework) sind vielversprechende Materialien, die allerdings bislang noch teuer und aufwändig in der Herstellung sind und deren Eigenschaften, insbesondere auch die Langzeitstabilität, noch genauer zu untersuchen sind.

Untersuchungen zur Stabilität von Zeolith 4A und 13X, mit und ohne Binder, sind in [3] beschrieben. Für binderfreien Zeolith 13X wird dort im Vergleich zum binderhaltigen Zeolith 13X eine höhere Speicherkapazität und eine schnellere Kinetik beobachtet. Während die Langzeitstabilität für die binderhaltigen Zeolithe sehr gut ist, wird für die binderlosen Zeolithe bei der hydrothermischen Stabilität für sehr hohe Desorptionstemperaturen oder für sehr hohe Feuchten eine Degradation beobachtet. Für Anwendungen mit einer Desorptionstemperatur bis 200 °C wird binderfreier Zeolith 13X hingegen als sehr vielversprechendes Material beschrieben.

Binderfreier Zeolith 13X der Firma CWK (Köstrolith 13XBF) wurde schließlich als das für die Anwendung am besten geeignete Sorptionsmaterial ausgewählt. Der Sorptionswärmespeicher wurde mit 2,9 Tonnen des Materials in Form von kugelförmigen Pellets (Durchmesser 1,6–2,5 mm) befüllt.

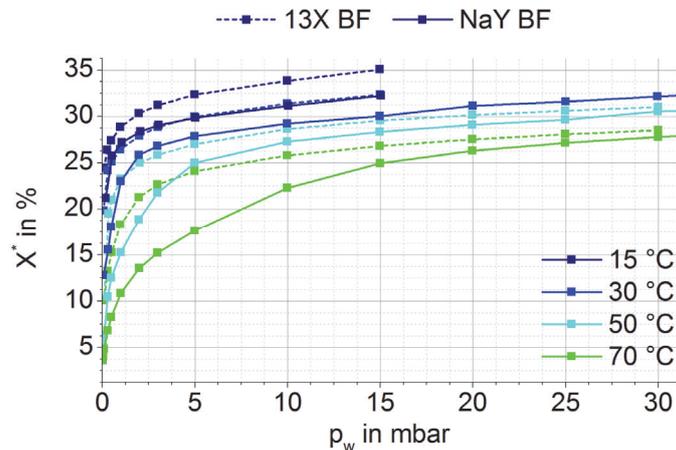


Abbildung 12: Gleichgewichtsbeladung in Abhängigkeit vom Wasserdampfpartialdruck für Zeolith vom Typ 13XBF und NaYBF, Darstellung der Isothermen 15 °C, 30 °C, 50 °C und 70 °C

## 2.4 Entwicklung eines saisonalen Sorptionswärmespeichers (AP4)

Für die Entwicklung des Sorptionswärmespeichers wurde zunächst mit Hilfe von Strömungssimulationen die grundsätzliche Speichergeometrie entworfen. Ein Laborspeicher mit dieser Geometrie wurde in einer Laboranlage in verkleinertem Maßstab aufgebaut und messtechnisch und numerisch untersucht. Das Ziel der Voruntersuchungen an dem Laborspeicher war es, den Ad- und Desorptionsprozess und das Strömungsverhalten an einem realen Speicher zu analysieren, um dann die Erfahrungen in die Entwicklung und den Aufbau des Sorptionswärmespeichers im realen Maßstab für das Gebäude einfließen lassen zu können.

Die Entwicklung des Sorptionswärmespeichers teilt sich demnach in zwei Abschnitte auf: die experimentelle und numerische Untersuchungen an einem Modellspeicher im Labormaßstab und die Entwicklung des Sorptionswärmespeichers im realen Maßstab basierend auf den Ergebnissen aus diesen Voruntersuchungen.

Mit dem ermittelten Heizwärmebedarf des Gebäudes, der Prognose zur Deckung des Bedarfs und Berechnungen zur Speicherkapazität ergab sich für den geplanten Sorptionswärmespeicher ein benötigtes Volumen in der Größenordnung von 4 m<sup>3</sup>. Für einen effizienten Betrieb ist es notwendig eine Speicher in dieser Größenordnung in einzelne Segmente zu unterteilen und die Ad- und Desorption segmentweise vorzunehmen. Durch die Segmentierung sollen ein optimaler Be- und Entladevorgang erreicht werden. Bei einem segmentierten Speicher wird jeweils nur ein Teil des Speichers durchströmt. Bei der Beladung (Desorption) wird dadurch nur ein Teil des Speichers erwärmt, wodurch sich die Wärmeverluste im Vergleich zu einem nicht segmentierten Speicher deutlich reduzieren. Auch der Druckverlust

sinkt, wenn nur ein Speicherteil durchströmt wird und sich die durchströmte Weglänge verkürzt. Weiterhin steht bei der Entladung (Adsorption) die Warmluft schneller zur Verfügung, da nur eine kleinere Masse des Sorptionsmaterials erwärmt werden muss bevor Warmluft aus dem Speicher austritt.

Aus diesen Überlegungen resultiert das grundsätzliche Speicherkonzept, das schematisch in Abbildung 13 dargestellt ist. Durch zwei vertikale Trennwände ergeben sich vier Bereiche, die jeweils nochmals durch horizontale Ebenen unterteilt sind. Auf diese Weise entstehen in jedem Speicherviertel mehrere Segmente.

Wenn Warmluft für die Gebäudebeheizung benötigt wird, wird dem Speicher über ein zentrales, vertikales Einströmröhr Abluft aus dem Wohnraum zugeführt. Die Luft strömt durch das Sorptionsmaterial und wird durch den Adsorptionsprozess erwärmt. Durch eine Luftaustrittsöffnung gelangt die erwärmte Luft in eines der vertikalen Auslassrohre, die sich an den Kanten des Speichers befinden. Jeweils zwei übereinanderliegende Segmenten ist eine gemeinsame Luftaustrittsöffnung zugeordnet. Die Luftaustrittsöffnungen lassen sich öffnen und schließen, so dass die Segmentpaare getrennt voneinander durchströmt werden können. Analog dazu erfolgt auch die Desorption segmentpaarweise. Dazu wird heiße Luft durch das Einströmröhr zugeführt und die desorbierte Feuchtigkeit mit dem Luftstrom ausgetragen.

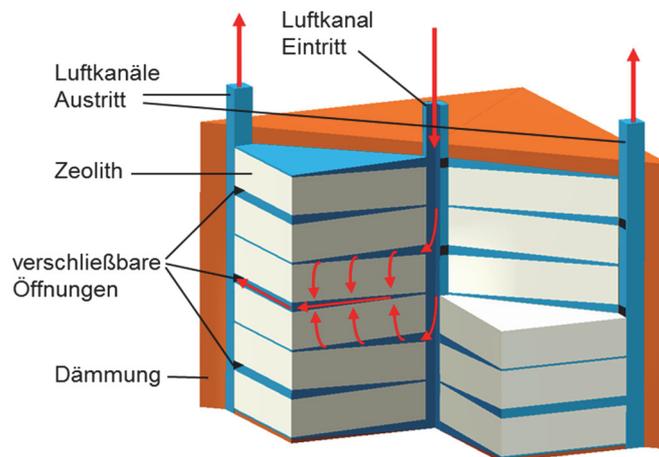


Abbildung 13: Speicherkonzept: segmentierter Sorptionswärmespeicher

#### 2.4.1 Modellspeicher im Labormaßstab

Die für das Forschungsgebäude geplante Sorptionsspeichergröße wurde herunterskaliert und ein Viertel (siehe Abbildung 16 a (violetter Bereich) und b) des verkleinerten Speichers mit sechs Segmenten in einer Laboranlage aufgebaut [8]. Jeweils zwei Segmenten ist eine gemeinsame Luftaustrittsöffnung zugeordnet, so dass die drei Segmentpaare getrennt voneinander durchströmt werden können. Die Laboranlage mit dem Speicherviertel ist in Abbildung 14 gezeigt. Ein Fließbild der Anlage ist in Abbildung 15 gegeben.



Abbildung 14: Laboranlage mit segmentiertem Sorptionswärmespeicher im verkleinerten Maßstab

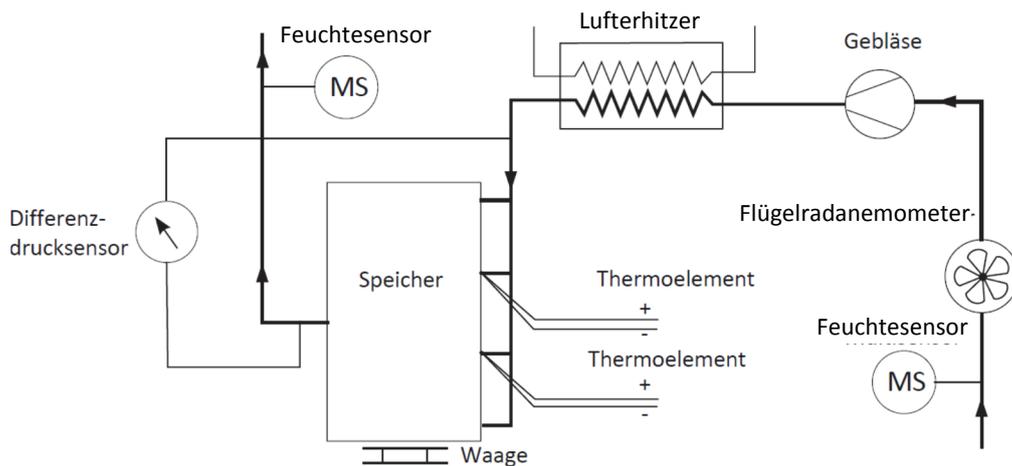


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Laboranlage mit Sorptionswärmespeicher

Anhand von 40 im Speicher positionierten Thermoelementen, deren Positionen in Abbildung 16 d dargestellt sind, wurden Untersuchungen zum Strömungsverhalten sowie zum Ad- und Desorptionsprozess in dem segmentierten Sorptionsspeicher vorgenommen. Eine gleichmäßige Durchströmung des Festbetts in jedem Segment sowie eine gleichlange Entladedauer zweier Segmente eines Segmentpaares sind wichtig, um eine gleichmäßige energetische Entladung der Segmente zu erreichen. Dadurch wird die Austrittstemperatur der erwärmten Luft lange auf konstantem Niveau gehalten und die gespeicherte Energie somit möglichst vollständig nutzbar.

Um die Vorgänge während der Adsorption zu verdeutlichen, werden in Abbildung 17 links exemplarisch die Temperaturverläufe im Festbett von Segment 4 in Ebene 3 (vergleiche Abbildung 16 d) während eines Adsorptionsversuchs betrachtet. Die schematische Durchströmung der Segmente 3 und 4 ist in Abbildung 16 c dargestellt. Luft tritt mit einem Volumenstrom von  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  und mit einer Temperatur von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  in das Segment ein. Die Feuchte entspricht hierbei der Luftfeuchtigkeit des Labors, die zwischen  $3,4 \text{ g/kg}$  und  $4,5 \text{ g/kg}$  liegt.

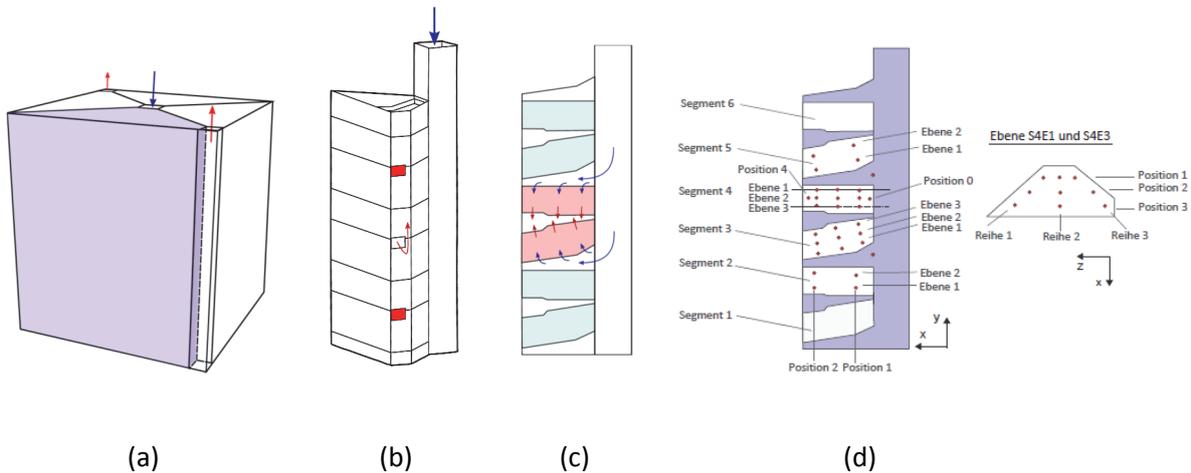


Abbildung 16: Gesamtspeicher (a), Laborspeicherviertel mit einer geöffneten Luftklappe (b), vertikaler Schnitt durch die Mittelebene (aktive Segmente hellrot, inaktive Segmente hellblau) (c), Positionen der Thermoelemente im Laborspeicher (d)

Das Ziel ist, das Segment möglichst gleichmäßig von oben mit der Strömung zu beaufschlagen, so dass sich im Festbett eine homogene Strömungsverteilung einstellt. Ist dies der Fall, dann wandert die Adsorptionsfront an allen Orten mit gleicher Geschwindigkeit durch das Segment. Die Wanderungsgeschwindigkeit der Adsorptionsfront kann mit Hilfe von Temperaturmessungen verfolgt werden. Durch die Adsorption ergibt sich eine Temperaturerhöhung von ca. 14 K. Der anschließende Temperaturabfall an den Messstellen ist steil, jedoch erfolgt der Beginn des Temperaturabfalls an den Messstellen in einem Zeitfenster von etwa 4 Stunden, was auf eine noch nicht ganz homogene Durchströmung schließen lässt. Optimal wäre ein gleichzeitiger Temperaturabfall an allen Messstellen. Sowohl die Durchströmung als auch die Anfangsbeladung haben einen Einfluss auf die Adsorptionsdauer. Die Temperaturen an Position 3 in den Reihen 1 und 3 fallen zuerst ab. Die Ursache kann darin begründet liegen, dass die Durchströmungslänge an den Positionen 3 kürzer und die Strömungsgeschwindigkeit dadurch höher ist.

Die heiße Luft für die Desorption wird an der Laboranlage mit einem elektrischen Luftherhitzer erzeugt. In Abbildung 17 rechts ist der Temperaturverlauf im Segment 4 in Reihe 2 während einer Desorption aufgetragen. Dort wird in dem Festbett aus Zeolith eine nahezu einheitliche Temperatur erreicht und das Sorptionsmaterial gleichmäßig regeneriert. An einigen Positionen in Reihe 1 und 3 wird am Versuchsende eine niedrigere Temperatur erreicht als an den anderen Messstellen. Die Gründe hierfür können Wärmeverluste an die Umgebung oder eine ungleichmäßige Durchströmung sein. Anzumerken bleibt, dass die Wärmeverluste an die Umgebung bei dem Speicher für das Gebäude im Verhältnis kleiner ausfallen werden als beim Laborspeicher, da sich die beim Laborspeicherviertel außen liegenden Seitenwände dann innerhalb des Speichers befinden.

Bei dem Laborspeicher sind die übereinander angeordneten Segmente nicht luftdicht voneinander getrennt. Eine entscheidende Frage ist deshalb, ob über längere Zeiträume ein unbeabsichtigter Beladungsaustausch zwischen benachbarten Segmenten durch Diffusionsvorgänge stattfindet. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Wasserdampfdiffusion zwischen benachbarten, übereinander angeordneten be- und entladenen Segmentpaaren, bei einem Stillstandszeitraum von 24 Tagen zwischen Desorption und nachfolgender Adsorption, vernachlässigbar ist.

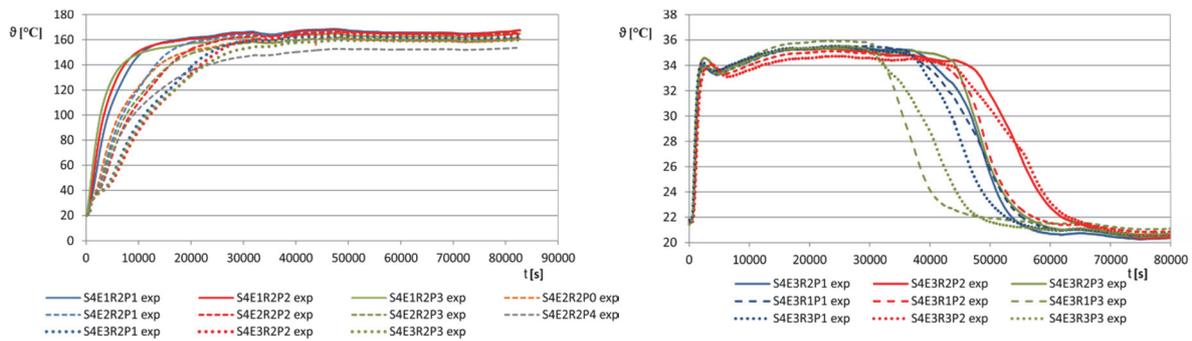


Abbildung 17: Temperaturverläufe im Festbett von Segment 4 bei der Desorption (links) und bei der Adsorption (rechts)

Es wurde beobachtet, dass bei der Adsorption ein nicht unerheblicher Anteil der entnommenen Wärme aus den inaktiven Nachbarsegmenten stammt. Bei der Desorption führt eine Wärmeabgabe an inaktive Nachbarsegmente zu einer etwas ungleichmäßigen Trocknung des Festbetts. Dieses Verhalten könnte gegebenenfalls durch bauliche Einrichtungen wie Klappen verhindert werden. Um die Konstruktion einfach und kompakt zu halten und die Anzahl bewegter Teile auf ein Minimum zu reduzieren wurde darauf verzichtet, solche Vorrichtungen beim Speicher für das Gebäude vorzusehen.

Aus den Experimenten im Labor geht hervor, dass ein gewisses Optimierungspotential in Bezug auf die gleichmäßige und gleichzeitige Durchströmung der Segmente besteht. Einer inhomogenen Durchströmung der Segmente oder einer ungleichlangen Be- bzw. Entladungsdauer zweier Segmente eines Segmentpaares kann etwa durch geometrische Anpassungen der Segmente entgegengewirkt werden. Entsprechende Untersuchungen der Strömungsführung und des Ad- und Desorptionsverhaltens wurden mit CFD-Methoden durchgeführt. Das Simulationsmodell zur Abbildung der Strömung und des Ad- und Desorptionsprozesses wurde mit den Messdaten der Experimente am Laborspeicher validiert. Insgesamt konnte eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Messdaten festgestellt werden, so dass ein geeignetes Werkzeug für weitere Untersuchungen zur Verfügung stand.

In Abbildung 18 oben sind exemplarisch drei Temperaturfelder aus einer Simulation zu verschiedenen Zeiten eines Adsorptionsvorgangs in einem Segmentpaar der Laborspeicher-geometrie dargestellt. Nach einer Zeit von 13.000 s bzw. 3,6 h hat die Adsorptionsfront das obere Segment bereits nahezu vollständig durchlaufen, während die Adsorption im unteren Segment noch nicht abgeschlossen ist. Die Temperatur der aus dem Sorptionspeicher austretenden Luft wird dadurch absinken und die noch verbleibende Energie aus dem unteren Segment kann nicht mehr vollständig genutzt werden. Die drei unteren Abbildungen zeigen die Temperaturfelder in einer bezüglich der Be- bzw. Entladungsdauer optimierten Geometrie. Die Adsorptionsfront durchläuft beide Segmente in der gleichen Zeit. Mit dieser Geometrie lässt sich durch die gleichlange Entladungsdauer in beiden Segmenten und dem daraus resultierenden gleichzeitigen Temperaturabfall in beiden Segmenten sowie durch die bessere Raumausnutzung die effektiv nutzbare Energie um ca. 15 % im Vergleich zur Laborspeicher-geometrie erhöhen.

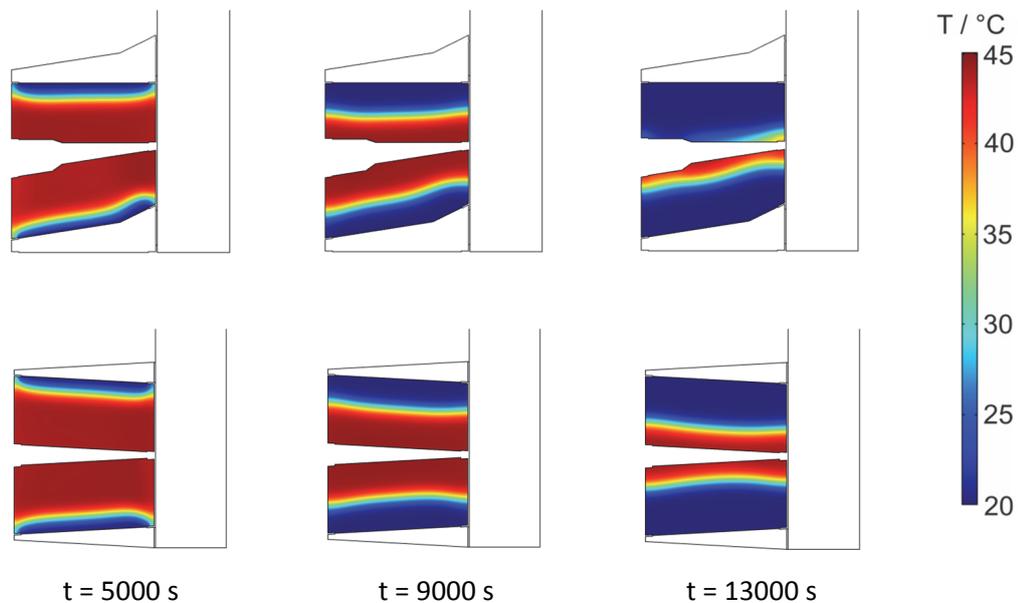


Abbildung 18: Temperaturverteilung in einem Speichersegmentpaar zu drei verschiedenen Zeiten während einer Adsorption, Laborspeichergeometrie (oben), optimierte Geometrie (unten)

## 2.4.2 Entwicklung und Konstruktion des Sorptionswärmespeichers

Aufbauend auf den numerischen Untersuchungen sowie auf den experimentellen Voruntersuchungen an einem Speicher im Labormaßstab erfolgte die Entwicklung und Konstruktion des Sorptionswärmespeichers im realen Maßstab für das Gebäude.

### 2.4.2.1 Energiespeicherdichte und Speichervolumen

Die Gleichgewichtsbeladung des Adsorbens hängt von der Temperatur und vom Partialdruck des Adsorptivs, in diesem Fall des Wasserdampfs in der Luft, ab. Die theoretische Energiespeicherdichte des Sorptionswärmespeichers kann mit den Isothermen des Zeolith 13XBF, wie in Abbildung 19 gezeigt, bestimmt werden. Die angestrebte Desorptionstemperatur bei der Regeneration des Sorptionswärmespeichers beträgt 180 °C. Die Adsorption wird mit Raumluft bei ca. 20 °C durchgeführt. Bei einem angenommenen Wasserdampfpartialdruck von 10 mbar (6,55 g/kg) beträgt die Beladungsänderung zwischen be- und entladem Zustand 0,24 kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>tr.zeolith</sub> (vergleiche Abbildung 19). Die Adsorptionseenthalpie ändert sich mit der Wasserdampfbeladung  $X_s$  des Sorptionsmaterials. Die Adsorptionseenthalpie  $\Delta h_{ads}$  wurde für diese Berechnung konstant mit einem gemittelten Wert von 3600 kJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> [4] angenommen. Mit der Schüttdichte von 680 kg<sub>zeolith</sub>/m<sup>3</sup> ergibt sich eine Energiespeicherdichte von 163 kWh/m<sup>3</sup>. Die Energiespeicherdichte ist damit um den Faktor 2,7 größer als bei einem Warmwasserspeicher ( $\Delta T = 50$  K). Wird die Speicherzeit berücksichtigt, erhöht sich dieser Faktor noch: Für einen Warmwasserspeicher gleicher Größe (gleiches Füllvolumen und gleiche Gesamtspeichergröße) mit einer Wärmeverlustrate von 5 W/K steigt der Faktor für eine beispielhafte Speicherzeit von zwei Wochen auf 5. Bei einer angenommenen Speicherzeit von 4 Wochen wäre der Faktor 11.

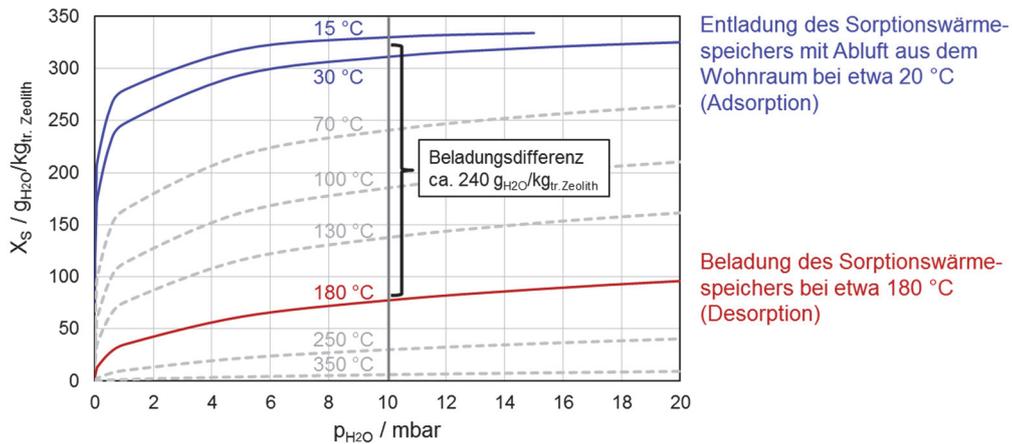


Abbildung 19: Isothermen des Sorptionsmaterials Zeolith 13XBF und Wasserdampf [5], Beladungsdifferenz zwischen be- und entlademem Zustand

Basierend auf den Prognoserechnungen (Abschnitt 2.2.5), den baulichen Gegebenheiten im Gebäude und den konstruktiven Randbedingungen wurde das Materialvolumen des Sorptionswärmespeichers auf 4,3 m<sup>3</sup> festgelegt. Unter Zugrundelegung der oben genannten Beladungsdifferenz ergibt sich damit eine Energiespeicherkapazität von 700 kWh.

#### 2.4.2.2 Segmentierung des Speichers

Die Besonderheit des für diesen Anwendungsfall neu entwickelten Sorptionswärmespeichers ist dessen Unterteilung in mehrere Segmente. Diese Segmentierung, als wesentliches Merkmal des Sorptionswärmespeichers, wird hier nochmal im Detail erläutert. Die Vorteile bzw. Gründe für die Unterteilung werden im Folgenden dargestellt:

- Die Durchströmung einer Kugelschüttung ist mit einem Druckverlust verbunden. Je größer die durchströmte Länge und je höher der Volumenstrom ist, desto höher ist der Druckverlust. Soll der Druckverlust, und damit die Gebläseleistung, klein bleiben, so ist ein kurzer Durchströmungsweg und ein großer Strömungsquerschnitt von Vorteil. Beides kann durch eine Segmentierung des Speichers erreicht werden.
- Bei der Desorption wird der Speicher auf hohe Temperaturen aufgeheizt. Bedingt durch die nur tagsüber vorhandene Einstrahlung ist die tägliche Desorptionszeit begrenzt. Dadurch ist es aufgrund der Wärmekapazität des Speichers schwierig, den gesamten Speicher auf ein hohes Temperaturniveau zu bringen. Zudem treten bei einem großen heißen Speichervolumen hohe Wärmeverluste auf.
- Besteht Heizwärmebedarf, muss Wärme schnell verfügbar sein. Bei einem offenen Adsorptionsprozess wandert die Adsorptionsfront in Strömungsrichtung durch das Sorptionsmaterial. Die frei werdende Adsorptionsenthalpie wird mit dem Luftstrom abtransportiert und erwärmt zunächst das stromabwärts gelegene Sorptionsmaterial. Je größer der Sorptionswärmespeicher und damit dessen Wärmekapazität ist, desto träger ist das Verhalten und desto länger dauert es, bis Warmluft zum Heizen zur Verfügung steht.
- Die gespeicherte Wärme wird nicht kontinuierlich benötigt, sondern zeitlich versetzt in kleineren Einheiten. Eine direkte Messung des Beladungszustands des Speichers ist

während des Betriebs nicht möglich. Bei einem großen Speicher führt diese stückweise Adsorption zu einem undefinierten Beladungszustand und zu dem oben genannten trägen Verhalten.

Vor diesem Hintergrund wird der Speicher in mehrere Segmente unterteilt, die einzeln be- und entladen werden können. Insgesamt führt die Segmentierung zu einer verbesserten thermischen Leistungsfähigkeit des Speichers bzw. macht die Durchströmung einer großen Materialmenge überhaupt erst möglich. Eine schematische Darstellung des segmentierten Sorptionswärmespeichers ist in Abbildung 20 links gegeben. Nach weiterführenden numerischen Untersuchungen wurden die vertikalen Trennwände im Speicher nicht wie beim Laborspeicher auf den Diagonalen (vergleiche Abbildung 16), sondern parallel zu den Seitenwänden positioniert. Dies verspricht eine homogenere Durchströmung der Segmente sowie eine Vereinfachung bei der konstruktiven Umsetzung. Der Speicher ist damit in vier Quadranten (Q1-Q4) aufgeteilt, die jeweils horizontal in sechs Segmente (S1-S6) unterteilt sind. Dadurch entstehen insgesamt 24 flache Segmente. Luft tritt in den zentralen Eintrittskanal ein und verlässt den Speicher durch einen der vier Austrittskanäle entlang der vertikalen Speicherkanten. Rechts in Abbildung 20 ist ein vertikaler Schnitt durch den Speicher dargestellt. Je zwei übereinanderliegende Segmente bilden ein Segmentpaar, ihnen ist eine gemeinsame Luftaustrittsöffnung zum Austrittskanal hin zugeordnet. Jedes Segmentpaar kann separat durchströmt werden. In Abbildung 20 ist der Strömungsweg beispielhaft für ein mittleres Segmentpaar gezeigt. Die Auswahl der Segmentpaare wird durch das Öffnen und Schließen von Luftöffnungen an den Austrittskanälen durch einen Schiebermechanismus realisiert (vergleiche Abschnitt 2.4.2.4). Diese Schieber sind die einzigen beweglichen Teile innerhalb des Speichers.

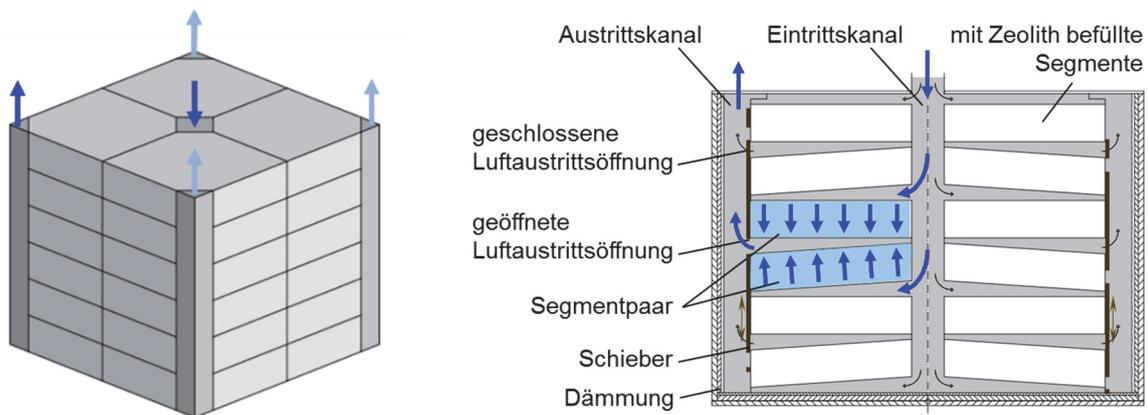


Abbildung 20: Schematische Darstellung des segmentierten Sorptionswärmespeichers (links) und vertikaler Schnitt durch den Speicher (rechts)

Die Segmente wurden flach und mit großem Strömungsquerschnitt entworfen, um den Druckverlust über das Festbett aus Zeolith gering zu halten. Bei einem gesamten Volumen von  $4,3 \text{ m}^3$  beinhaltet jedes Segment 177 Liter Zeolith (siehe Abschnitt 2.4.2.1). Die Füllhöhe jedes Segments beträgt 25 cm, was einem kurzen Durchströmungsweg entspricht. Der mit  $0,708 \text{ m}^2$  große Strömungsquerschnitt führt zu einer geringen Strömungsgeschwindigkeit. Der Druckverlust über ein Segment berechnet sich nach der Ergun Gleichung (2) zu 13 Pa für einen Luftmassenstrom von 85 kg/h.

$$\frac{|\Delta p|}{L} = k_1 \cdot \frac{\mu}{d_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot u_\infty + k_2 \cdot \frac{\rho}{d_p} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot u_\infty^2 \quad (2)$$

### 2.4.2.3 Konstruktion und bauliche Umsetzung der Segmente

Nach der Festlegung der Größe und der Geometrie der Segmente folgten Festigkeitsberechnungen bezüglich der Segmentböden, die die Schüttung aus Zeolithkugeln in jedem Segment tragen. Unterstützt wurden die Untersuchungen durch experimentelle Versuche zur Biegebelastung an einem Modellaufbau. Jedes Speichersegment beinhaltet ein Volumen von 177 Litern Zeolith. Bei einer Schüttdichte von  $680 \text{ kg}_{\text{Zeolith}}/\text{m}^3$  entspricht dies einer Masse von 120,4 kg trockenem Zeolith, der darüber hinaus noch über 30 % Wasser aufnehmen kann. Der tragende Boden der Segmente muss sowohl die notwendige Steifigkeit besitzen, als auch einen großen freien Querschnitt aufweisen um die Durchströmung zu ermöglichen. Ein Stahlgitter mit stabilisierendem L-Profil als Diagonalstrebe wird als tragender Segmentboden eingesetzt und ein feinmaschiges Metallgewebe aufgelegt.

An einem weiteren Modellsegment im verkleinerten Maßstab (siehe Abbildung 21) wurde die Auflagefläche aus feinmaschigem Metallgewebe, auf der die Kugelschüttung auf dem Stahlgitter aufliegt, experimentell untersucht. Ein Aspekt war der Übergang von der Auflagefläche zu den Seitenwänden. Das Metallgewebe überlappt das Stahlgitter. Die Überlappung wird an die Seitenwände angelegt und daran fixiert. Die beschriebene Konstruktion zeichnet sich durch hohe Stabilität bei geringer thermischer Masse aus.

Um zu verhindern, dass sich auf der flachen Segmentoberfläche beim Betrieb durch die Luftströmung im Zeolith Unebenheiten bilden, wird jedes Segment mit einem Glasgewebe abgedeckt und mit einem Wellengitter beschwert. Die Auswahl eines Glasgewebes erfolgte auch anhand von Messungen des Druckverlusts an dem Modellsegment.

Der realisierte Segmentaufbau ist in Abbildung 22 schematisch dargestellt.



Abbildung 21: Modellsegment im verkleinerten Maßstab, Ansicht von oben (links), Ansicht von unten (rechts)

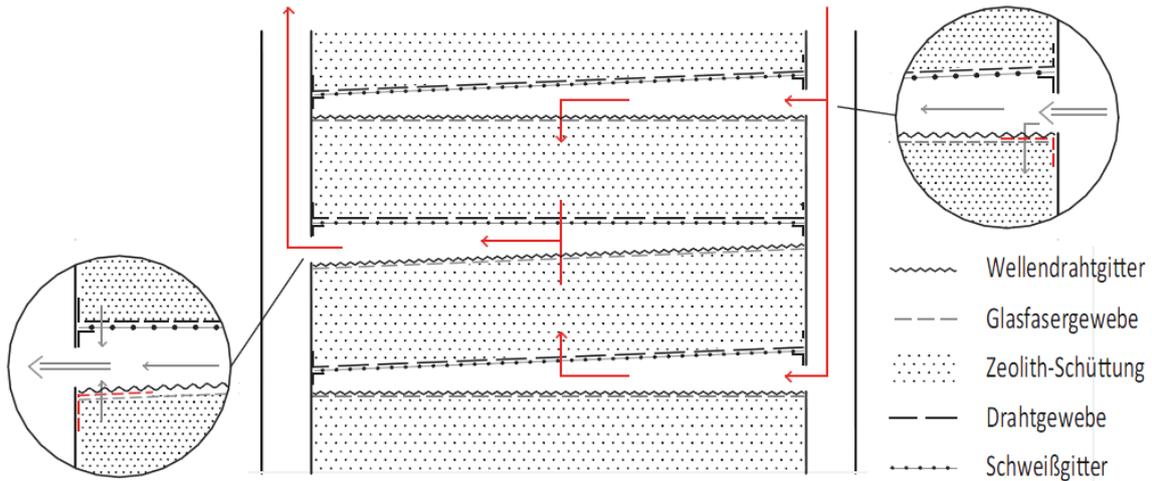


Abbildung 22: Segmentaufbau

#### 2.4.2.4 Aktivierung eines Segmentpaares

Es wurde ein Mechanismus zur Anwahl eines aktiven Segmentpaares entwickelt. Jedem Segmentpaar des Sorptionswärmespeichers ist eine Luftaustrittsöffnung zugeordnet, durch die die durch das Segmentpaar strömende Luft in einen der vier Austrittskanäle gelangt (vergleiche Abbildung 20). Damit die Segmentpaare einzeln durchströmt werden können, müssen die Öffnungen separat verschließbar sein. Das Öffnen und Schließen wird mit einem Schiebermechanismus realisiert. Durch einen mit Motor in der Höhe verfahrbaren Schieber (einem Metallstreifen mit 3 Öffnungen) lassen sich einzelne Luftaustrittsöffnungen öffnen oder alle Luftaustrittsöffnungen verschließen (siehe Abbildung 23). Die Positionsbestimmung erfolgt über vier Schalter, die durch einen am Schieber angebrachten Auslöser betätigt werden.

Für die Erprobung des Mechanismus wurde ein Austrittskanal als Modell aufgebaut (siehe Abbildung 24). Die Funktionalität des Schiebers mit der verwendeten Filzdichtung wurde, insbesondere auch bei hohen Temperaturen, untersucht und bestätigt.

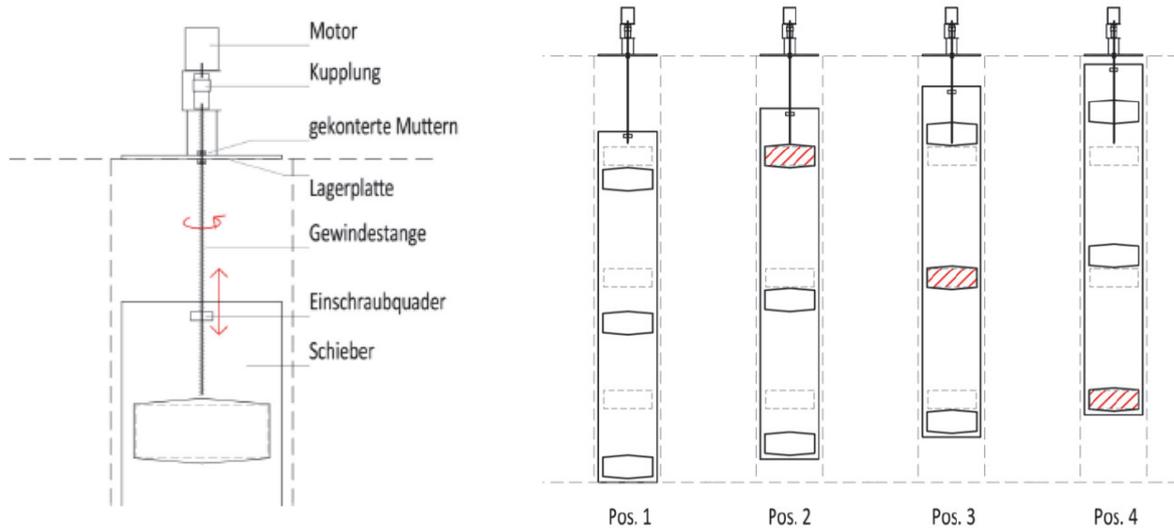


Abbildung 23: Komponenten des Schiebemechanismus (links); Schieberpositionen (rechts): Pos. 1: alle Segmente des Quadranten geschlossen, Pos. 2: oberes Segmentpaar geöffnet, Pos. 3: mittleres Segmentpaar geöffnet, Pos. 4: unteres Segmentpaar geöffnet



Abbildung 24: Schiebermodell zur Schaltung der Segmente (Mechanismus zur Realisierung der segmentpaarweisen Speicherdurchströmung)

#### 2.4.2.5 Luftaustrittskanäle

An jeder vertikalen Speicherkante wird ein gewinkeltes Blech angebracht. Dadurch entstehen vier vertikale Austrittskanäle mit dreieckigem Strömungsquerschnitt, in die die aus den Segmenten austretende Luft gelangt. An den oben umlaufenden Kanten des Speichers befindet sich ein Luftkanal. Die Luft aus den vertikalen Austrittskanälen wird in diesem Kanal zum Speicheraustritt geführt. Die Luftführung ist in Abbildung 25 dargestellt.

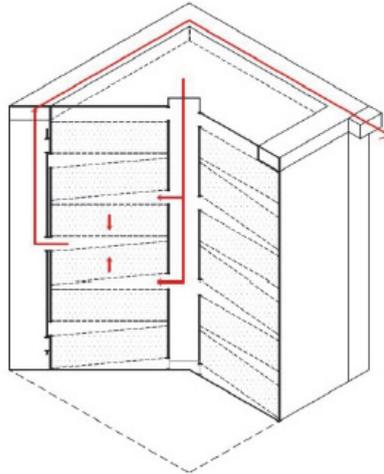


Abbildung 25: Luftaustrittskanäle an den vertikalen Speicherkanten und entlang der horizontalen Kanten auf der Speicheroberseite

#### 2.4.2.6 Trenn- und Seitenwände des Speichers

Für die vertikalen Trennwände im Speicher, sowie für Decke, Boden und Speicherseitenwände werden Platten mit hoher Temperaturbeständigkeit, guter mechanischer Belastbarkeit sowie möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit benötigt. Dämmplatten auf Calciumsilikatbasis (Fa. Promat) erwiesen sich in Bearbeitungs- und Ofenversuchen als geeignet.

#### 2.4.2.7 CAD-Konstruktion des Traggerüsts

Nach der Festlegung der Segmentgeometrie und den Berechnungen und Modellvorversuchen erfolgte die Konstruktion des Traggerüsts des Sorptionspeichers. Die CAD-Konstruktion erfolgte am ITW. An das Traggerüst werden hohe Anforderungen gestellt. Um das Gewicht des Sorptionsmaterials von nahezu 3 Tonnen zu tragen wird eine hohe Tragfähigkeit gefordert, bei gleichzeitig geringem Materialeinsatz um die Wärmekapazität gering zu halten. Weiterhin soll das Traggerüst, insbesondere in vertikaler Richtung, eine möglichst kleine Wärmeleitfähigkeit aufweisen, um eine Wärmeausbreitung zwischen verschiedenen Segmenten zu vermeiden. Vertikale Tragelemente wurden daher, aufgrund der kleineren Wärmeleitfähigkeit, in Edelstahl ausgeführt. Alle anderen Komponenten bestehen aus schwarzem Stahl. Eine CAD-Zeichnung des Speichergerüsts ist in Abbildung 26 gezeigt. Der Zusammenbau erfolgte direkt im SolSpaces Gebäude (siehe Abschnitt 2.7.2).

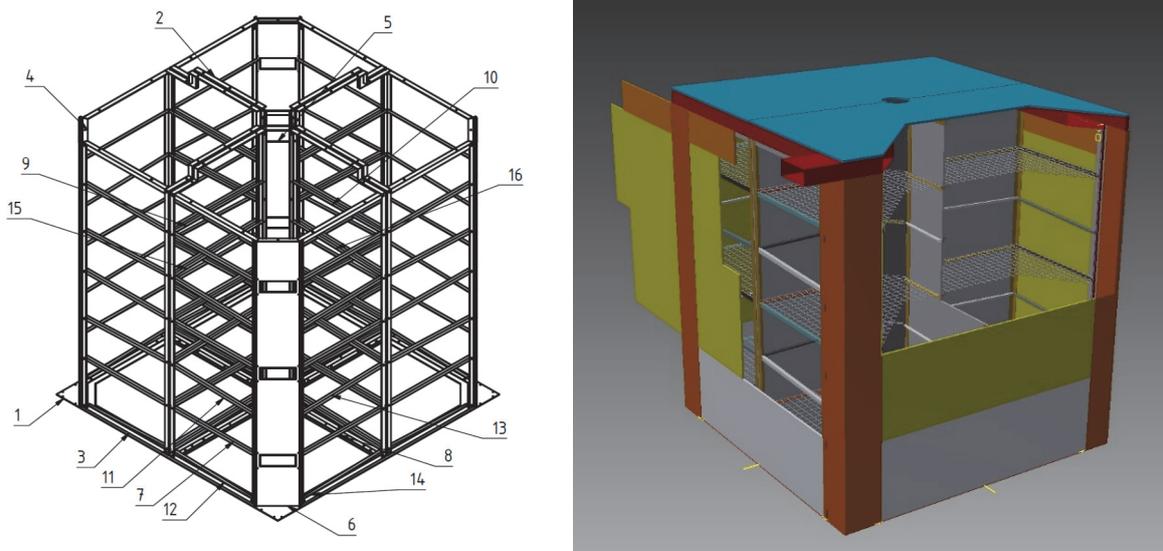


Abbildung 26: CAD-Zeichnungen des Sorptionswärmespeichertraggerüsts (rechts mit teilweise dargestellten Seitenwänden und Segmentböden)

#### 2.4.2.8 Speicherdämmung

Für die Dämmung des Sorptionswärmespeichers wurden hochtemperaturgeeignete Polyurethan-Hartschaumplatten (Fa. Puren) verwendet. Die Platten weisen eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf und zeigten ein zufriedenstellendes Verhalten bezüglich Verarbeitbarkeit und Temperaturbeständigkeit.

#### 2.4.2.9 Messtechnikkonzept

Das Messtechnikkonzept für den Sorptionswärmespeicher sieht den Einbau von 60 kalibrierten Thermoelementen in den Speicher vor, um den Verlauf der Ad- und Desorptionen verfolgen zu können (vergleiche Abbildung 27). Die meisten Thermoelemente wurden in das mittlere Segmentpaar (Segmente 3 und 4) des ersten Quadranten (Q1) eingebaut. Diese befinden sich in jedem Segment auf zwei senkrecht zur Strömungsrichtung stehenden Ebenen (E1, E2), vergleiche Abbildung 27 Mitte. Die Bezeichnungen der Positionen auf den Ebenen sind in Abbildung 27 rechts dargestellt. Eine geringere Anzahl von Thermoelementen wurde im oberen und unteren Segmentpaar von Quadrant 1 sowie im benachbarten Quadranten 2 angebracht, um Effekte an die angrenzenden Segmente zu erfassen. In Abbildung 28 sind die Messpositionen der Segmente 3 und 4 in Quadrant 1 und 2 dargestellt.

Weitere Temperaturmessungen erfolgen am Speicherein- und -austritt, in den Rohrleitungen der Frisch-, Fort-, Zu- und Abluft, rund um den Wärmeübertrager, am Kollektorein- und -austritt, in den Räumen sowie in der Umgebung.

Die Globalstrahlung wird mit einem Pyranometer (Fa. Kipp&Zonen) in Kollektorebene gemessen.

In Wohnraum und Umgebung wird die Feuchte mit kapazitiven Feuchtesensoren (Fa. Michell Instruments, Typ WM291) in Ab- und Fortluft mit Taupunktspiegelhygrometern (Fa. Michell Instruments, Typ Optidew) gemessen.

Für die Bilanzierung der Wärmeströme und der Feuchte werden Normvolumenströme der Frisch-, Fort- und Zuluft mit Hitzdrahtanemometern (Fa. Höntzsch, Typ TA/U10a) gemessen.

Weiterhin wird die aufgenommene elektrische Energie der Lüfter, der Messtechnik, des elektrischen Heizstabs zur Unterstützung der Desorption, der Fußbodenheizung und der elektrischen Heizelemente (PTC) zur Nachheizung der Zuluft erfasst.

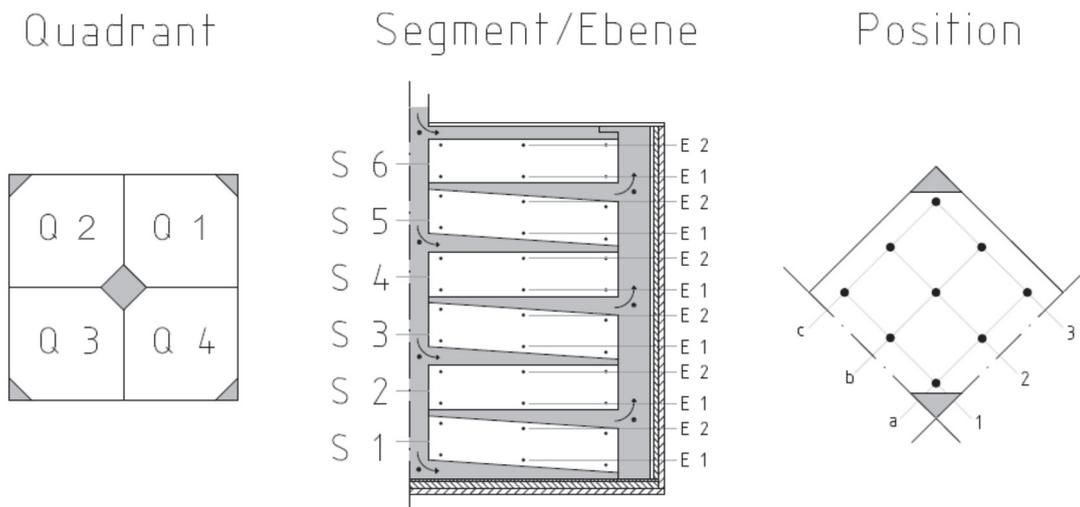


Abbildung 27: Unterteilung des Speichers in vier Quadranten in der Draufsicht (links), vertikaler Schnitt durch einen Quadranten mit möglichen Positionen für die Temperaturmessung (Mitte), horizontaler Schnitt durch ein Segment mit möglichen Positionen für die Temperaturmessung (rechts)

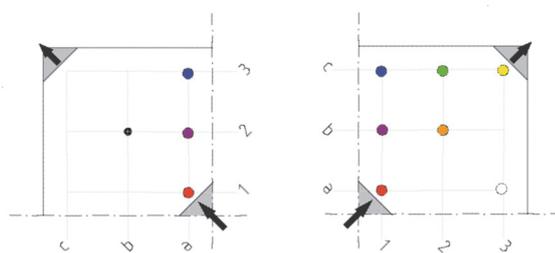


Abbildung 28: Quadrant 2 (links), Quadrant 1 (rechts), horizontaler Schnitt durch Segment 3 oder 4 mit dortigen Positionen für die Temperaturmessung

## 2.5 Entwicklung eines detaillierten numerischen Modells zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens des Heizsystems (AP5)

Für das Gebäude sowie für den Sorptionswärmespeicher wurden Modelle entwickelt, die im Folgenden beschrieben werden.

### 2.5.1 Gebäudemodell

Das SolSpaces Gebäude wurde mit dem Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm TRNSYS abgebildet und das Modell anhand der Messdaten validiert.

Der Energiebedarf des Gebäudes und die äußeren Randbedingungen wie Umgebungstemperatur, Globalstrahlung, etc. sind aus den Messdaten aus dem ersten Monitoringjahr (AP2) bekannt. Die gemessenen thermischen und elektrischen Energieströme über die Gebäudehülle sind in Abbildung 29 dargestellt.

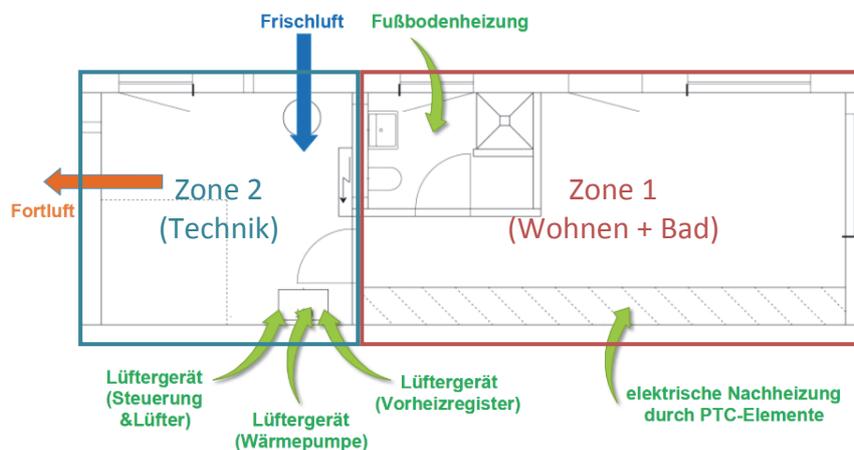


Abbildung 29: Thermische und elektrische Energieströme

Das Gebäude wurde mit dem Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm TRNSYS detailliert abgebildet. Im Modell wird das Gebäude in zwei Zonen aufgeteilt (vergleiche Abbildung 29). Eine Zone beinhaltet den Technikraum, die andere Zone fasst Wohnraum und Bad zusammen. Diese Annahme ist aufgrund der dauerhaft geöffneten Badezimmertür während des ersten Monitoringjahrs gerechtfertigt.

Für einen Vergleich des Gebäudemodells mit den Messdaten des realen Gebäudes werden dem Modell die gemessenen Raumtemperaturen in Technikraum und Wohnraum als Solltemperaturen vorgegeben. Die Einhaltung dieser Solltemperaturen wird im Modell mit einem idealen Heizer und einem idealen Kühler realisiert. Ideale Heizer und Kühler zeichnen sich dadurch aus, dass sie keine Leistungsbegrenzung haben, masselos sind und ideal geregelt werden können. Die Energiebilanz des Gebäudes nach Abbildung 29 ergibt sich dann als Differenz der Energien von idealem Heizer und Kühler (siehe Abbildung 30). In Abbildung 30 sind zudem die Anfangs- und Randbedingungen dargestellt.

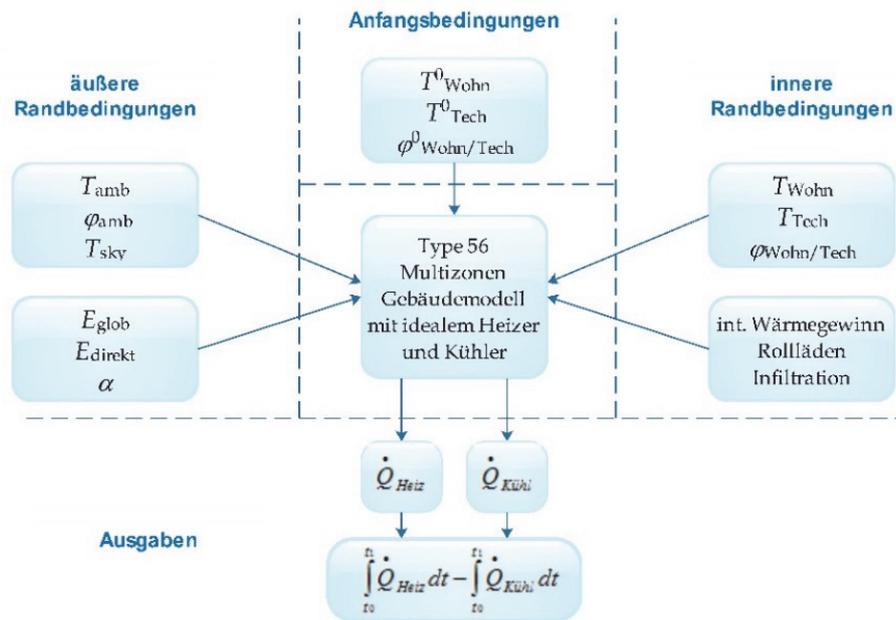


Abbildung 30: Anfangs- und Randbedingungen für das Gebäudemodell

Modellparameter sind unter anderem der Wärmedurchgangskoeffizient der opaken Bauteile  $U_{\text{opak}}$ , der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasungen  $U_g$ , der Energiedurchlassgrad der Verglasungen  $g$ , der solare Absorptionsgrad  $\alpha$ , die Infiltrationsrate und interne Wärmegewinne durch Abwärme von Messtechnik und Warmwasserspeicher.

Für ein Referenzmodell wurden die Werte der Modellparameter zunächst basierend auf Literatur- und Herstellerangaben ( $U_{\text{opak}}$ ,  $U_g$ ,  $g$ ,  $\alpha$ , Infiltrationsrate, interne Wärmegewinne durch Warmwasserspeicher) oder Messwerten (interne Wärmegewinne durch Messtechnik) vorgegeben.

Mit einem Parameteridentifikationsverfahren für  $U_{\text{opak}}$ , die Infiltrationsrate und den solaren Absorptionsgrad wurde der Energiebedarf des Gebäudes an die Messdaten angepasst. Die Parameteridentifikation wurde monatsweise durchgeführt. In strahlungsarmen Monaten (November, Dezember) wurde zunächst der  $U_{\text{opak}}$ -Wert angepasst, danach anhand der anderen Monate (März, April, Mai, September, Oktober) die Infiltrationsrate und der solare Absorptionsgrad. Wie in Abbildung 31 dargestellt resultiert ein Modell, das das Gebäudeverhalten gut wiedergibt.

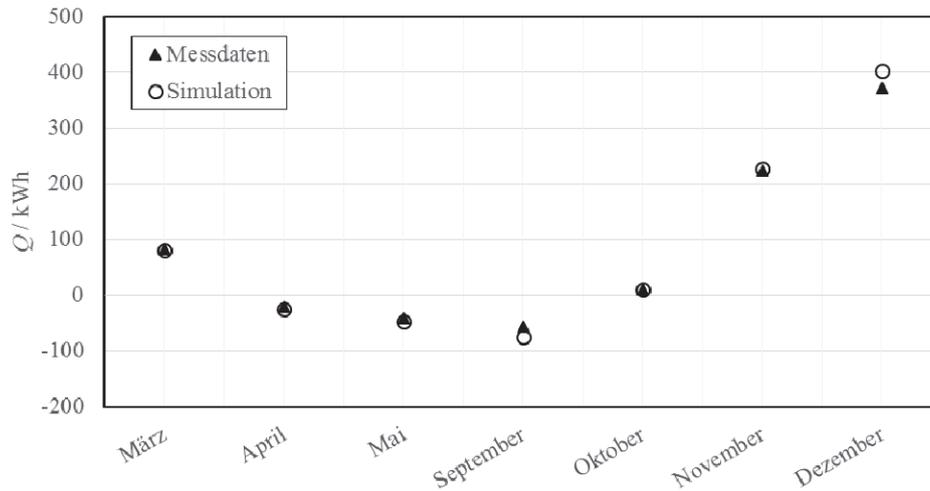


Abbildung 31: Vergleich der Messdaten und Simulationsergebnisse des Gebäudemodells (monatliche Bilanz der Energieströme nach Abbildung 29)<sup>3</sup>

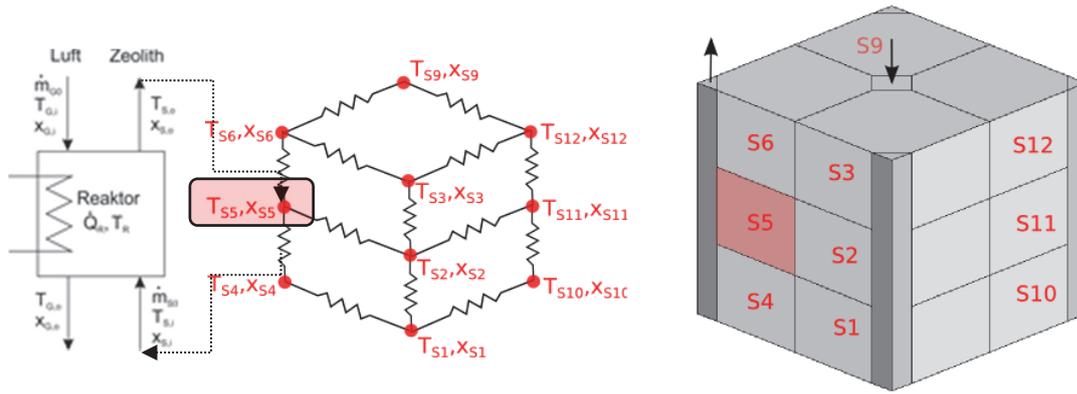
### 2.5.2 Modell des Sorptionswärmespeichers

Ein TRNSYS-Modell für den Sorptionsspeicher wurde entwickelt, das im Folgenden kurz vorgestellt wird. In Abbildung 32 ist der prinzipielle Aufbau des Modells dargestellt. Dieses basiert auf zwei selbst entwickelten TRNSYS-Komponenten (Types):

Type 355 modelliert einen thermischen Knoten als Speicherbehälter mit einer gegebenen thermischen Masse (trockener Zeolith), einer veränderlichen Temperatur und einem Beladungsgrad; mehrere Type 355 können durch Angabe der jeweiligen Wärmeleitwiderstände untereinander oder auch mit der Umgebung „verknüpft“ werden, so dass ein thermisches Netzwerk entsteht (vergleiche Abbildung 32). Zusätzlich kann ein Materialfluss spezifiziert werden, der dem Speicherbehälter (Knoten) Material mit der momentanen Knoten-temperatur und -beladung entnimmt, und mit einer veränderten Temperatur und/oder Beladung zurückführt. In TRNSYS wurde jedes Doppelsegment des Speichers mit einem Type 355 modelliert, um die Wärmeleitung innerhalb des Speichers (d.h. zwischen den 12 Segmentpaaren) und an die Umgebung in vereinfachter Weise abzubilden.

Die Sorptionsprozesse im Zeolith werden separat mit dem Type 349 abgebildet. Dieser Reaktortype wird jeweils mit demjenigen Segmentpaar „verknüpft“, welches gerade aktiv mit Luft durchströmt werden soll. Abhängig von Temperatur und Feuchtigkeit des eintretenden Luftstroms sowie des Zeolith-Beladungsgrads im aktiven Segmentpaar, nimmt der Zeolith im „Reaktor“ Feuchtigkeit auf und setzt Wärme frei (Adsorption), oder gibt unter Wärmeaufnahme Feuchtigkeit an den Luftstrom ab (Desorption). Im Type 349 werden die chemischen Gleichgewichte (Adsorptionsisothermen) des eingesetzten Zeolith 13XBF hinterlegt. Weitere Details zur mathematischen Modellierung finden sich in [6].

<sup>3</sup> Die dargestellten Werte entsprechen nicht den monatlichen Energiebedarfen des Gebäudes. In der Bilanz sind die internen Wärmegewinne nicht enthalten. In einigen Monaten fehlen zum Teil Messdaten aufgrund von Unterbrechungen in der Messdatenaufzeichnung. Negative Werte können sich ergeben, wenn über den Luftstrom Energie abgeführt wird.



1 x Type 349

12 x Type 355

Abbildung 32: Prinzipieller Aufbau des numerischen SolSpaces-Sorptionswärmespeicher-Modells: realer Speicher mit Segmentpaaren S1-S12 (rechts), thermisches 12-Knoten Netzwerk in TRNSYS (Mitte) mit Kopplung des aktiv durchströmten Segmentpaares (S5) an das Sorptionsmodell (Reaktor-Type) (links)

## 2.6 Entwicklung eines Konzepts zur vollständigen Wärmeversorgung auf solarthermischer Basis (AP6)

In diesem Arbeitspaket wurde das Konzept zur Wärmeversorgung auf solarthermischer Basis entwickelt. Die Komponenten des solaren Heizsystems sind in Abbildung 33 gezeigt. Weiterhin wurden die Detailplanungen für die Auslegung und den Einbau der solarthermischen Komponenten Kollektor, Speicher und Speicherperipherie vorgenommen. Für den Betrieb des solaren Heizungssystems wurde eine Regelstrategie entwickelt, die die Schaltung der Betriebszustände beinhaltet.

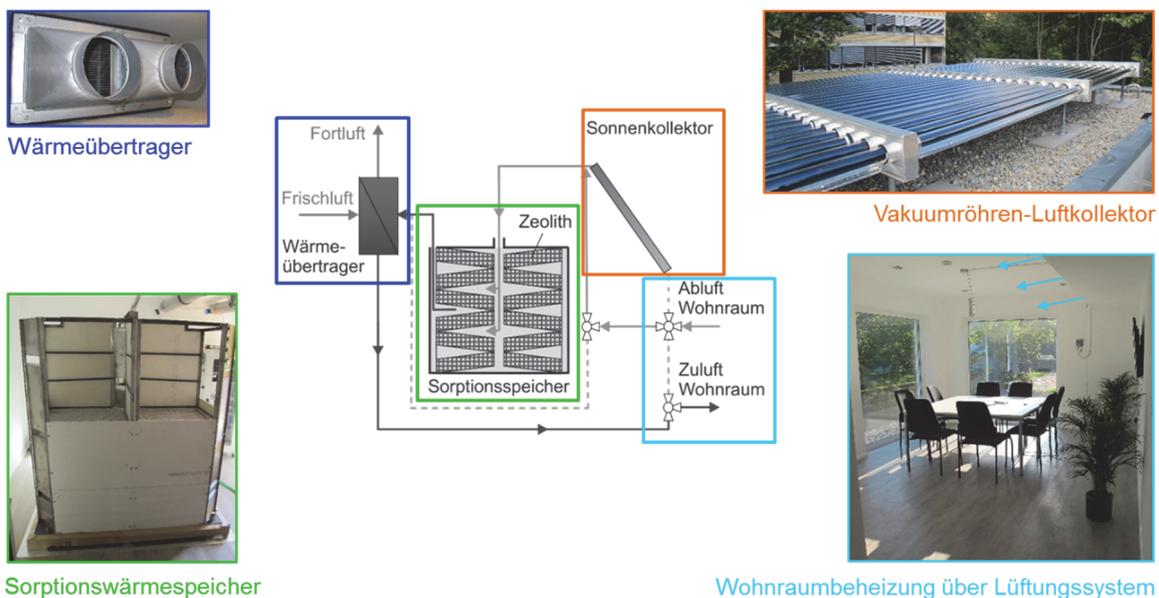


Abbildung 33: Komponenten des solaren Heizsystems

### 2.6.1 Betriebszustände

Das solare Heizsystem wird, je nach Heizwärmebedarf und vorhandener Strahlung, in einem passenden Betriebsmodus betrieben. Drei Betriebsarten des solaren Heizsystems sind beispielhaft in Abbildung 34 dargestellt. Die Betriebsarten werden nachfolgend erläutert:

**Heizen mit Kollektor:** Die Abluft aus dem Wohnraum wird im Sonnenkollektor erwärmt. Im Wärmeübertrager wird die Wärme an die zugeführte Frischluft übertragen. Die erwärmte Frischluft wird dem Wohnraum zur Beheizung zugeführt.

**Heizen mit Sorptionswärmespeicher (Adsorption):** Der Sorptionswärmespeicher wird mit der Abluft aus dem Wohnraum durchströmt. Die Feuchtigkeit aus der Abluft wird vom Sorptionsmaterial adsorbiert, wodurch sich die den Speicher durchströmende Luft erwärmt. Im Wärmeübertrager wird die Wärme an die zugeführte Frischluft übertragen. Die erwärmte Frischluft wird dem Wohnraum zur Beheizung zugeführt.

**Heizen mit Kollektor und Sorptionswärmespeicher:** Diese Betriebsart ist eine Kombination aus den beiden vorangehend beschriebenen Betriebsarten. Die Abluft aus dem Wohnraum wird zuerst durch den Kollektor und anschließend durch den Sorptionswärmespeicher geführt.

**Regeneration des Sorptionswärmespeichers (Desorption):** Die Frischluft wird im Sonnenkollektor erhitzt und strömt durch den Sorptionswärmespeicher. Der bei der Desorption frei werdende Wasserdampf wird mit dem Luftstrom aus dem Speicher ausgetragen. Im Wärmeübertrager wird die eintretende Frischluft durch die Fortluft vorgewärmt.

**Vorwärmung oder Regeneration des Sorptionswärmespeichers (Winterdesorption):** Diese Betriebsart wird nur im Winter bzw. während der Heizperiode aktiviert. Solarer Überschuss wird zur Vorwärmung des Sorptionswärmespeichers bzw. zur Speicherung fühlbarer Wärme (und ggf. auch zur Desorption) verwendet.

**Lüftung:** Die Abluft aus dem Wohnraum wird über den Wärmeübertrager direkt an die Umgebung abgeführt. Die Frischluft passiert den Wärmeübertrager und wird dem Wohnraum zugeführt.

**Reduzierte Lüftung:** Entspricht dem Betriebszustand Lüftung, jedoch mit reduziertem Luftvolumenstrom.

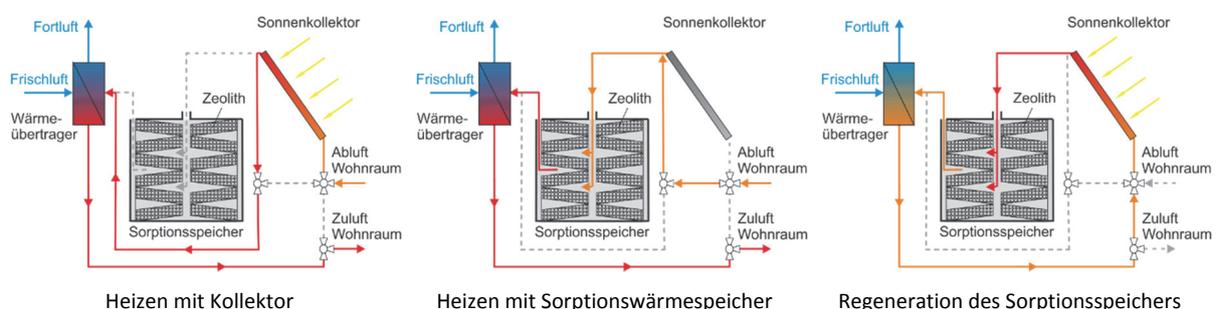


Abbildung 34: Ausgewählte Betriebsarten des solaren Heizsystems

### 2.6.2 Segmentauswahl

Der Speicher besitzt 12 Segmentpaare, von denen jeweils nur eines aktiv ist, d.h. durchströmt wird. Das Umschalten zwischen den Segmentpaaren erfolgte zunächst manuell, die Entscheidung wurde auf Basis der Messdaten getroffen. Eine automatische Segmentauswahl kann zukünftig mithilfe der gespeicherten Daten wie der zuletzt erfolgten Betriebsart und -dauer, Temperaturen und Feuchten realisiert werden. Eine entsprechende Regelung wurde vorbereitet, aber noch nicht eingesetzt. Die manuelle Segmentauswahl erschien in der momentanen Phase noch geeigneter um Betriebserfahrungen zu sammeln und flexibel auf die erfassten Systemzustände und Randbedingungen zu reagieren.

### 2.6.3 Regelstrategie

Für den automatischen Betrieb des solaren Heizsystems wurde eine Regelstrategie entwickelt, die schematisch in Tabelle 2 dargestellt ist. Das grundlegende Prinzip ist eine Einteilung in verschiedene Heizbedarfstufen, die von 4 bis -2 reichen. Positive Zahlen bedeuten Heizbedarf, d.h. die Raumtemperatur liegt unterhalb der Solltemperatur. Die Abstufung erfolgt von hohem Heizbedarf (4) zu niedrigem Heizbedarf (1). Null oder negative Zahlen (-1, -2) bedeuten kein Heizbedarf, d.h. die Raumtemperatur liegt oberhalb der Solltemperatur. Jede Heizbedarfstufe umfasst eine bestimmte Temperaturspanne. Die Temperaturspannen bleiben jeweils gleich groß, das Temperaturniveau richtet sich dagegen nach der vorgegebenen Raumsolltemperatur und kann sich, z.B. bei Nachtabsenkung nach unten verschieben. In jeder Heizbedarfstufe können verschiedene Betriebsmodi aktiviert werden. Deren Priorität sinkt von oben nach unten in der Tabelle. Abhängig von der Heizbedarfstufe können einige Betriebsarten nur im Sommer, einige nur im Winter aktiviert werden. Ob eine Betriebsart letztlich ausgewählt wird, hängt von weiteren Ein- und Ausschaltbedingungen ab.

Die Solltemperatur im Raum beträgt 20 °C am Tag und 18 °C in der Nacht (bis Januar 2016, dann 19 °C bei Nacht). Wenn die Raumsolltemperatur erreicht ist, wird der Desorptionsmodus freigegeben. Sofern ein entladenes Segmentpaar vorhanden ist, kann dieser Modus aktiviert werden, falls die Solarstrahlung ausreicht, um die minimale Desorptionstemperatur (70 °C) zu erreichen.

Bei mittlerer Strahlung während der Heizperiode (wenn die Kollektortemperatur 50 °C überschreitet) ist es auch möglich, ein entladenes Segmentpaar tagsüber mit dem Kollektor aufzuwärmen, um die fühlbare Wärme während der Nacht zum Heizen zu nutzen.

Wenn die Raumtemperatur unter die Solltemperatur fällt (Heizbedarfstufe größer 0) wird der Heizbetrieb aktiviert, bevorzugt direkt mit dem Kollektor. Dies ist der Fall, wenn am Kollektor eine höhere Temperatur als im Raum vorhanden ist. Anderenfalls erfolgt die Beheizung durch Adsorption, sofern ein beladenes Segmentpaar zur Verfügung steht. Im Winter kann auch in Heizbedarfstufe 0 und -1 noch mit Kollektor geheizt werden, um die Raumtemperatur weiter anzuheben (auf bis zu 25 °C).

Der Zwischenmodus Heizen mit Kollektor und Adsorption wird gewählt, falls die Kollektortemperatur höher als die Raumtemperatur ist, aber noch nicht zum direkten Heizen mit Kollektor ausreicht.

Falls die solare Beheizung nicht ausreichen sollte, um die vorgegebene Solltemperatur zu erreichen, kann zusätzlich die elektrische Nachheizung (PTC-Heizelemente) aktiviert werden.

Im Sommer erfolgt, sofern keine Desorption möglich ist, ein reiner Lüftungsbetrieb falls die Raumtemperatur größer als die Umgebungstemperatur ist. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, schaltet das System in den Modus reduzierte Lüftung mit geringem Luftmassenstrom (Frischluftzufuhr aber möglichst geringer Energieeintrag in das Gebäude).

Im Modus reduzierte Lüftung wird das System auch immer dann betrieben, wenn kein anderer Modus ausgewählt werden konnte, weil die entsprechenden Bedingungen nicht erfüllt sind.

Tabelle 2: Regelstrategie für das solare Heizsystem

		← steigende Raumtemperatur →						
Heizbedarfstufen		-2	-1	0	1	2	3	4
Priorität ↓	Betriebsarten							
	Desorption			Sommer				
	Vorwärmung (Winterdesorption)		Winter					
	Heizen mit Kollektor + Adsorption							
	Heizen mit Kollektor		Winter					
	Heizen durch Adsorption				Winter			
	Lüftung			Sommer				
	Reduzierte Lüftung							
Zusätzliche Nachheizung (PTC)								

#### 2.6.4 Umsetzung der Regelstrategie (Reglerbibliothek)

Die Regelung ist in einer Reglerbibliothek<sup>4</sup> zusammengefasst (C-Programm). Über Schnittstellen ist eine Kommunikation mit dem LabVIEW-Messprogramm oder dem TRNSYS-Simulationsprogramm möglich. Die Regelung kann dadurch sowohl für die Gebäude- und Anlagensimulation als auch für den Betrieb der realen Anlage verwendet werden. In Abbildung 35 ist der Zusammenhang graphisch dargestellt. Eingangsgrößen, wie Messwerte oder manuelle Eingaben, werden im Programm verarbeitet. Entsprechend der hinterlegten Ein- und Ausschaltkriterien der Regelstrategie, werden Ausgangsgrößen, als Stellgrößen für die Anlagenkomponenten, ausgegeben. Die erarbeitete Regelstrategie wurde anhand von Anlagensimulationen erprobt.

<sup>4</sup> Die Reglerbibliothek C702, programmiert in C, besteht aus einem allgemeine Teil (ctrl702.c, ctrl702.c) und einem projektspezifischen Teil. Letztgenannter enthält individuelle Ein- und Ausschaltbedingungen und alle Regelalgorithmen für die benutzerspezifische Regelaufgabe (ctrl702\_user.c, ctrl702\_IO.h). Darüber hinaus wird in tabellarischer Form eine Datei "control702.def" benötigt, die die Regelmatrix, d.h. die Definitionen der Betriebsarten der Anlage mit den entsprechenden Schaltzuständen (für Ventilatoren, Ventile, ...) enthält. Darin können Mindesthalte- oder Sperrzeiten sowie spezielle Regelparameter (Schaltgrenzen, Hysteresen, ...) vorgegeben werden, die dann im Programmcode (ctrl702\_user.c) verwendet werden. Mit einer Excelvorlage kann sowohl die Datei (control702.def) als auch die Datei (ctrl702\_IO.h) erzeugt werden, der Header-Datei mit den variablen Ein- und Ausgangsspezifikationen. Alle C-Dateien (ctrl702.c, ctrl702.c, ctrl702\_user.c, ctrl702\_IO.h) werden kompiliert und in der dynamischen Reglerbibliothek "C702DLL.dll" verlinkt.

Die Datei control702.def wird von den Schnittstellen-Routinen für LabVIEW oder TRNSYS gelesen und die Informationen in einem Initialisierungsaufwurf an die C702 Bibliothek übergeben. Die Benutzerroutine calc() in ctrl702\_user.c wird dann kontinuierlich aufgerufen, mit aktuellen Eingangsvariablen. Basierend darauf wird eine Betriebsart ausgewählt. Die Ausgänge werden dann entsprechen dieser Betriebsart gesetzt.

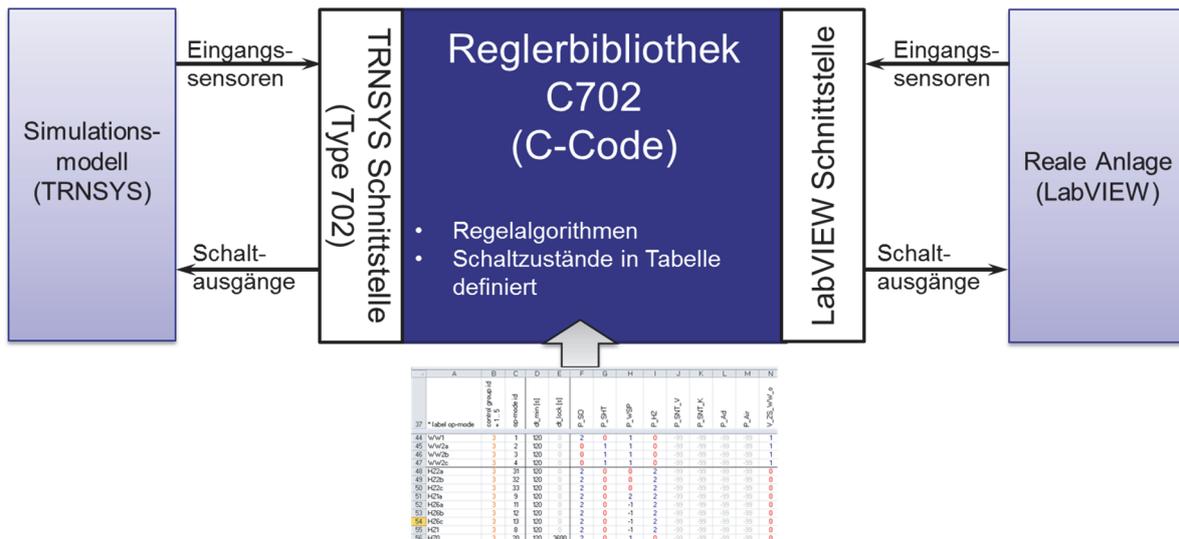


Abbildung 35: Datenfluss zwischen Reglerbibliothek und realer Anlage (LabVIEW) und zwischen Reglerbibliothek und Gebäude- und Anlagenmodell (TRNSYS)

## 2.6.5 Kollektorauslegung

Da die Gebäudebeheizung über ein Lüftungssystem erfolgt und der Sorptionswärmespeicher mit Luft betrieben wird, bietet sich der Einsatz eines Luftkollektors anstelle eines Wasserkollektors an. Dadurch kann ein Luft/Wasser-Wärmeübertrager eingespart werden. Ein weiterer Vorteil ist die Unempfindlichkeit gegenüber Frost im Winter sowie gegenüber Stagnation im Sommer.

Um die hohen Anforderungen bei der Desorption zu erfüllen muss ein Vakuumröhren-Luftkollektor mit Reflektor verwendet werden. Es sind nur wenige Hersteller von Vakuumröhren-Luftkollektoren bekannt, deren Kollektoren zum Teil einen hohen Druckverlust bei der Durchströmung aufweisen. Der Kollektor vom Typ TSTair der Firma Airwasol erschien für diese Anwendung am geeignetsten.

Die Reflektorgeometrie für den Kollektor wurde am ITW mithilfe eines Raytracingprogramms erarbeitet. Aus Fertigungstechnischen Gründen wurde die optimale Reflektorgeometrie (CPC) durch Liniensegmente angenähert (siehe Abbildung 36). Der Reflektor wurde vom Kollektorhersteller aus kommerziell verfügbarem Reflektorblech gefertigt.

Die Auslegung des Kollektors erfolgte am ITW anhand von TRNSYS-Simulationen. Das Ergebnis ist ein Kollektor mit 88 Röhren und einer Fläche von 26 m<sup>2</sup>. Die Berechnungen auf Basis der Herstellerdaten zeigen, dass die hohen benötigten Temperaturen und Leistungen für die Desorption mit diesem Kollektor erreicht werden können (vergleiche auch Abbildung 58 blaue Kurve).

Der Druckverlust im Kollektor ist durch den relativ großen Strömungsquerschnitt der Röhren (Innendurchmesser 50 mm) bei kleinen Volumenströmen unkritisch. Selbst bei einem Volumenstrom von 250 m<sup>3</sup>/h liegt der Druckverlust in den Röhren nur in der Größenordnung von 75 Pa (zuzüglich Sammler).

Für den Anschluss der Kollektorluftleitungen an das Lüftungssystem des Gebäudes wurden von der Firma Schwörer zwei Durchbrüche im Dach des SolSpaces Gebäudes vorgesehen.

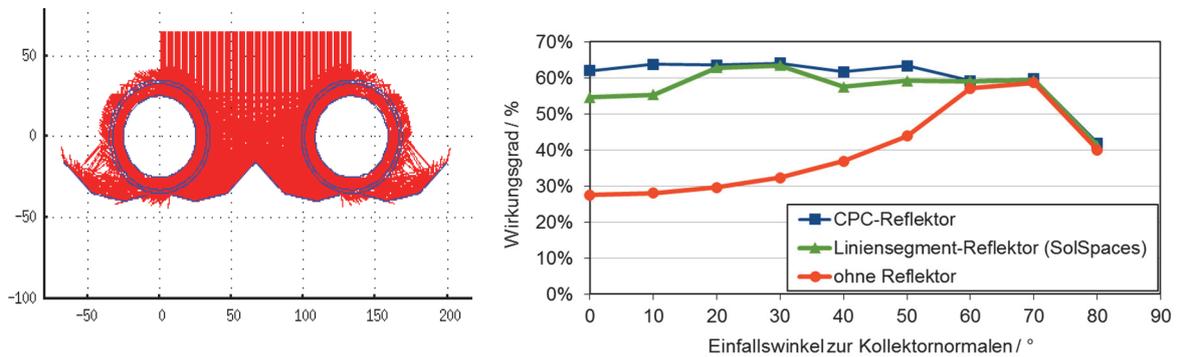


Abbildung 36: Reflektorentwurf im Raytracingprogramm (links), Kollektorwirkungsgrad bezogen auf die Bruttofläche in Abhängigkeit vom Einfallswinkel für unterschiedliche Reflektorgeometrien (rechts)

### 2.6.6 Berechnung der Heizleistung des Sorptionswärmespeichers

Die thermische Leistung des Sorptionswärmespeichers kann nach den Gleichungen 3 und 4 berechnet werden. Gleichung 3 beschreibt die durch die aufgenommene Luftfeuchte frei werdende Adsorptionsleistung. Gleichung 4 ist der dem Speicher über den Luftstrom entnommene Wärmestrom.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot \Delta x \cdot \Delta h_{\text{ads}} \quad (3)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{Luft}}^{\text{Sp,aus}} - T_{\text{Luft}}^{\text{Sp,ein}}) \quad (4)$$

Darin ist  $\dot{m}_{\text{Luft}}$  der Luftmassenstrom,  $\Delta x$  die Feuchtedifferenz zwischen Speicherein- und -austritt,  $\Delta h_{\text{ads}}$  die Adsorptionsenthalpie und  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität der Luft.

Die gemessene Raumfeuchte aus dem ersten Monitoringjahr in dem unbewohnten Gebäude betrug in der Zeit von November 2014 bis Februar 2015 durchschnittlich 4,5 g/kg. Für eine mittlere Adsorptionsenthalpie von 3600 kJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> und für einen Luftmassenstrom von 85 kg/h (Luftwechselrate 0,61/h), beträgt die erreichbare thermische Leistung 383 W. Die zugehörige Temperaturerhöhung beträgt 16 K.

Es ist zu beachten, dass die Feuchte durch Personen, Kochen, Duschen, etc., in bewohnten Gebäuden höher ist als in unbewohnten Gebäuden. Eine höhere Feuchte führt bei gleichem Massenstrom zu einer höheren thermischen Leistung. Bei einer angenommenen Erhöhung der Feuchte um 1,5 g/kg [1], ergibt sich eine Feuchte von 6 g/kg, die bei gleichem Luftmassenstrom zu einer thermischen Leistung von 510 W führt. Die sich ergebende Temperaturerhöhung beträgt 21,5 K. Falls erforderlich kann die thermische Leistung durch Anpassung des Luftmassenstroms erhöht werden. Bei einer Luftwechselrate von 1/h steht etwa eine Leistung von 832 W zur Verfügung.

### 2.6.7 Speicherperipherie

Die Planungsarbeiten bezüglich der Speicherperipherie umfassten unter anderem die Auslegung der Ventilatoren für das Lüftungssystem entsprechend des berechneten Druckverlusts

sowie die Auslegung des Wärmeübertragers für die Wärmerückgewinnung. Die Rohrleitungsführung, wie in Abbildung 37 dargestellt, wurde festgelegt. Dabei wurde insbesondere auf kurze Wege der heißen Luft führenden Rohre geachtet. Die zum Teil langen Rohrleitungen der Frischluft oder Fortluft sind der Normvolumenstrommessung der Luft geschuldet, für die lange Einlaufstrecken benötigt werden. Zudem sollten die vorhandenen Wanddurchbrüche verwendet werden. Zur Schaltung zwischen den verschiedenen Betriebszuständen (Heizen mit Kollektor, Heizen mit Sorptionswärmespeicher, Desorption des Sorptionswärmespeichers, etc.) werden im Lüftungssystem zwei Absperrklappen und zwei Bypassklappen mit Motorantrieben benötigt. Diese sind mit metallischen Lagern und Silikondichtungen ausgestattet, um der hohen Desorptionstemperatur standzuhalten.

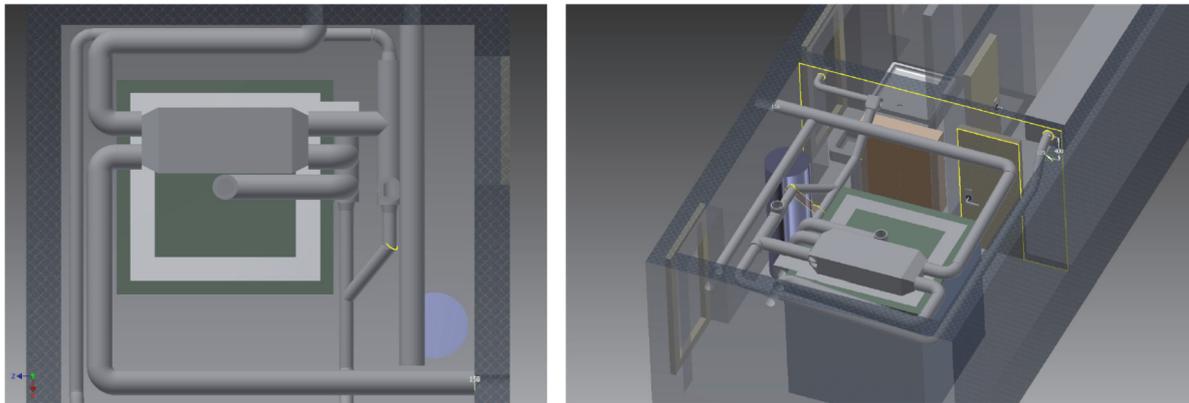


Abbildung 37: Rohrleitungsführung im Technikraum des SolSpaces Gebäudes

## 2.7 Einbau, Inbetriebnahme und messtechnische Erfassung der solarthermischen Wärmeversorgung (AP7)

Der entwickelte segmentierte Sorptionswärmespeicher wurde direkt im SolSpaces Gebäude aufgebaut. Mit dem Aufbau wurde im April 2015 begonnen. Die Befüllung des Speichers mit Sorptionsmaterial sowie die Ausstattung mit Messtechnik erfolgten parallel zum Aufbau des Traggerüsts. Der Kollektor wurde im März 2015 installiert. Die Inbetriebnahme des solaren Heizsystems erfolgte im September 2015.

### 2.7.1 Montage des Kollektors

Der Vakuumröhren-Luftkollektor mit Reflektor wurde auf dem Dach des SolSpaces Gebäudes montiert (Abbildung 38). Im Oktober 2015 war aufgrund des nachlassenden Vakuums ein Austausch der Röhren notwendig.



Abbildung 38: Vakuurröhren-Luftkollektor mit Reflektor auf dem Dach des SolSpaces Gebäudes

### 2.7.2 Aufbau und Befüllung des Sorptionswärmespeichers

Der Speicher wurde im Technikraum des Gebäudes mit einem Abstand von 50 cm zur Wand positioniert, um rundum eine gute Zugänglichkeit zu gewährleisten.

Um den Bodenaufbau des Technikraums während der Desorption vor zu hohen Temperaturen zu schützen, wurde eine Aluminiumplatte zur Verteilung der Wärme vorgesehen. Darauf liegen eine 10 cm dicke PU-Hartschaumdämmung, eine Silicatplatte und das Bodenteil des Traggerüsts aus Stahl.

Auf das Kreuz des Bodenteils (siehe Abbildung 39 links) werden vier vertikale Zwischenwände montiert, die die Quadranten voneinander abgrenzen. Die Zwischenwände bestehen aus Silicatplatten, die mit einem Stahlrahmen eingefasst sind. Die Zwischenwände werden in der Speichermitte mit Blechen verbunden, so dass im Zentrum des Speichers der Einlasskanal mit quadratischem Querschnitt entsteht (siehe Abbildung 39 Mitte). Je drei rechteckige Ausschnitte in den Blechen bilden später die Eintrittsöffnungen zu den Segmentpaaren.

An den vertikalen Außenkanten des Speichers werden ebenfalls Bleche mit je drei rechteckigen Aussparungen angebracht, die die Austrittsöffnungen der Segmentpaare bilden (siehe Abbildung 39 rechts). Entlang der horizontalen Außenkanten auf der Oberseite wird der Speicher mit L-Profilen verbunden und erlangt dadurch an Stabilität. In jedem Quadranten werden auf 6 Höhen rundum L-Profile angebracht, die als Auflage für die Segmentböden dienen.



Abbildung 39: Bodenaufbau, zentraler Lufteintrittskanal, Traggerüst

An die Speicheraußenwände werden, von unten beginnend, Silicatplatten angebracht (siehe Abbildung 40 links). Das Einlegen der Segmentböden und die Befüllung mit Zeolith erfolgt ebenfalls von unten nach oben. Die Segmentböden bestehen aus einem tragenden Stahlgitter und einem darauf aufliegenden feinen Metallgewebe. Die Stahlgitter werden mit einem L-Profil auf der Diagonalen versteift. Die Metallgewebe sind größer als die Stahlgitter, die so entstehenden Ränder des Metallgewebes werden an die Silicatplatten angelegt und fixiert (siehe Abbildung 40 Mitte).



Abbildung 40: Montage der Seitenwände, Einsetzen der Segmentböden, Befüllung mit Zeolith

Auf die Zeolithschüttung wird in jedem Segment ein Glasfasergewebe gelegt und mit einem Wellengitter fixiert (siehe Abbildung 41). In der Nähe der Ein- und Austrittsöffnungen werden zusätzlich Metallgewebe angebracht, um zu verhindern, dass Zeolithkugeln in die Ein- oder Austrittskanäle gelangen.



Abbildung 41: Abdeckung eines Segments mit Glasfasermatte und Wellengitter

Durch Anbringung von Winkelblechen entlang der vertikalen Kanten des Speichers entstehen dort vier Austrittskanäle mit dreieckigem Querschnitt, in die die aus den Segmenten austretende Luft strömt. Entlang der horizontalen Kanten auf der Speicherobenseite wird der Luftaustrittskanal montiert, in den die Luft aus den vertikalen Austrittskanälen gelangt.

Vor der Montage der Winkelbleche wird zum Öffnen und Schließen der Luftaustrittsöffnungen an jede Speicherkante ein senkrecht beweglicher Schieber mit drei Öffnungen angebracht. Als Dichtung und Gleitfläche wird temperaturbeständiger Filz (gelb) unterlegt. Die Schieber werden mit Blechstreifen, unterlegt mit Teflonstreifen, und Federn an die Filzdichtung gepresst (siehe Abbildung 42).



Abbildung 42: Luftkanal entlang der horizontalen Kanten der Speicheroberseite, Anpressen der Schieber mit Federn, Winkelblech vor einer Speicherkante

Positionsschalter, Positionstaster, die Gewindestange und der Stellmotor werden an jeder Speicherkante montiert. LED's zeigen Schieberbewegung und -position an (siehe Abbildung 43).

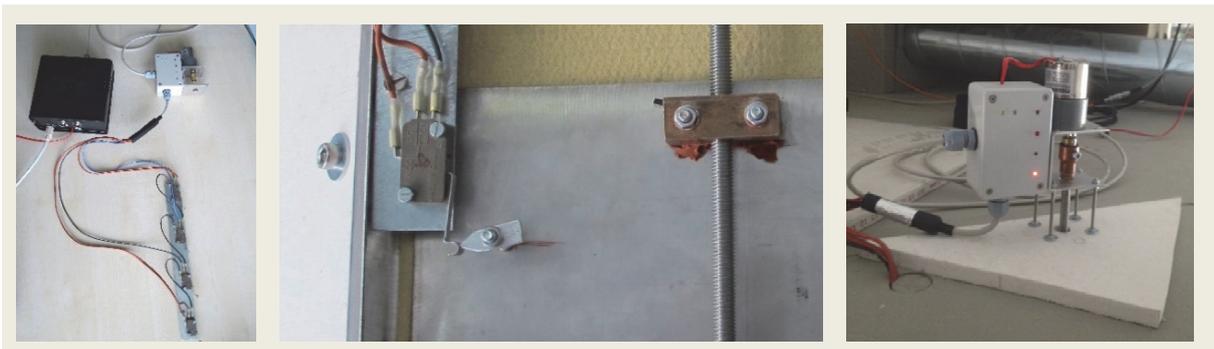


Abbildung 43: Positionsschalter und Taster für die Schieberposition, Motor zum Antrieb der Gewindestange

Der Speicher wird auf der Oberseite mit Silicatplatten abgedeckt (siehe Abbildung 44). In der Mitte befindet sich dort der Speichereintritt, der mit einem Flansch zum Anschluss an das Lüftungssystem versehen ist. Die Dichtung des Speichers erfolgt entweder mit Silikonmasse (rot) oder mit Silikonschaumklebeband (weiß), beide hochtemperaturbeständig.



Abbildung 44: Lufteintritt auf der Oberseite des Speichers

Als Wärmedämmung werden 10 cm PU-Hartschaumdämmung angebracht (siehe Abbildung 45). Um ein dichtes Anliegen an den Silicatplatten sicherzustellen liegt dazwischen 1 cm dickes Vlies. Die Dämmung an den Speicherkanten ist abgesetzt, um eine spätere Zugänglichkeit zu den Austrittskanälen mit den Schiebern zu gewährleisten. Bei einer Dämmstärke von 10 cm beträgt das gesamte Speichervolumen 8,2 m<sup>3</sup>.



Abbildung 45: Speicherseitenwand aus Silicatplatten, Vlies, PU-Hartschaumdämmung

### 2.7.3 Einbau der Messtechnik

Der Einbau der in Abschnitt 2.4.2.9 beschriebenen Messtechnik in den Sorptionswärmespeicher erfolgt parallel zu dessen Aufbau. Abbildung 46 zeigt Details bei der Montage von Temperaturfühlern im Speicherinneren.



Abbildung 46: Temperaturmessung im Sorptionswärmespeicher; Eintrittskanal (links), Segmente (Mitte), Kabeldurchführung nach Außen (rechts)

### 2.7.4 Verrohrung

Die Verrohrung erfolgt mit Wickelfalzrohren und Formteilen, die mit (Hochtemperatur-)Silikon gedichtet werden. Der Rohrbereich, der heiße Luft führt, wird mit temperaturbeständigem Vlies gedämmt. In Rohrbereichen mit mäßigen Temperaturen werden Isoduct-Rohre (aus expandiertem Polypropylen, EPP) eingesetzt, wodurch eine zusätzliche Dämmung entfällt.



Abbildung 47: Verrohrung mit Wickelfalzrohr und Luftklappen (links), mit Vliesdämmung (Mitte), Lüfter und Isoduct-Rohre (rechts)

Die Fertigstellung des solaren Heizsystems erfolgte im September 2015, so dass das Monitoring der Anlage zur Heizperiode 2015/2016 beginnen konnte.

## 2.8 Monitoring und energetische Bewertung der solarthermischen Wärmeversorgung (AP8)

Mit der experimentellen Untersuchung des Sorptionswärmespeichers werden zwei übergeordnete Ziele verfolgt: das Erste ist die Erprobung und Demonstration des solaren Heizsystems und der Funktionsfähigkeit des Sorptionswärmespeichers im realen Betrieb. Zusätzlich sollen Experimente unter definierten Bedingungen einen tieferen Einblick in das Verhalten des Speichers geben, präzise Informationen über die Leistungsfähigkeit liefern und eine detailliertere Analyse erlauben.

Im Folgenden wird zunächst das Verhalten des Sorptionswärmespeichers bzw. einzelner Segmente untersucht und im Anschluss das Verhalten des Kollektors behandelt. Der Betrieb des solaren Heizsystems wird anhand von exemplarischen Betriebstagen vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Bilanzierung des solaren Heizsystems.

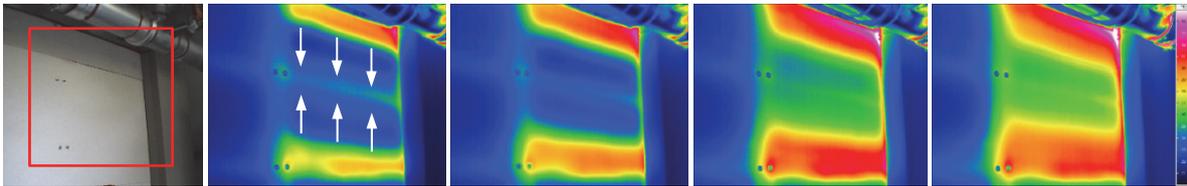
### 2.8.1 Verhalten und Leistungsfähigkeit des Sorptionswärmespeichers

Dieser Abschnitt beinhaltet Untersuchungen zur Homogenität der Strömung in den Segmenten anhand von Thermographieaufnahmen sowie anhand von Temperaturmessungen in den Segmenten. Die gemessene thermische Leistung des Sorptionswärmespeichers während des Adsorptionsbetriebs bei verschiedenen Feuchten wird vorgestellt. Die Beladung der Segmente mit Wasser wird analysiert und die Energiespeicherdichte bestimmt.

#### 2.8.1.1 Homogenität der Segmentdurchströmung (Thermographieaufnahmen)

Um die Gleichförmigkeit der Durchströmung der Segmentpaare zu überprüfen wurde ein elektrischer Heizstab mit einer Leistung von 1 kW verwendet, um das obere Segmentpaar in Quadrant 1 kontrolliert aufzuheizen. Die Dämmung an einer Speicherseite wurde entfernt, um die Temperaturfront in den beiden Segmenten mit einer Infrarotkamera sichtbar zu machen.

Die Aufnahmen sind in Abbildung 48 gezeigt.<sup>5</sup> Die heiße Luft, mit einer Eintrittstemperatur von etwa 60 °C, durchströmt die beiden Segmente, analog zu Abbildung 20, mit einem Massenstrom von 125 kg/h. Aus den Aufnahmen geht hervor, dass beide Segmente gleichmäßig aufgeheizt werden. Lediglich der obere Bereich des oberen Segments erscheint etwas wärmer, was aber auf einen Wärmetransport durch Wärmeleitung, ausgehend von dem metallischen Luftkanal entlang der Oberkante des Sorptionswärmespeichers, zurückzuführen ist. Aus dem Verhalten kann auf eine homogene Strömungsverteilung in jedem der beiden Segmente sowie auf eine gleichmäßige Aufteilung des Luftmassenstroms auf die beiden Segmente geschlossen werden. Ein solches Verhalten ist wichtig um eine gleichmäßige Entladung der beiden Segmente sicherzustellen und damit bis zum Ende einer Adsorption eine hohe Austrittstemperatur aufrechtzuerhalten, die erst am Ende steil abfällt. Anderenfalls, wenn die Front in einem Segment schneller durchbräche, käme es durch die Vermischung des schon kalten Luftstroms aus dem einen und des noch warmen Luftstroms aus dem anderen Segment zu einem verfrühten aber langandauernden Absinken der Austrittstemperatur und damit zu einer geringeren verfügbaren Leistung.



Zeit nach Versuchsbeginn: 1:34 h

2:05 h

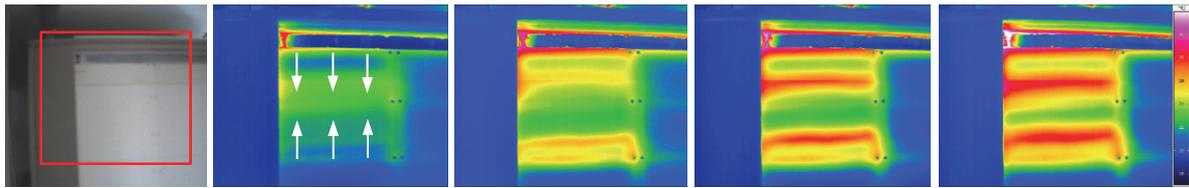
3:14 h

4:51 h

Abbildung 48: Infrarotkameraaufnahmen des Sorptionswärmespeichers (Quadrant 1, oberes Segmentpaar) während einer thermischen Beladung (13.10.2015)

Der Verlauf der Temperaturfront während der Betriebsart Vorwärmung des Speichers (Winterdesorption) ist in Abbildung 49 dargestellt. Zu Beginn der Aufnahmen ist das Segmentpaar aufgrund einer vorangegangenen Adsorption in der Nacht noch warm. Die Betriebsart Winterdesorption war von 11:55 Uhr bis 15:15 Uhr aktiv, d.h. das Segmentpaar wird während dieser Zeit mit bis zu 57 °C warmer Luft aus dem Kollektor erwärmt. Aufgrund der schwankenden Solarstrahlung variiert die Lufteintrittstemperatur in das Segmentpaar und es erscheinen in den Aufnahmen zwei Temperaturfronten. Zur Temperatur in den Thermogrammen sei angemerkt, dass das untere Segment horizontal ausgerichtet ist, während das obere Segment leicht geneigt ist. Wie im vorangehend gezeigten Versuch kommt es zu Wärmeleitung ausgehend vom warmen metallischen Luftkanal an der Oberkante des Speichers und dadurch zu hohen Temperaturen im oberen Bereich des oberen Segments. Der Luftkanal erscheint in den Bildern nur aufgrund der geringen Emissivität kalt.

<sup>5</sup> In diesen und allen nachfolgend gezeigten Thermogrammen ist ein Emissionsgrad von 1 eingestellt. Da für die Silicatplatten von einem Emissionsgrad kleiner 1 auszugehen ist, können den Aufnahmen daher keine absoluten Temperaturen sondern nur die relative Temperaturverteilung entnommen werden.



Uhrzeit:            12:17 Uhr            13:16 Uhr            14:03 Uhr            14:34 Uhr

Abbildung 49: Infrarotkameraaufnahmen des Sorptionswärmespeichers (Quadrant 3, oberes Segmentpaar) während der Betriebsart Vorwärmung des Speichers - Winterdesorption (3.11.2015)

Das mittlere Segmentpaar im Quadrant 1 und Teile der angrenzenden Segmente sind mit Thermoelementen ausgestattet. Experimente an diesem Segmentpaar geben weitere Informationen über die Gleichförmigkeit der Strömung in den Segmenten. In jedem Segment befinden sich zwei senkrecht zur Strömungsrichtung stehende Messebenen, eine nahe des Segmenteintritts, eine in der Nähe des Segmentaustritts (vergleiche Kapitel 2.4.2.9). Die Temperaturen sind in Abbildung 50 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Temperaturen in den einzelnen Messebenen insgesamt gut übereinstimmen. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass die Strömung recht gleichmäßig über den Strömungsquerschnitt verteilt ist. Am Vortag wurde bereits adsorbiert, so dass die Adsorptionsfronten die jeweils erste Messebene (S3 E1 bzw. S4 E2, dünne Linien), nahe des Segmenteintritts, bereits passiert haben. Dort sind die Temperaturen deutlich niedriger und nähern sich der Speichereintrittstemperatur an. (Eine Ausnahme bildet die Messstelle Q1S3E1P3c, dort ist die Adsorptionsfront noch nicht durchgebrochen, die Adsorptionsfront passiert diese Stelle erst am Nachmittag.) Die Wohnraumabluft, die dem Speicher zugeführt wird, weist mit 4,5–5 g/kg keine sehr hohe Feuchte auf. Während des Adsorptionsbetriebs (Betriebsart 6, Abbildung 50 oben) beträgt die Temperaturerhöhung durch Adsorption dennoch zwischen 13 K und 18 K und es werden zum Teil Speicheraustrittstemperaturen bis über 35 °C erreicht.

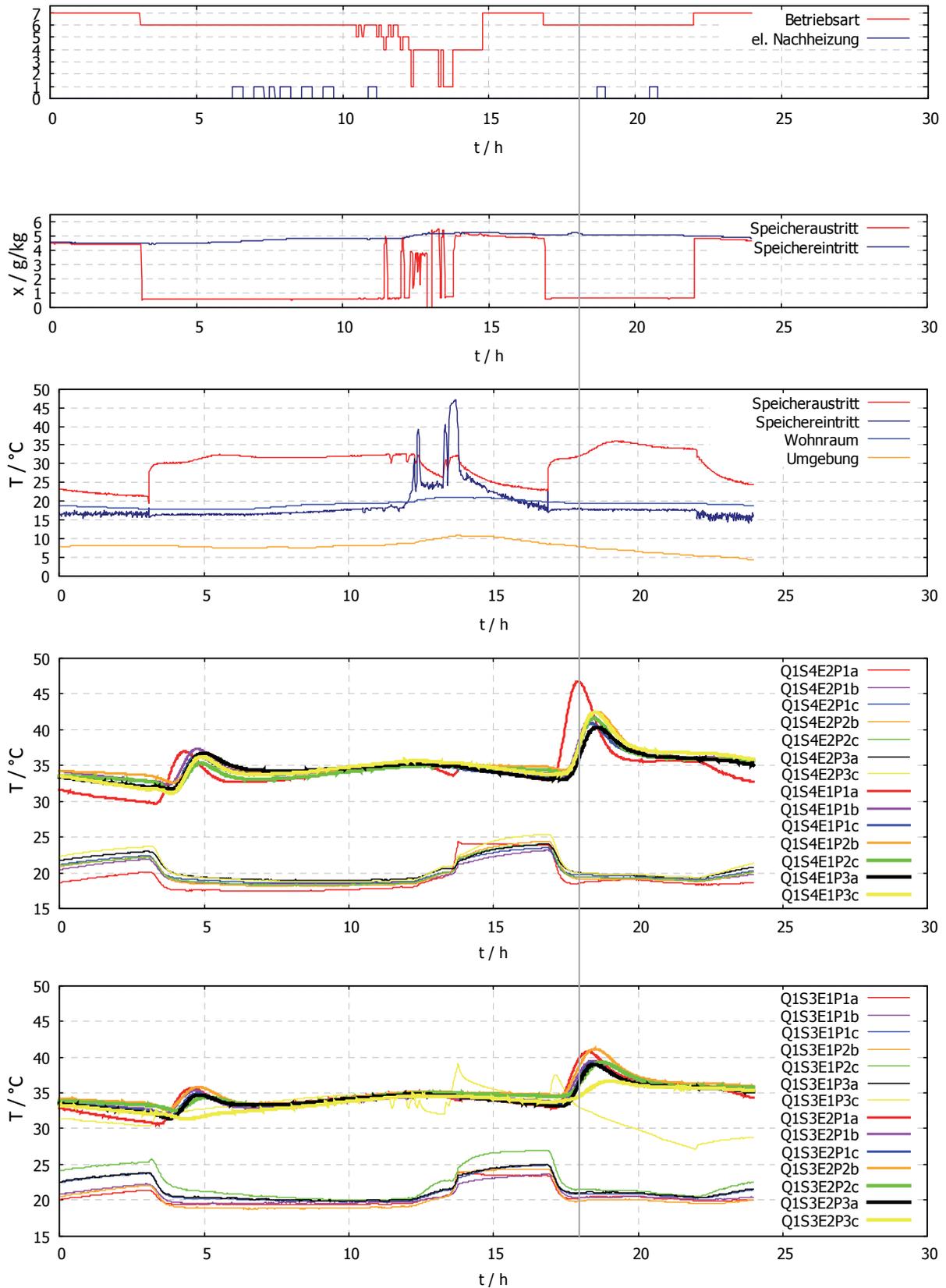


Abbildung 50: Betriebsarten des Sorptionswärmespeichers, absolute Feuchte der Ab- und Fortluft, Temperaturen an Speicherein- und austritt und Segmenttemperaturen (Quadrant 1, mittleres Segmentpaar) (12.12.2015); Positionen der Messstellen im Speicher vergleiche Abbildung 27

In den Thermogrammen in Abbildung 51, die am 12.12.2015 gegen 18:00 Uhr aufgenommen wurden, ist zu erkennen, dass die Adsorptionsfront die Segmente bereits gut zur Hälfte durchlaufen hat. Zu berücksichtigen bleibt, dass es in den Thermogrammen durch die Kapazität der Speicherwand etc. gegebenenfalls zu einem verzögerten oder verschliffenen Auftreten der Front kommt. Auf den Thermografieaufnahmen ist weiterhin keine signifikante Temperaturerhöhung in den umliegenden Segmentpaaren zu erkennen, die auf einen Wärmetransport in benachbarte Segmente hindeuten würde. Dies bestätigt die Wirksamkeit des realisierten Strömungskonzepts eines jeweils von oben und unten angeströmten Segmentpaares mit mittigem Luftaustritt. Sichtbar wird das Traggerüst des Speichers aufgrund der Wärmeleitung entlang der Stahlprofile.

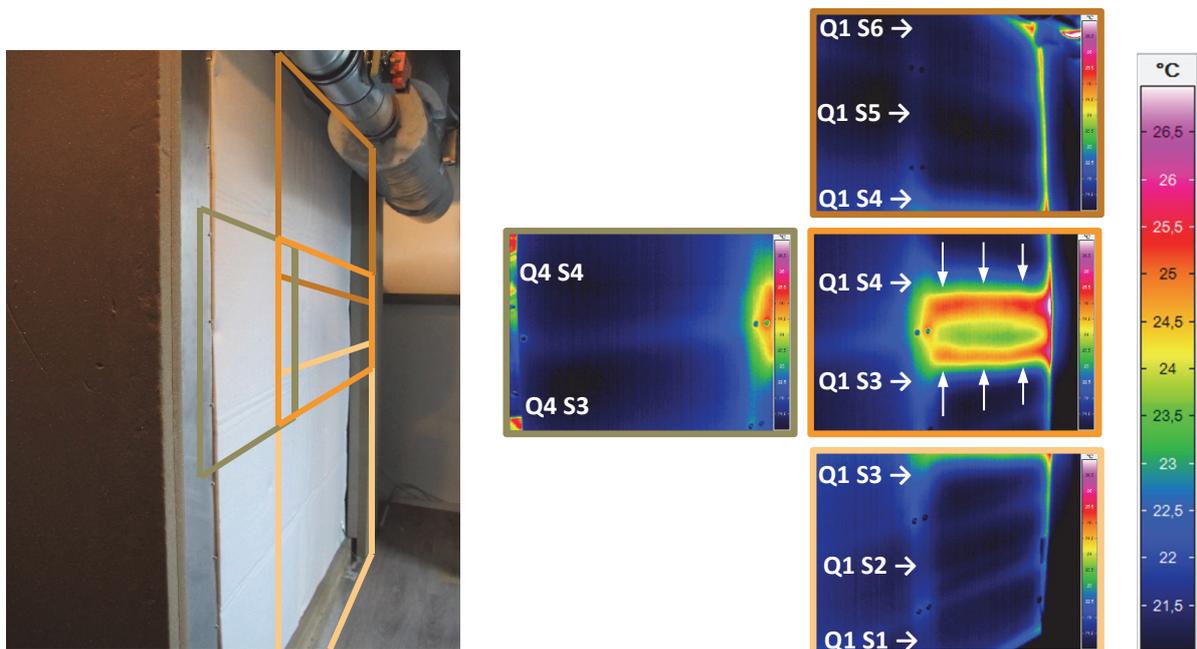


Abbildung 51: Infrarotkameraaufnahmen des Sorptionswärmespeichers (Quadrant 1, mittleres Segmentpaar und angrenzende Segmentpaare, Bilder teilweise überlappend) während eines Adsorptionsbetriebs (12.12.2015, ca. 18 Uhr)

Der Temperaturverlauf in einem bereits adsorbierten Segmentpaar während der Betriebsart Vorwärmung (Winterdesorption) verläuft wie in Abbildung 52. Nach dem Wechsel in die Betriebsart Vorwärmung/Winterdesorption um 10:40 Uhr ist eine gleichmäßige Erwärmung innerhalb der Messebenen zu erkennen (feine Linien für Messebenen nahe Lufteintritt S4 E2 und S3 E1, fette Linien für Messebenen nahe Luftaustritt S4 E1 und S3 E2). Die Temperaturfront benötigt hier ca. 1,5 h von der Messebene am Eintritt (ca. 11:00 Uhr) zur Messebene am Austritt der Segmente (ca. 12:30 Uhr).

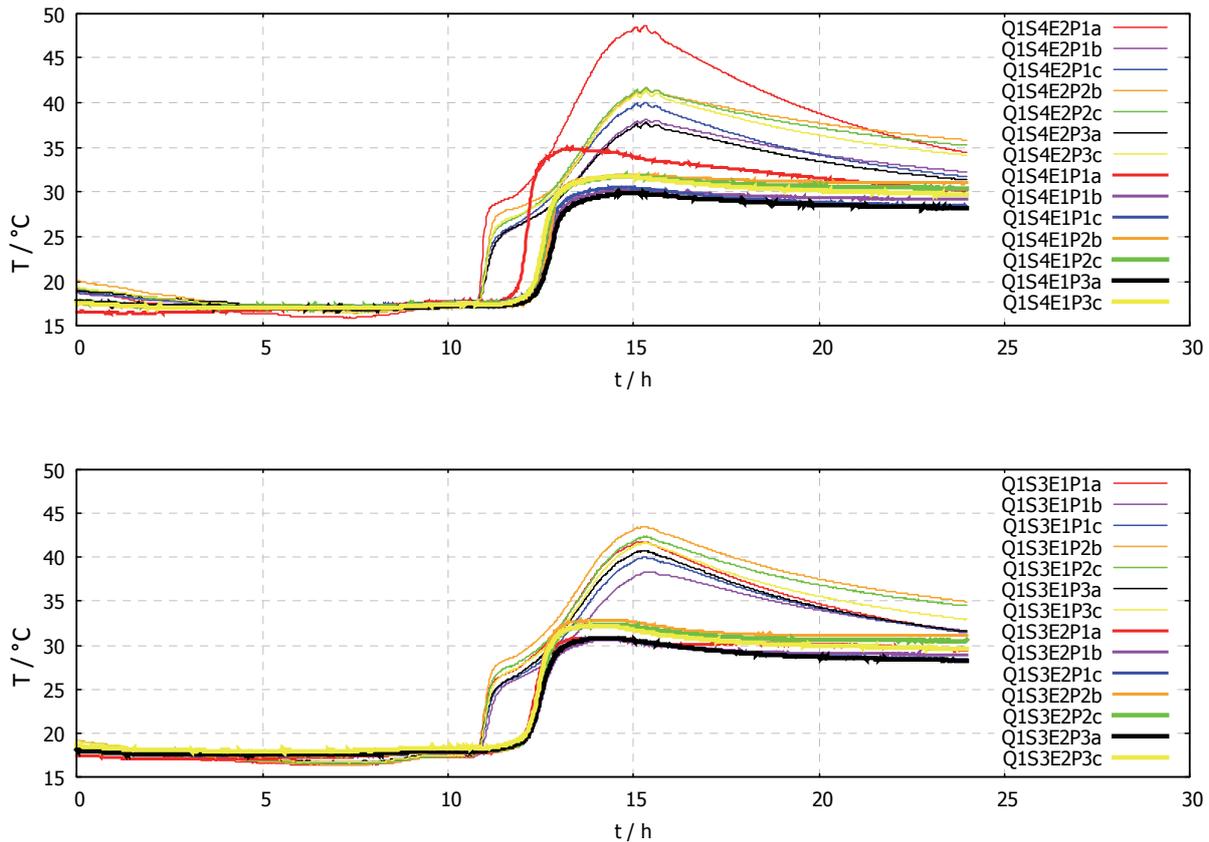


Abbildung 52: Temperaturen im Sorptionswärmespeicher während einer Vorwärmung/Winterdesorption (Quadrant 1, mittleres Segmentpaar, Segment 4 (oben) und Segment 3 (unten)) (10.03.2016); Positionen der Messstellen vergleiche Abbildung 27

### 2.8.1.2 Thermische Leistung des Sorptionswärmespeichers

Ein Auszug von 13 Stunden aus einer Adsorptionsphase ist exemplarisch in Abbildung 53 dargestellt. Der Luftmassenstrom während des Versuchs beträgt  $90 \text{ kg/h}$ . Aufgrund des geringen Druckverlusts über die Segmente (vergleiche Abschnitt 2.4.2.2) kann je ein Massenstrom von  $90 \text{ kg/h}$  im Frischluftstrang und im Fortluftstrang mit einer gesamten elektrischen Leistung von  $20 \text{ W}$  für beide Ventilatoren realisiert werden. Die Feuchtedifferenz zwischen Eintritt und Austritt des Speichers liegt im Bereich von  $6,3 \text{ g/kg}$  und  $8,8 \text{ g/kg}$ . Dies führt zu einer Temperaturerhöhung von  $22\text{--}28 \text{ K}$ . Die thermische Leistung des Sorptionswärmespeichers nach Gleichung 3 (aus der gemessenen Feuchtedifferenz und gegebener Adsorptionsenthalpie, siehe Abschnitt 2.6.6) beträgt im Mittel  $790 \text{ W}$  und fällt durch die mit der Zeit sinkenden Feuchte auf im Mittel  $565 \text{ W}$ . Die Berechnung nach Gleichung 4 (aus der gemessenen Lufttemperaturerhöhung) ergibt etwas niedrigere Werte von  $695\text{--}550 \text{ W}$ . Die Abweichung zu Beginn wird durch thermische Kapazitäten verursacht, etwa durch den Austrittskanal, der zunächst erwärmt werden muss. [12]

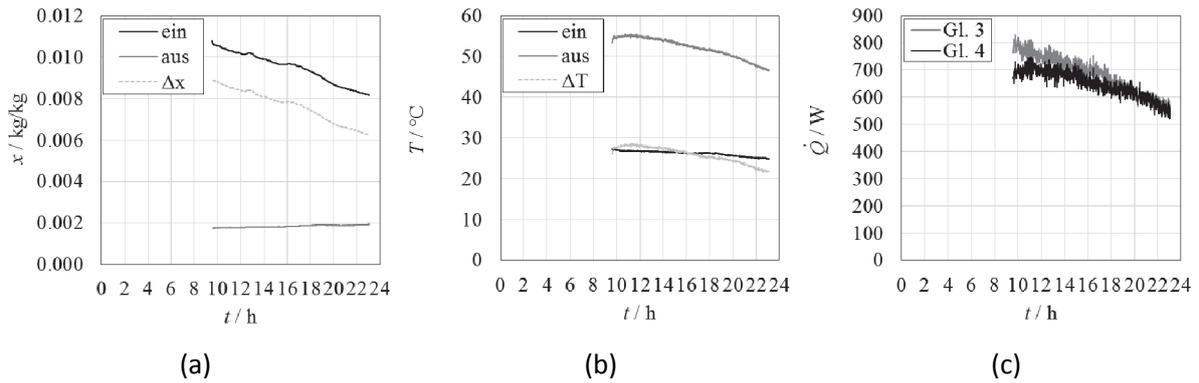


Abbildung 53: Adsorptionsbetrieb im September (17.09.2015); gemessene absolute Luftfeuchte (a) und Lufttemperatur (b) am Sorptionswärmespeicher Ein- und Austritt, berechnete thermische Leistung (c)

Die oben gezeigten Daten stammen aus einem Versuch im September. Die gemessenen Feuchten und Temperaturen bei einer Adsorption an einem Januartag, wenn weniger Feuchte zur Verfügung steht, sind in Abbildung 54 gezeigt. Der Adsorptionsbetrieb beginnt an diesem Tag um 2 Uhr und endet um 22 Uhr. Um die Mittagszeit wechselt der Betriebszustand einige Male in den Kollektorbetrieb. Die nachfolgend genannten Zahlen beziehen sich nur auf den Adsorptionsbetrieb. Der Luftmassenstrom beträgt 80 kg/h. Die mittlere Feuchtedifferenz zwischen Speicherein- und austritt liegt bei 4,2 g/kg. Die Speicheraustrittstemperatur erreicht Werte bis über 32 °C und liegt im Mittel bei 30,8 °C. Die mittlere Leistung ergibt sich zu 314 W (nach Gleichung 4) bzw. zu 344 W (nach Gleichung 3).

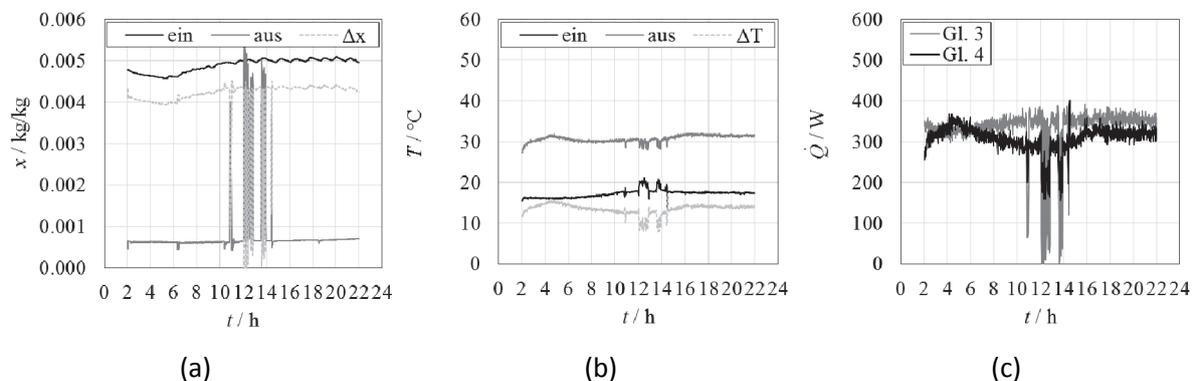


Abbildung 54: Adsorptionsbetrieb im Januar (06.01.2016); gemessene absolute Feuchte (a) und Temperatur (b) am Sorptionswärmespeicher Ein- und Austritt, berechnete thermische Leistung (c)

### 2.8.1.3 Beladung des Sorptionswärmespeichers (Desorption)

Da die Inbetriebnahme des solaren Heizsystems im Herbst erfolgte und das Projekt noch während der Heizperiode endete, konnte eine Desorption mit hoher Solarstrahlung und damit hohen Temperaturen bislang nicht ausreichend erprobt werden. Die eingehende Erprobung der Desorption ist im Rahmen eines Nachfolgeprojekts geplant.

#### 2.8.1.4 Energiespeicherdichte und Wasseraufnahme

Die Befüllung des Sorptionswärmespeichers erfolgte mit getrocknetem Sorptionsmaterial, so dass mit Beginn der Monitoringphase im September 2015 ein regenerierter Speicher vorhanden war. Der zeitliche Verlauf der adsorbierten Wassermasse im Speicher ist in Abbildung 55 dargestellt.

Ende April ist der Speicher mit 556 kg Wasser beladen. Während dieser Zeit wurden dem Speicher 623 kg Wasser zugeführt (Adsorption) und 67 kg Wasser entnommen (Desorption). Ein Kilogramm adsorbiertes Wasser entspricht, bei einer mittleren Adsorptionenthalpie von 3600 kJ/kg, einer Energie von 1 kWh. Es wurden demnach 623 kWh Adsorptionswärme freigesetzt.

Die insgesamt maximal erreichte Wasserbeladungsdifferenz beträgt 563 kg. Dies entspricht einer Energiespeicherdichte von 132 kWh/m<sup>3</sup> für einen Sorptionszyklus. Durch zwischenzeitliche Desorption wurde tatsächlich eine Zyklenzahl größer 1 erreicht. Mit der über die Heizperiode adsorbierten Wassermenge von 623 kg ergibt sich dann eine sorptive Energiespeicherdichte von 145 kWh/m<sup>3</sup>. Noch nicht berücksichtigt sind hier Speicherprozesse fühlbarer Wärme.

Mitte September bestand noch kein Bedarf an Heizwärme aus dem Sorptionswärmespeicher. Hier wurde ein erstes Adsorptionsexperiment an einem Segment (Q1 S5+6) durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit zu prüfen und die Leistungsfähigkeit des Speichers bei höherer Feuchte zu untersuchen (vergleiche Kapitel 2.8.1.2).

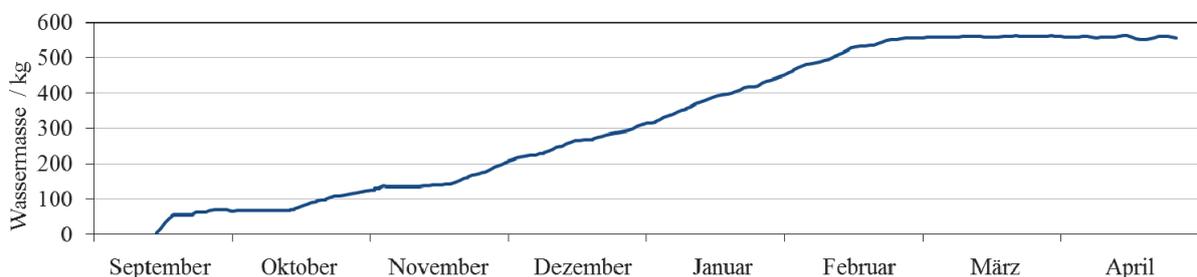


Abbildung 55: Zeitlicher Verlauf der adsorbierten Wassermasse im Sorptionswärmespeicher

Die Wasseraufnahme der einzelnen Segmente ist in Abbildung 56 gezeigt. Es zeigt sich die Tendenz, dass die Wasseraufnahme abnimmt, je später ein Segment adsorbiert wird. Dies ist zum einen auf die zur Verfügung stehende Feuchte zurückzuführen, die in den kälteren Monaten tendenziell geringer ist (siehe Abbildung 57). Dann wird der Adsorptionsprozess in der Regel schon früher bei einer niedrigeren Wasseraufnahme abgebrochen, das Sorptionsmaterial also nicht ganz vollständig ausgenutzt. Eine zweite Erklärung wäre, dass durch Bypassströmungen oder nicht ganz dicht schließende Luftaustrittsöffnungen nicht nur das aktive Segment, sondern auch benachbarte oder weitere Segmente mit einem geringen Luftstrom durchströmt werden und dadurch zeitlich später aktive Segmente zum Teil schon mit Wasser beladen sind, dieses Wasser aber den zeitlich früher aktiven Segmenten zugeordnet wurde. Für diesen Erklärungsansatz spricht auch die überdurchschnittlich hohe Wasseraufnahme des zuerst verwendeten Segmentpaars.

Ab 9. März war das Segment Q1 S3+4 geöffnet. Während zuvor hauptsächlich adsorbiert wurde findet ab diesem Zeitpunkt ein Wechsel zwischen Ad- und Desorption statt, je nach Strahlungsangebot und Heizwärmebedarf.

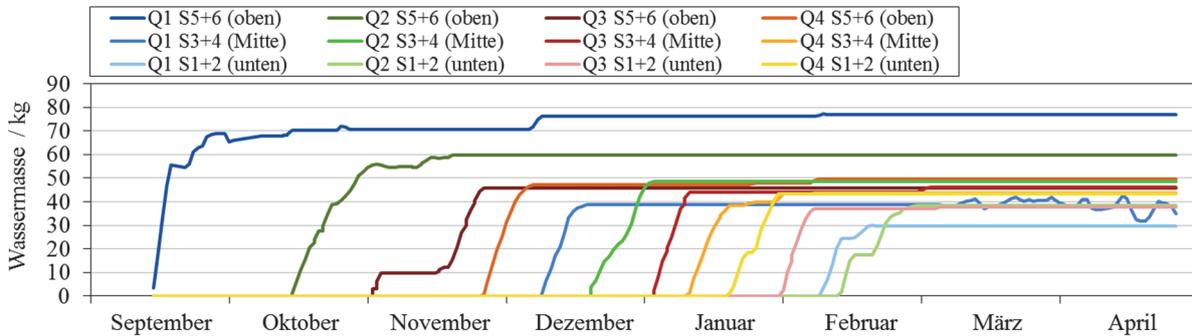


Abbildung 56: Zeitlicher Verlauf der adsorbierten Wassermasse in den einzelnen Segmenten

In Abbildung 57 sind die für jeden Monat gemittelten Werte, sowie maximale und minimale Werte, für Luftfeuchte und -temperatur in Wohnraum und Umgebung dargestellt. Es ist zu beachten, dass das Gebäude unbewohnt war und bisher keinerlei Luftbefeuchtung vorgenommen wurde. Die für die Adsorption zur Verfügung stehende Raumfeuchte entsprach im Wesentlichen der Umgebungsfeuchte der Außenluft. Für die folgende Heizperiode ist geplant die Bewohnung des Gebäudes auch hinsichtlich der Raumfeuchte nachzubilden, so dass eine noch höhere Wasseraufnahme des Speichermaterials erreicht werden kann.

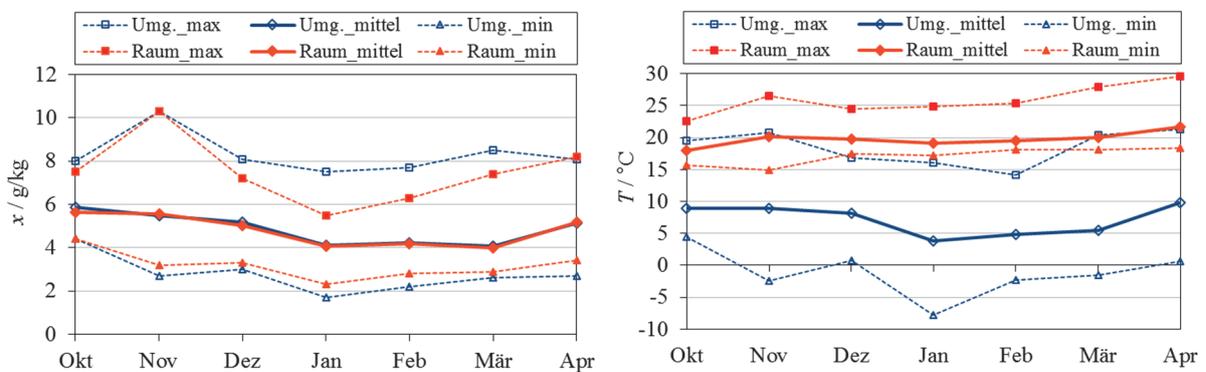


Abbildung 57: Mittlere Feuchte (links) und mittlere Temperaturen (rechts) in Raum und Umgebung während der Heizperiode 2015/2016

### 2.8.2 Verhalten und Leistungsfähigkeit des Kollektors

In Abbildung 58 ist der Kollektorwirkungsgrad unterschiedlicher Vakuumröhrenkollektoren gegenübergestellt:

Für den SolSpaces Luftkollektor sind ausgewählte Messdaten der Heizperiode 2015/2016 dargestellt („Vakuumröhren-Luftkollektor mit Reflektor (SolSpaces) – Messdaten“). Es handelt sich um einen Vakuumröhren-Luftkollektor vom Typ TSTair der Firma Airwasol. Der Kollektor ist eine Weiterentwicklung des von der Firma Kollektorfabrik hergestellten Vakuumröhren-

Luftkollektor Sun-Storm, für den ein Kollektorprüfbericht mit Wirkungsgradkennwerten vorliegt [1]. Diese bilden die Berechnungsgrundlage für die in Abbildung 58 aufgetragenen, berechneten Kollektorkennlinien „Vakuurröhren-Luftkollektor ohne Reflektor (Sun-Storm) – berechnet“ und „Vakuurröhren-Luftkollektor mit Reflektor (SolSpaces) – berechnet“, letztere mit skalierten Kennwerten. Als Referenz ist zusätzlich der Kollektorwirkungsgrad eines typischen Vakuurröhrenkollektors mit Wärmeträger Wasser aufgetragen.

Die sehr niedrigen, gemessenen Wirkungsgrade des SolSpaces Kollektors (Größenordnung 5-10 %) sind auf ein nachlassendes Vakuum der Kollektorröhren zurückzuführen. Das Problem der ungenügenden Vakuumdichtigkeit konnte auch mit dem Tausch der Kollektorröhren im Oktober 2015 noch nicht behoben werden. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden jedoch eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung des Kollektors. Ein vollständig überarbeitetes Röhrendesign ist momentan bei der Firma Airwasol in Arbeit. Dieses soll im Rahmen eines Nachfolgeprojekts für das solare Heizsystem eingesetzt werden.

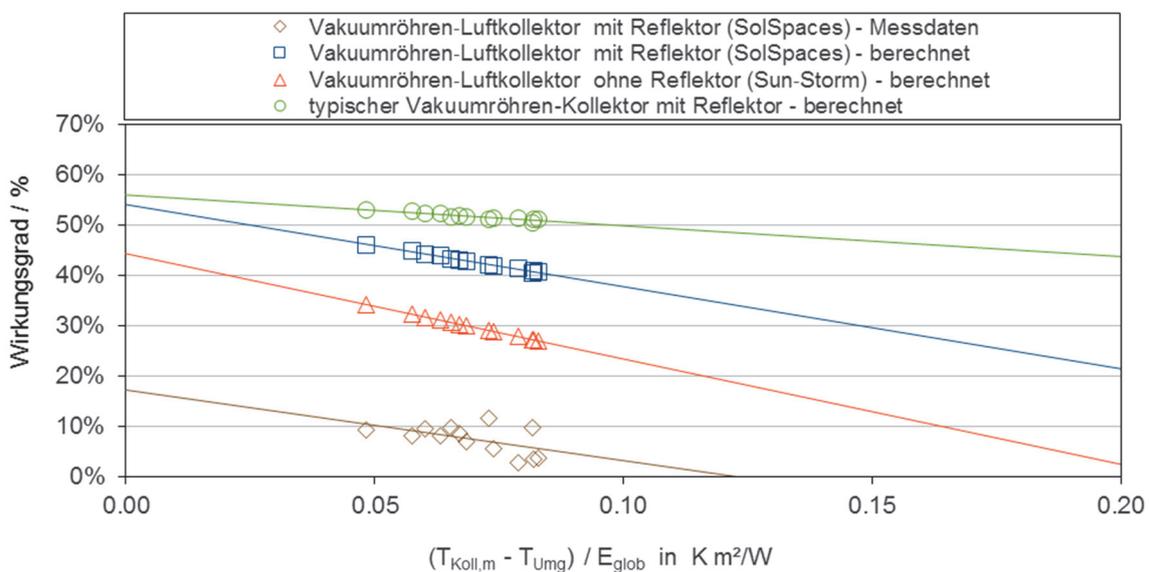


Abbildung 58: Kollektorwirkungsgrad unterschiedlicher Vakuurröhrenkollektoren (bezogen auf die Bruttofläche) in Abhängigkeit von Temperaturdifferenz zur Umgebung und Einstrahlung in Kollektorebene

Grundsätzlich zeigen die Berechnungen das Potential eines Vakuurröhren-Luftkollektors. Hohe Wirkungsgrade können auch noch bei den für die Regeneration des Sorptionswärmespeichers benötigten hohen Temperaturen erreicht werden. Dass diese hohen Wirkungsgrade mithilfe der Vakuurröhrentechnologie in der Praxis erreicht werden können bestätigt auch der Vergleich zu typischen marktverfügbaren, wasserbetriebenen Vakuurröhrenkollektoren.

### 2.8.3 Betrieb des solaren Heizsystems an ausgewählten Tagen

In den folgenden Abschnitten wird der Betrieb bzw. das Verhalten des solaren Heizsystems an exemplarischen Tagen bei verschiedenen Umgebungsbedingungen vorgestellt.

### 2.8.3.1 Geringer Heizbedarf am Vormittag und solarer Überschuss am Mittag (mittlere Umgebungstemperatur, mäßige Strahlung)

Messwerte für einen exemplarischen Tag im November sind in Abbildung 59 dargestellt (Zeitangaben in MEZ). Die Raumsolltemperatur während des Tages beträgt 20 °C und wird in der Nacht von 22 Uhr bis 6 Uhr auf 18 °C reduziert. Während der Nacht ist die Betriebsart Lüftung aktiviert, da die Raumtemperatur über 18 °C liegt. Um 6 Uhr am Morgen wird die Raumsolltemperatur auf 20 °C angehoben wodurch Heizwärmebedarf entsteht, da die Raumtemperatur 19,4 °C beträgt. Der Adsorptionsmodus wird aktiviert und die Raumtemperatur erhöht sich. Für sechs Minuten wird der Adsorptionsmodus, aufgrund eines geringen Temperaturabfalls im Raum, zusätzlich durch die elektrische Nachheizung (PTC-Heizelemente) unterstützt. Wenige Minuten nach 8 Uhr ist die Solltemperatur erreicht und der Betrieb wechselt zu Lüftung. Kurz nach 9 Uhr ist genug Strahlung und damit eine ausreichend hohe Kollektortemperatur für den Heizbetrieb mit Kollektor vorhanden. Der Heizbetrieb durch Adsorption ist bei einer Raumtemperatur über 20 °C gesperrt. Die Beheizung mit Kollektor ist dagegen im Winter weiter erlaubt, um die Raumtemperatur auf ein komfortableres Niveau zu erhöhen. Im weiteren Verlauf erhöht sich die Kollektortemperatur weiter und erreicht um 10:10 Uhr 50 °C. Ein Segment, welches zuvor bereits entladen wurde wird nun aufgeheizt, um die fühlbare Wärme bei Bedarf in der Nacht zum Heizen verwenden zu können. Gegen 12 Uhr wechselt der Betriebsmodus zweimal kurz auf Desorption, die Kollektortemperatur ist jedoch nicht hoch genug um diesen Modus für lange Zeit aufrechtzuerhalten. Nach dem Absinken der Strahlung am Nachmittag wird zunächst wieder direkt mit dem Kollektor geheizt und nach weiter sinkender Strahlung schließlich zurück auf Lüftung geschaltet. Der Zustand Lüftung wird bis Mitternacht beibehalten, da die Raumtemperatur nicht unter die Solltemperatur fällt.

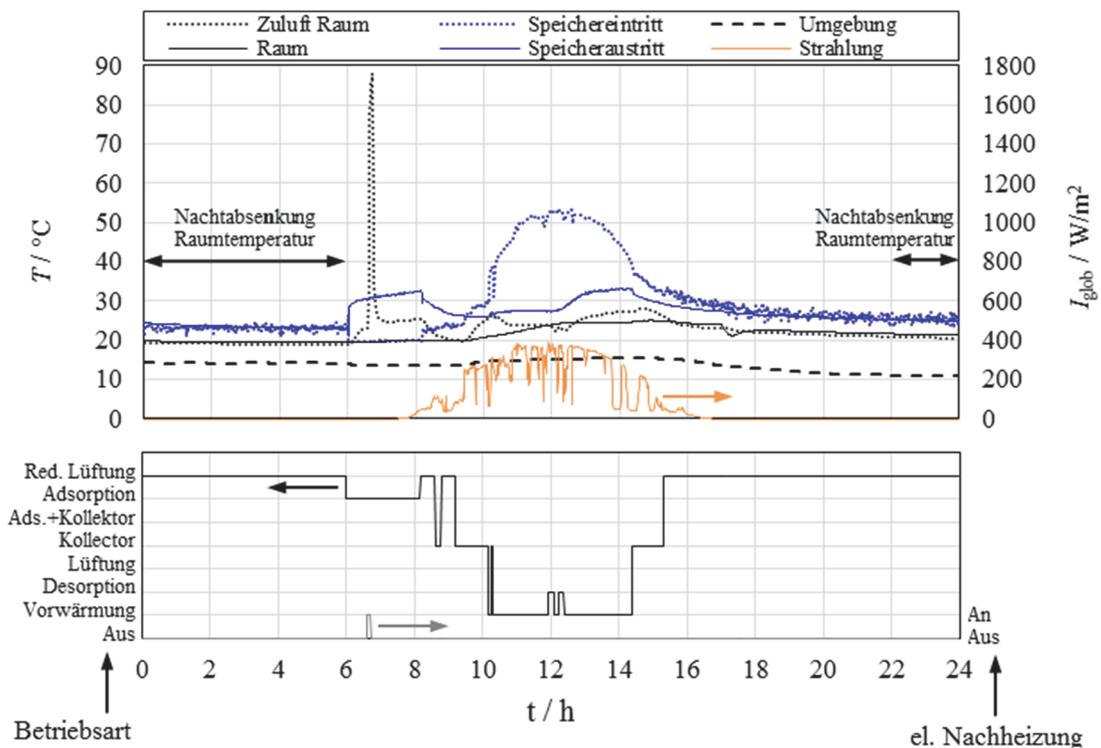


Abbildung 59: Temperaturen, Solarstrahlung und Betriebszustände des solaren Heizsystems an einem exemplarischen Tag im November (18.11.2015)

Wenn im weiteren Verlauf der Nacht oder am Morgen die Raumtemperatur unter die Solltemperatur sinken sollte, könnte die fühlbare Wärme des zuvor aufgewärmten Segments zur Beheizung verwendet werden.

An diesem Tag wurden dem Speicher 0,6 kWh entnommen. 1,4 kWh wurden durch Adsorption frei. Dem Wohnraum wurden 0,2 kWh elektrisch zugeheizt. Der Speicher wurde an diesem Tag zudem mit 1,9 kWh beladen. 0,12 kg Wasser wurden desorbiert. Die Summe der solaren Einstrahlung betrug 1,6 kWh/m<sup>2</sup>, der Kollektorgewinn belief sich auf 3,0 kWh.

**2.8.3.2 Hoher Heizbedarf (niedrige Umgebungstemperatur, kaum Strahlung)**

Für einen exemplarischen Tag im Februar sind Messwerte in Abbildung 60 gezeigt (Zeitangaben in MEZ). Die Umgebungstemperatur sinkt im Laufe des Tages von 7 °C auf unter 2 °C. Es besteht Heizbedarf. Die Betriebsart Adsorption ist aktiviert. Die Temperatur am Speicherausritt erreicht bis zu 33 °C. Um 6 Uhr erhöht sich die Raumsolltemperatur von 19 °C auf 20 °C (Nachtabenkung). Der Adsorptionsheizbetrieb wird dann zeitweise von der elektrischen Zuluftnachheizung unterstützt. Um die Mittagszeit ist etwas Strahlung vorhanden. Es wird mehrmals kurz in den Kollektorheizbetrieb gewechselt.

An diesem Tag wurden dem Speicher 6,9 kWh entnommen. Durch Adsorption wurden 8,1 kWh frei. Für die elektrische Nachheizung der Wohnraumzuluft wurden 6,3 kWh aufgewendet. Die Summe der solaren Einstrahlung betrug 0,72 kWh/m<sup>2</sup>, der Kollektorgewinn belief sich auf 0,29 kWh.

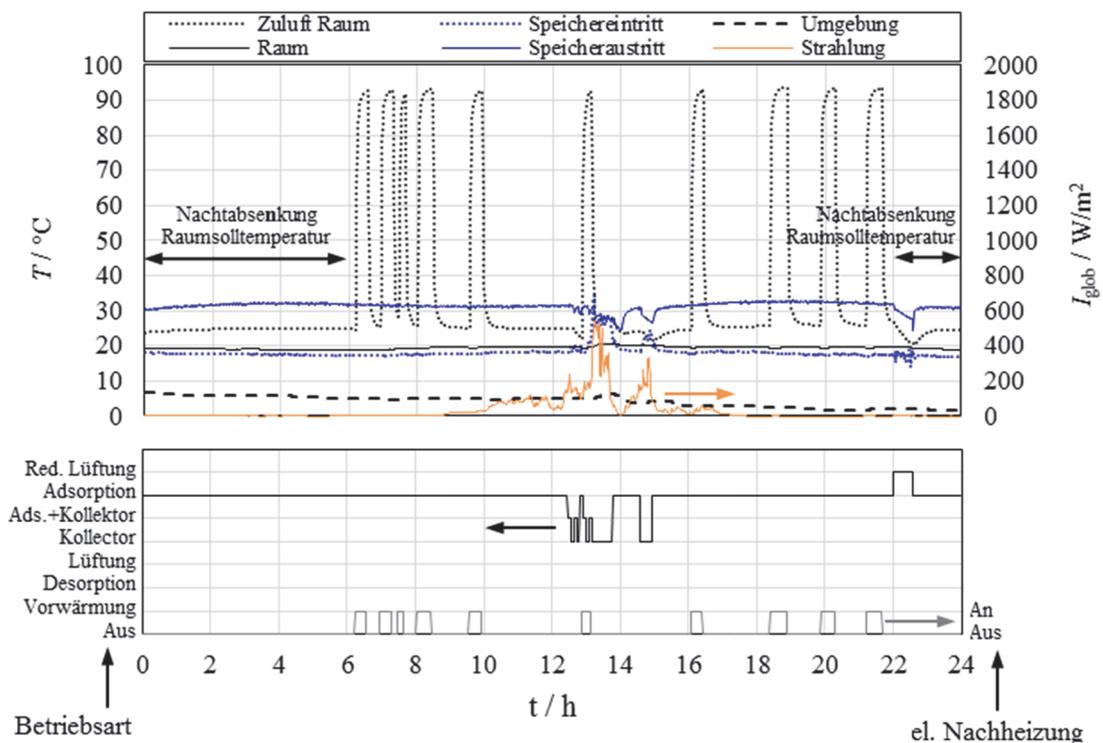


Abbildung 60: Temperaturen, Solarstrahlung und Betriebszustände des solaren Heizsystems an einem exemplarischen Tag im Februar (03.02.2016)

### 2.8.3.3 Kein Heizbedarf (mittlere bis hohe Umgebungstemperatur, hohe Strahlung)

Messwerte für einen exemplarischen Tag im Mai sind in Abbildung 61 dargestellt (Zeitangaben in MEZ). Die Raumsolltemperatur während des Tages beträgt 20 °C und wird in der Nacht von 22 Uhr bis 6 Uhr auf 19 °C reduziert. Während der Nacht ist die Betriebsart Lüftung aktiv. Die Raumsolltemperatur ist erreicht, es besteht kein Heizbedarf. Gegen 8:30 Uhr geht die Anlage in den Desorptionsbetrieb. Die Speichereintrittstemperatur erreicht bis zu 105 °C, die Temperatur am Speicheraustritt bis zu 70 °C. In den Segmenten des aktiven Segmentpaares werden zwischen 75 °C und 90 °C erreicht. Am Abend wird wieder in den Lüftungsbetrieb gewechselt.

An diesem Tag wurden dem Speicher 6,3 kWh zugeführt und 1,7 kg Wasser ausgetragen. Die Summe der solaren Einstrahlung betrug 7,3 kWh/m<sup>2</sup>.

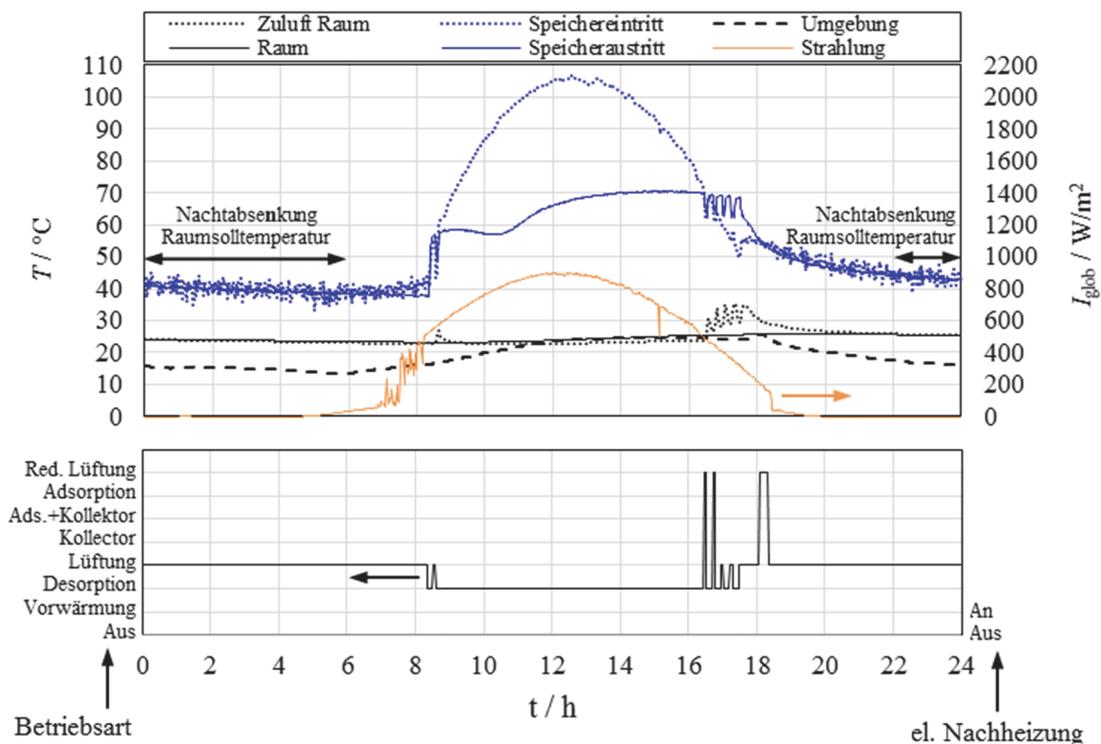


Abbildung 61: Temperaturen, Solarstrahlung und Betriebszustände des solaren Heizsystems an einem exemplarischen Tag im Mai (08.05.2016)

### 2.8.4 Monatliche Auswertung des Heizbetriebs

Abschließend werden die in der Heizperiode dem Gebäude zu- und abgeführten Wärmemengen dargestellt und es wird aufgezeigt, inwieweit der Heizwärmebedarf durch das solare Heizsystem gedeckt werden kann.

Die Wärmequellen, die zur Deckung des Heizwärmebedarfs in der Heizperiode 2015/2016 beitragen, teilen sich wie in Abbildung 62 auf.

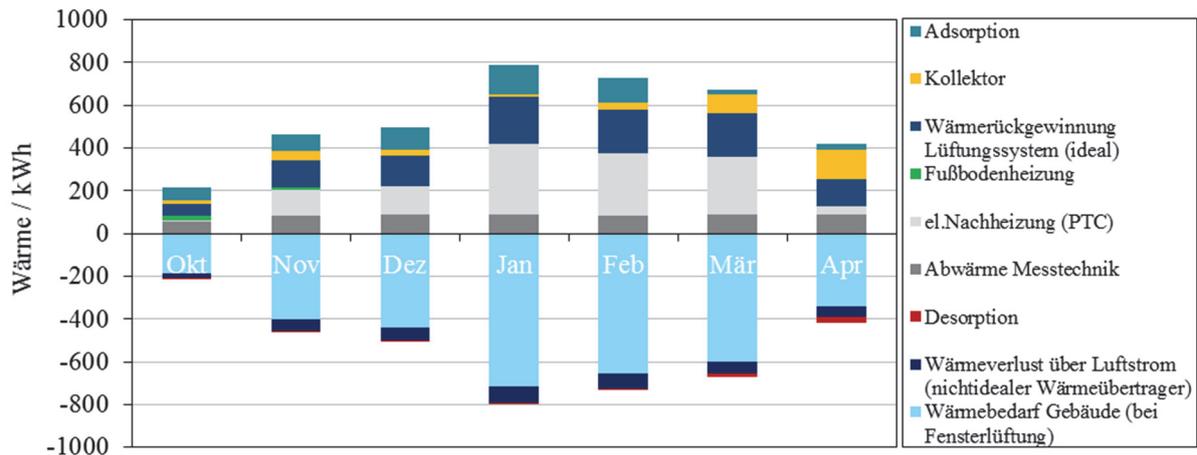


Abbildung 62: Wärmequellen und -senken des Gebäudes, Messdaten der Heizperiode 2015/2016

Im Sorptionswärmespeicher wird Wärme durch Adsorption frei. Desweiteren wird vom Kollektor Wärme zur direkten Beheizung des Gebäudes, zur Vorwärmung des Speichers oder zur Desorption bereitgestellt. Der mit „Wärmerückgewinnung Lüftungssystem (ideal)“ bezeichnete Anteil beschreibt die Wärmemenge, die durch einen idealen Wärmeübertrager aus dem Fortluftstrom im Vergleich zu einem Gebäude ohne Wärmerückgewinnung (mit Fensterlüftung bei gleichem Luftwechsel) zurückgewonnen wird. Bis November erscheint ein Anteil der Fußbodenheizung. Diese wurde Mitte November außer Betrieb genommen. Die elektrische Nachheizung der Zuluft in den Wohnraum stellt eine weitere Wärmequelle dar. Zudem wird durch Messtechnik und Messrechner Abwärme frei.

Zu den Wärmesenken gehört die Desorption im Sorptionswärmespeicher. Hinzu kommt der Anteil „Wärmeverlust über Luftstrom (nichtidealer Wärmeübertrager)“. Dieser beschreibt die Wärme, die aufgrund der Nichtidealität des Wärmeübertragers mit dem Luftstrom aus dem Gebäude abgeführt wird. Aus der Bilanz ergibt sich der Wärmebedarf des Gebäudes bei Fensterlüftung, der zur Berechnung der Deckungsanteile zugrunde gelegt wird (vergleiche auch Kapitel 2.2.5, Gebäude ohne WRG).

Die in Abbildung 62 dargestellten Anteile wurden so in dem unbewohnten Gebäude gemessen. Mit der Annahme eines bewohnten Gebäudes, in dem 200 W an internen Gewinnen (durch Personen und elektrische Geräte wie Kühlschrank, PC, etc.) anfallen, lässt sich das Diagramm wie in Abbildung 63 modifizieren. Die monatlich anfallenden internen Gewinne sind als unterster Anteil in den Balken dargestellt. Der mit Rest bezeichnete Anteil setzt sich zusammen als Summe aus Messtechnikabwärme und elektrischer Nachheizung abzüglich dieser internen Gewinne. Dieser Rest müsste in einem bewohnten Gebäude z.B. durch die elektrische Nachheizung aufgebracht werden.

In den Monaten Januar bis März ergibt sich damit ein Deckungsanteil von 63–65 %, im November und Dezember von 82 % bzw. 83 % und im Oktober und April kann der Heizwärmebedarf zu 100 % gedeckt werden.

Die während der Zeit von Oktober bis April durch Adsorption frei gewordene Energie beträgt 547 kWh. Anzumerken bleibt, dass ein Segmentpaar im September für experimentelle Zwecke entladen (76 kWh) wurde, obwohl zu dieser Zeit kein Heizwärmebedarf bestand. Im realen Betrieb wäre dieses Segmentpaar z.B. im März noch für die Gebäudebeheizung verfügbar. Von September bis April wurden 623 kWh durch Adsorption frei.

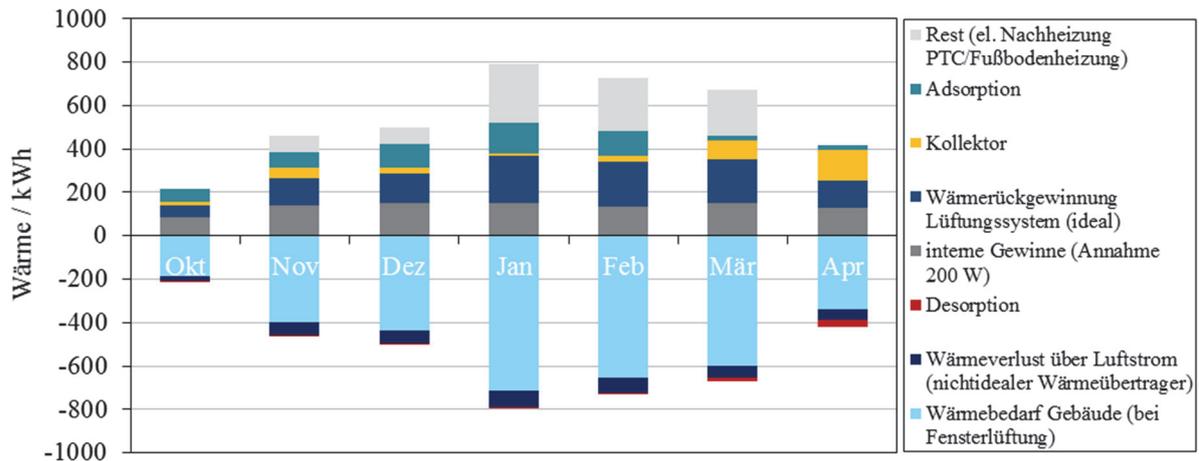


Abbildung 63: Wärmequellen und -senken des Gebäudes, Messdaten der Heizperiode 2015/2016, Annahme interne Gewinne 200 W

Wie in Kapitel 2.8.2 beschrieben blieb die Kollektorleistung hinter den Erwartungen zurück. Der mittlere Kollektornutzungsgrad ist mit weniger als 5 % sehr gering, der Kollektorertrag dementsprechend niedrig. Zudem ist in dem unbewohnten SolSpaces Gebäude weniger Feuchte vorhanden, als es in einem bewohnten Gebäude der Fall wäre. Dies hat Auswirkungen auf die vom Sorptionswärmespeicher verfügbare Heizleistung.

Abschließend soll daher nochmals dargestellt werden, wie sich das solare Heizsystem unter realistischen Bedingungen, d.h. einem Kollektor mit besserer Leistungsfähigkeit und einer höheren Luftfeuchte, verhielte.

Dazu wird nochmals auf die Prognoseberechnung aus Kapitel 2.2.5 zurückgegriffen. Dort wurde basierend auf den Messdaten für Luftfeuchte und Strahlungsangebot aus dem Jahr 2014/2015 und unter der Vorgabe von Kollektornutzungsgrad, Luftwechselrate, internen Gewinnen, etc. die Energieanteile berechnet.

Werden für diese Berechnung nun die Randbedingungen als Vorgaben verwendet wie sie während der Monitoringphase des solaren Heizsystems tatsächlich vorlagen, d.h. ein Kollektornutzungsgrad von 5 %, eine Luftwechselrate von 0,6/h und eine gegenüber den Messdaten um 1,5 g/kg reduzierte Luftfeuchte<sup>6</sup>, so ergibt sich das in Abbildung 64 gezeigte Diagramm. Das berechnete Verhalten ist dem der Messdaten aus 2015/2016 ähnlich (vergleiche Abbildung 63). Die Modellrechnung ergibt einen Deckungsanteil von rund 53–59 % von Dezember bis Februar, sowie von 85 % und 89 % im November und März. Unterschiede im Heizwärmebedarf ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Wetterbedingungen. Insbesondere war der Dezember 2015 wärmer, während März und April 2016 kälter waren als im jeweiligen Vorjahr. Insgesamt könnten in diesem Szenario 613 kWh durch Adsorption bereitgestellt werden.

<sup>6</sup> Das Monitoring hat gezeigt, dass die vorhandene Feuchte nicht vollständig vom Speicher ausgenutzt wird. Für die Berechnung wird daher die gemessene Feuchte reduziert, nur diese reduzierte Feuchte steht in der Berechnung dann zur Adsorption zur Verfügung. D.h. es wird davon ausgegangen, dass nicht die gesamte gemessene Feuchte sondern nur ein Teil der im Raum gemessenen Feuchte adsorbiert wird.

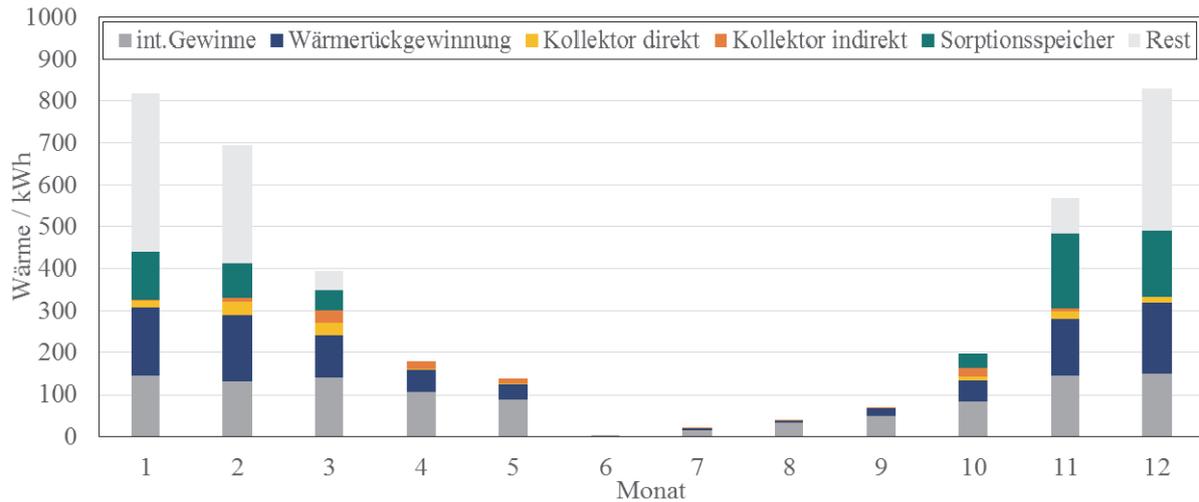


Abbildung 64: Wärmequellen zur Gebäudebeheizung, Prognose basierend auf Messdaten der Heizperiode 2014/2015 mit Annahmen entsprechend dem tatsächlichen System: geringer Kollektornutzungsgrad, niedrige Luftfeuchte (unbewohntes Gebäude)

Das Prognosemodell scheint somit geeignet, um Vorhersagen zu monatlichen Wärmemengen und Deckungsgraden zu machen.

Wird der Kollektornutzungsgrad in der Berechnung auf realistische 40 % erhöht und die Feuchte gegenüber Abbildung 64 um 1,5 g/kg angehoben (erhöhte Feuchte im bewohnten Gebäude), so hätte sich der Heizwärmebedarf im Dezember zu 74 %, im Januar zu 70 % und im Februar zu 89 % decken lassen. Die jährliche Deckung wäre dann 86 %. Die Ergebnisse dieser Prognoseberechnung für das solare Heizsystem mit einem ordnungsgemäß funktionierenden Kollektor und Bewohnern im Haus sind in Abbildung 65 dargestellt. Der Sorptionswärmespeicher wäre nur von November bis Februar zum Heizen benötigt worden. Vom Speicher wären in dieser Zeit 635 kWh bereitgestellt worden. Von März bis Oktober wäre der Heizwärmebedarf durch den Kollektor gedeckt worden.

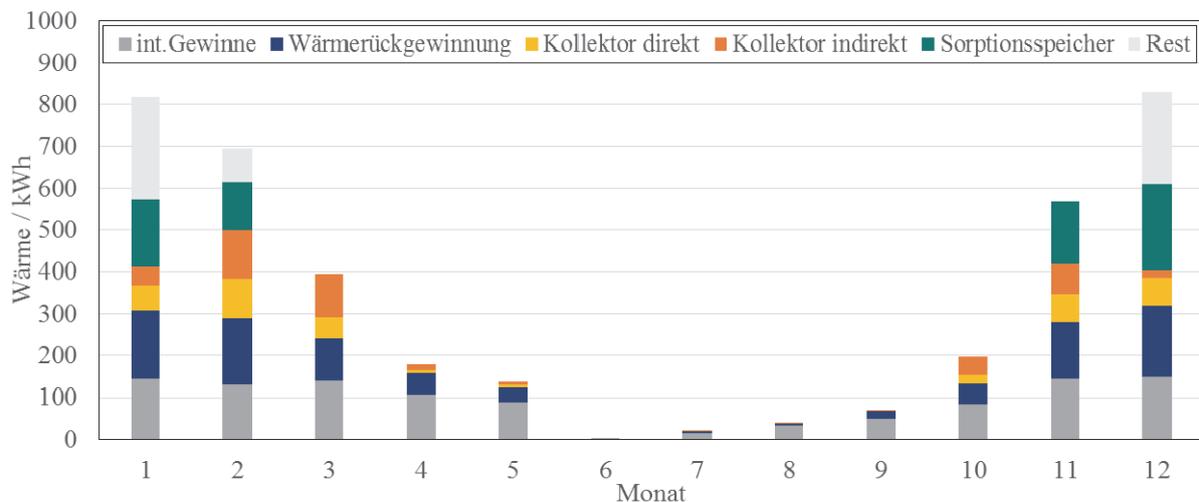


Abbildung 65: Wärmequellen zur Gebäudebeheizung, Prognose basierend auf Messdaten der Heizperiode 2014/2015 mit realistischen Annahmen bezüglich Kollektornutzungsgrad und erhöhter Luftfeuchte (bewohntes Gebäude)

### 3 Zusammenfassung

Ziel des Projekts SolSpaces war die Entwicklung und Erprobung einer solarthermischen Gebäudebeheizung, die durch eine saisonale Speicherung, basierend auf sorptiver Wärmespeicherung, eine möglichst vollständige Wärmeversorgung ermöglicht. Das Heizungskonzept wurde am Beispiel des neuen innovativen Gebäudetyps „Flying Spaces“ der SchwörerHaus KG erarbeitet. Dieser Gebäudetyp wurde ausgewählt, da er aufgrund seiner Dimensionen hohe Ansprüche an die Kompaktheit und Integration des Heizungssystems stellt und andererseits aufgrund des Volumen/Oberflächenverhältnisses einen Wärmebedarf aufweist, der tendenziell auch auf größere Gebäude übertragbar ist. Ein „Flying Spaces“ Gebäude wurde auf dem Universitätscampus in Stuttgart-Vaihingen errichtet. Das neue solare Heizsystem wurde darin integriert und während der Heizperiode 2015/2016 erprobt und messtechnisch untersucht.

Die wesentlichen Komponenten des solaren Heizsystems sind ein Sorptionswärmespeicher für die saisonale Wärmespeicherung und ein Vakuumröhren-Luftkollektor zur direkten Gebäudebeheizung oder zur Beladung des Sorptionswärmespeichers. Die Besonderheit des neu entwickelten Sorptionswärmespeichers ist dessen Segmentierung, d.h. die Unterteilung des Materialvolumens in mehrere Bereiche, die den Einsatz von großen Materialvolumina und damit die Realisierung großer Speicherkapazitäten erst ermöglicht.

Ein solcher Speicher, mit 4,3 m<sup>3</sup> Zeolith als Speichermaterial, wurde im Rahmen dieses Projekts erstmalig entworfen, konstruiert und in realer Größe aufgebaut. Die Speicherkonstruktion zeichnet sich durch einen einfachen Aufbau aus und beinhaltet nur wenige bewegliche Teile. Im Hinblick auf eine Serienfertigung ist diese leicht und kostengünstig umsetzbar. Es wurde eine Regelstrategie entwickelt und in ein Mess- und Steuerprogramm implementiert. Damit konnte ein automatischer Betrieb in der Heizperiode 2015/2016 erfolgreich realisiert werden. Während der Erprobung und messtechnischen Untersuchung hat sich gezeigt, dass der Speicher im Wesentlichen wie erwartet und entsprechend der Auslegung funktioniert.

Zur vollständigen Deckung des Heizwärmebedarfs war noch ein gewisser Anteil an Zusatzenergie notwendig. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass dieser Nachheizbedarf zu großen Teilen dem Kollektor geschuldet ist. Für das solare Heizsystem wurde ein neu auf dem Markt verfügbarer Vakuumröhren-Luftkollektor eingesetzt, der durch einen speziell konstruierten CPC-Reflektor für die hohen Temperaturen ausgelegt war, dessen Leistungsfähigkeit aber aufgrund undichter Vakuumverbindungen in den Kollektorröhren noch deutlich hinter den Erwartungen zurück blieb. Durch kontinuierliche Entwicklungsarbeiten des Kollektorherstellers an diesem Problem wird in Kürze ein vollständig überarbeitetes Nachfolgemodell des Vakuumröhren-Luftkollektors zur Verfügung stehen.

Die energetische Bilanzierung des Speichers ergab eine gute Übereinstimmung mit der erwarteten Leistungsfähigkeit. Die theoretische Speicherkapazität beträgt für die vorliegenden Randbedingungen etwa 700 kWh. In der Heizperiode 2015/16 wurde diese Wärmemenge vom Speicher durch den Adsorptionsprozess annähernd bereitgestellt (623 kWh). Damit kommt der Speicher bereits sehr nahe an den theoretisch erwarteten Bereich heran.

Die detaillierte messtechnische Untersuchung hat aber auch gezeigt, dass das Verhalten des solaren Heizsystems bzw. die Vorgänge im Speicher noch nicht in jeder Hinsicht optimal ablaufen. So konnte z.B. die vorhandene Raumluftheuchte für die Wärmefreisetzung nicht jederzeit zu 100 % genutzt werden kann. Grundsätzlich hat sich zwar gezeigt, dass selbst für das unbewohnte Gebäude die über die Heizperiode nutzbare Raumluftheuchte ausreichend war, um das verfügbare Sorptionsmaterial zu einem hohen Grad mit Wasser zu beladen und so die

gespeicherte Wärme freizusetzen. Dennoch besteht hier zur Realisierung eines möglichst effizienten Betriebs sowohl Verbesserungsbedarf als auch Optimierungspotential, was in einem nachfolgenden Projekt erarbeitet werden soll. In diesem Zusammenhang birgt auch die Regelung noch Potential für ein verbessertes Betriebsverhalten, das in Zukunft erschlossen werden soll.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass in diesem Projekt durch den erfolgreichen Betrieb des solaren Heizsystems mit Sorptionswärmespeicher die Technologie der offenen sorptiven Langzeitwärmespeicherung erstmals in einem Wohngebäude demonstriert werden konnte.

#### 4 Veröffentlichungen

In Bezug auf das Projekt SolSpaces erfolgten folgende Veröffentlichungen:

- **Innovationsforum der 3. Solarthermie-Technologiekonferenz, 30.–31.01.2013**  
SolSpaces – Solare Wärmeversorgung mit Sorptionswärmespeicher (Posterbeitrag)
- **OTTI – 23. Symposium Thermische Solarenergie, 24.04.2013–26.04.2013**  
SolSpaces – Entwicklung und Erprobung einer autarken solaren Wärmeversorgung für energieeffiziente Kompaktgebäude - Eine Konzeptvorstellung - (Posterbeitrag)
- **Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien 2012**  
Verbundvorhaben: Entwicklung und Erprobung einer autarken solaren Wärmeversorgung für energieeffiziente Kompaktgebäude
- **Presseberichte zur Gebäudeerrichtung**
  - Pressemitteilung Universität Stuttgart: Sommersonne für Heizung im Winter, Universität Stuttgart erhält Forschungshaus für Solar-Wärmespeicherung, 26.11.2013
  - Stuttgarter Zeitung: Heizen nur mit Sonnenenergie, 27.11.2013
  - Stuttgarter Nachrichten: Sommerwärme für kalte Monate, 27.11.2013
  - Baunetz Wissen: Forschungshaus SolSpaces für solare Wärmespeicherung
  - EUWID Energieeffizienz: Universität Stuttgart erforscht Solar-Wärmespeicherung im Wohnhaus, 27.11.2013
  - SolarServer, Universität Stuttgart erhält Forschungshaus für Solar-Wärmespeicherung, 01.12.2013
  - ...
- **BINE Informationsdienst, Energieforschung für die Praxis, 16.04.2014**  
Projekt SolSpaces – Die Sommerwärme bis zum Winter speichern
- **Gleisdorf Solar 2014, 11. Internationale Konferenz für solares Heizen und Kühlen, 25.–27.06.2014**  
SolSpaces – Entwicklung einer vollständig solaren Wärmeversorgung für energieeffiziente Kompaktgebäude – erste Ergebnisse (Vortrag)
- **EuroSun 2014, International Conference on Solar Energy and Buildings, 16.–19.09.2014**  
Development of a segmented sorption store within the project „SolSpaces“ (Posterbeitrag)
- **Tagung Kompakte thermische Energiespeicher, Veranstalter BMVIT und AEE Intec, Wien, 23.10.2014**  
Wärmespeicherung durch offene Sorptionssysteme (Vortrag)
- **Errichtung einer Informationstafel vor dem SolSpaces Gebäude, 11.06.2014**

- **OTTI Fachforum Energieeffizienzhaus-Plus – Innovative Gebäude mit erneuerbaren Energie, 14.–15. Juli 2015**  
SolSpaces – Konzept und Realisierung eines solaren Heizsystems mit Sorptionswärmespeicher (Vortrag)
- **SHC 2015, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, 2.–4. Dezember 2015**  
SolSpaces – Concept verification of a new solar heating system with sorption store (Vortrag)  
SolSpaces – Testing and performance analysis of a segmented sorption store for solar thermal space heating (Posterbeitrag)
- **Energy Procedia 91 (2016) 250–258**  
Testing and performance analysis of a segmented sorption store for solar thermal space heating (doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.214)

### Danksagung

Das Projekt „SolSpaces – Entwicklung und Erprobung einer autarken solaren Wärmeversorgung für energieeffiziente Kompaktgebäude“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und vom Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 0325984 betreut. Die Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung.



## Literatur

- [1] DINCERTCO. Testbericht zur Charakterisierung eines Solar-Luft-Kollektors in Anlehnung an EN 12975-1,2:2006, Kollektormodell: Sun-Storm, Kollektorfabrik GmbH & Co. KG
- [2] T. Hartmann et al. Bedarfslüftung im Wohnungsbau, Final report, 2001.
- [3] J. Jänchen, K. Schumann, E. Thrun, A. Brandt, B. Unger, U. Hellwig. Preparation, hydro-thermal stability and thermal adsorption storage properties of binderless zeolite beads. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 7, 275–279, 2012.
- [4] B. Mette. Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Reaktionsführung thermochemischer Energiespeicher, Dissertation, Universität Stuttgart, 2014.
- [5] B. Mette. Measurement of water vapour adsorption isotherms of zeolite 13XBF, Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering, University of Stuttgart, 2012.
- [6] H. Kerskes, F. Bertsch, S. Asenbeck, B. Mette. CWS – Verbundvorhaben chemische Wärmespeicherung mittels reversibler Feststoff-Gasreaktionen – Teilvorhaben Niedertemperatur- Wärmespeicherung, Abschlussbericht. 2012.
- [7] H. Kerskes, R. Weber, S. Asenbeck, H. Drück. SolSpaces – Concept verification of a new solar heating system with sorption store, SHC 2015, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, 2.–4.12.2015, Istanbul.
- [8] H. Kerskes, R. Weber, O. Barrena, H. Drück. Development of a segmented sorption store within the project „SolSpaces“, EuroSun 2014, International Conference on Solar Energy and Buildings, 16.–19.09.2014.
- [9] J. Schnieders. Passive Houses in South West Europe. Dissertation, TU Kaiserslautern, 2009.
- [10] SchwörerHaus KG. FlyingSpaces – mobil wohnen <https://www.schworerhaus.de/de/haeuser/flyingspaces>, Stand: Februar 2016.
- [11] R. Weber, S. Asenbeck, H. Kerskes, H. Drück. SolSpaces – Konzept und Realisierung eines solaren Heizsystems mit Sorptionswärmespeicher, OTTI Fachforum Energieeffizienzhaus-Plus – Innovative Gebäude mit erneuerbaren Energien, 14.–15.07.2015, Hamburg.
- [12] R. Weber, S. Asenbeck, H. Kerskes, H. Drück, SolSpaces – Testing and performance analysis of a segmented sorption store for solar thermal space heating, *Energy Procedia* 91 (2016) 250–258.