

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

MonoSorp

Integrales Konzept zur solarthermischen Gebäudeheizung mit Sorptionswärmespeicher

von

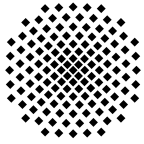
H. Kerskes, K. Sommer, H. Müller-Steinhagen

Universität Stuttgart
Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

Förderkennzeichen: BWK 25006

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

September 2007



UNIVERSITÄT STUTTGART
INSTITUT FÜR THERMODYNAMIK UND WÄRMETECHNIK
Professor. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen



MonoSorp

**Ein integrales Konzept zur solarthermischen Gebäudeheizung mit
Sorptionswärmespeicher**

- Abschlussbericht -

Förderungsnummer: BWK25006

*H. Kerskes, K. Sommer, H. Müller-Steinhagen
Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart*

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	iv
2 MonoSorp - Beschreibung des Verfahrens	1
2.1 Vorteile gegenüber bekannten Verfahren	1
2.2 Einbindung der gewonnenen Warmluft in den Heizprozess des Gebäudes	2
2.3 Desorption des Speichers in den Sommermonaten	3
3 Aufgabenstellung und Ziele des Forschungsvorhabens	5
3.1 Arbeitsprogramm	5
3.1.1 Arbeitspunkte	5
4 Stand der Technik	7
4.1 Sorptionsspeicher UFE-Solar - ISE	7
4.2 AEE-Intec, Österreich	8
4.3 Zeolith-Speicher im Fernwärmenetz, ZAE Bayern	9
4.4 Mobile Wärmespeicherung mit Adsorptions-Materialien, ZAE Bayern	9
4.5 Untersuchungen SPF Rapperswil	9
5 Aufbau der Versuchsanlage	10
5.1 Simulationsstudie zur Auslegung der Demonstrationsanlage	10
5.2 Auslegung der Anlagenkomponenten	10
5.2.1 Geometrie des Speichers	10
5.2.2 Konstruktion der Ein- und Ausströmöffnungen des Speichers	11
5.2.3 Anlagenverschaltung	11
5.2.4 Auslegung der Wärmeübertrager	12
5.3 Entwicklung und Aufbau der Versuchsanlage	12
5.3.1 Versuchsspeicher	12
5.3.2 Solarkollektoren	14
5.3.3 Wärmeübertrager	15
5.3.4 Sonstige Bauteile	16
5.3.5 Messtechnik	17
5.4 Auswahl und Herstellung der Monolithe	19
5.4.1 Ermittlung der Adsorptionskinetik	20
5.4.2 Bestimmung der benötigten Desorptionstemperatur ϑ_{des}	22
5.4.3 Herstellung der Monolithe	22

6	Experimentelle Untersuchungen	26
6.1	Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit	26
6.1.1	Adsorptions-Experimente an Kugelschüttung	26
6.1.2	Adsorptions-Experimente am Monolith-Speicher	28
6.2	Solarthermische Regeneration des Speichers	31
6.2.1	Desorption der Kugelschüttung mittels Solarkollektor	31
6.2.2	Stationäre Desorption mittels elektrischem Heizstab	32
6.2.3	Instationäre Desorption mittels elektrischem Heizstab	32
6.2.4	Solarthermische Desorption	33
7	Numerische Simulation	35
7.1	Anforderungen an das Simulationsmodell	35
7.2	Simulation des Adsorptions- und Desorptionsprozesses mit PDEX	35
7.2.1	Modellannahmen	36
7.3	Bilanzgleichungen	37
7.3.1	Randbedingungen	38
7.3.2	Beschreibung der Transportgrößen	38
7.3.3	Berechnung des übergehenden Stoffstroms	38
7.3.4	Berücksichtigung der Diffusionshemmung	39
7.3.5	Bestimmung des Adsorptionsgleichgewichts X_{GG,H_2O}	40
7.3.6	Bestimmung der mittleren Adsorptionsenthalpie $\Delta\bar{h}_{ads}$	41
7.4	Simulation des Gebäudes inkl. Kombianlage mit TRNSYS	42
7.5	Beschreibung der Kombianlage	42
7.6	Koppelung von TRNSYS und PDEX	43
7.7	Untersuchung der Regelparameter zur Regeneration des Sorptionswärmespeichers	44
7.7.1	Regelungen	45
7.7.2	Begriffsdeklarationen	47
7.7.3	Ausgangskonfiguration	48
7.7.4	Regeltemperatur ϑ_{PID}	48
7.7.5	Obere Kollektoraustrittstemperatur ϑ_{ein}	49
7.7.6	Untere Kollektoraustrittstemperatur ϑ_{aus}	50
7.7.7	Obere Speichertemperatur ϑ_{sto}	52
7.7.8	Wirkungsgrad des Luft/Wasser-Wärmeübertragers	52
7.8	Schlussfolgerung der Parametervariation	54
7.9	Ergebnis der Jahressimulation	54
8	Bewertung des Verfahrens	59
8.1	Bewertung aus thermodynamischer Sicht	59
8.1.1	Wie hoch ist die erzielbare Energiespeicherdichte des Speichermaterials?	59
8.1.2	Wie hoch sind die Wärmeverluste über einen längeren Speicherzeitraum?	60
8.1.3	Wie hoch ist der Speicher-Nutzungsgrad?	60
8.2	Der Speicher als Teil der Gebäudesystemtechnik	60
8.2.1	Wie groß ist der Aufwand für den Aufbau einer MonoSorp-Anlage?	60
8.2.2	Wie hoch ist die erzielbare Heizleistung?	61
8.2.3	Ist die Raumlufffeuchte für Heizzwecke ausreichend?	61
8.2.4	Wie hoch ist der Heizwärmebedarf des Gebäudes?	61
8.2.5	Trocknet das Gebäude durch die Nutzung der Raumlufffeuchte aus?	62
8.2.6	Wie hoch ist der Systemwirkungsgrad?	64
8.2.7	Ist die Anlage zur Warmwasserbereitung geeignet?	64
8.3	Bewertung des Speichermaterials	64

8.3.1	Gute Adsorptionseigenschaften versus Materialkosten	65
8.3.2	Monolithe versus Kugelschüttung	65
8.3.3	Wie hoch ist die Betriebsdauer des Speichermaterials?	65
8.4	Vergleich mit einem saisonalen Warmwasserspeicher	66
8.4.1	Wie groß ist der Raumbedarf der MonoSorp-Anlage im Vergleich zu einem saisonalen Warmwasserspeicher?	66
8.4.2	Wie hoch sind die Kosten eines MonoSorp-Speichers im Vergleich mit einem saisonalen Warmwasserspeicher?	66
9	Einbindung der Arbeiten in die Task 32 der Internationalen Energieagentur (IEA)	67
9.1	Organisation und Struktur der Task	67
9.2	Forschungsschwerpunkte	67
9.2.1	Physikalisch-chemische Wärmespeicher	68
9.2.2	Wärmespeicherung in Phasenwechselmaterialien (PCM)	68
9.2.3	Innovative Warmwasserspeicher	69
9.3	Erste Ergebnisse	70
10	Ergebnisse	72
10.1	Erreichte Ziele	72
10.2	Nicht erreichte Ziele	74
11	Forschungsbedarf	75
11.1	Entwicklung eines Wärmemanagements zur Regeneration	75
11.2	Entwicklung einer anwendungstauglichen Systemregelung	75
11.3	Speichermaterial	76
11.4	Vermessung einer Demonstrationsanlage	77
12	Zusammenfassung	78
13	Ausblick	80

Kapitel 1

Einleitung

Am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart wurde ein neues Verfahren basierend auf einer sorptiven Langzeitwärmespeicherung zur solarthermischen Gebäudebeheizung entwickelt. Das Verfahren beruht auf der Adsorption von Wasserdampf an zeolithischen Wabenkörpern. Dabei werden in einem offenen Prozess aus Zeolithenpulver extrudierte Wabenkörper von feuchter Raumluft durchströmt. Die austretende erwärmte Luft wird in Verbindung mit einer kontrollierten Gebäudebelüftung mit Wärmerückgewinnung zur Erwärmung der Frischluft genutzt. Die Regeneration des Speichers erfolgt solarthermisch in den Sommermonaten.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Erprobung des Verfahrens in verkleinertem Maßstab. Dazu wurde eine Versuchsanlage entwickelt und aufgebaut, mit der das Verfahren unter realitätsnahen Betriebsbedingungen messtechnisch untersucht werden kann. Hierbei wurden bis auf den Sorptionspeicher handelsübliche Komponenten der Heizungs-, Klima- und Solartechnik eingesetzt. Am Institut für Kunststofftechnologie (IKT) der Universität Stuttgart wurden unterschiedliche Proben von Wabenkörpern hergestellt und ihre thermischen Eigenschaften am ITW untersucht. Anschließend wurde die benötigte Menge der ausgewählten Wabenkörper am IKT hergestellt. Adsorptions- und Desorptionsexperimente zeigen, dass die Auslegung der Versuchsanlage zielführend war. Die Messungen belegen, dass die theoretisch berechnete Wärme durch die Adsorption von Raumluftfeuchte bereitgestellt werden kann. Weiter konnte gezeigt werden, dass es mit den ausgewählten Anlagenkomponenten (Wärmeübertrager und Kollektor bzw. elektrischer Kollektorsimulator) gelingt, die benötigte Regenerationstemperatur von 180°C zur Verfügung zu stellen.

Potenzial der solarthermischen Heizungsunterstützung

Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung sind seit vielen Jahren fest im Markt etabliert. Die solare Heizungsunterstützung galt dagegen noch vor ca. 15 Jahren in Nord- und Mitteleuropa als nicht sinnvoll. Diese Einschätzung hat sich in den letzten Jahren grundlegend geändert. Aufgrund verbesserter Systemtechnik und niedrigerem Heizenergiebedarf moderner Gebäude (bei gleichzeitig niedrigerem Temperaturniveau) sowie neuen Richtlinien bei der Gebäudeplanung (EnEV) haben sich die Randbedingungen für den Einsatz solarer Heizungsunterstützung entschieden verändert. Heute bieten bereits viele Firmen Solaranlagen zur Heizungsunterstützung an. Mit diesen Anlagen ist eine Deckung des Wärmebedarfs eines modernen Einfamilienhauses von 20 bis 30% möglich.

Solaranlagen zur Heizungsunterstützung und Trinkwassererwärmung, kurz Kombianlagen genannt, erreichen eine immer größere Marktbedeutung. Experten rechnen mit einem weiter ansteigendem Marktanteil nicht nur in Deutschland sondern in Europa insgesamt. Der Wunsch nach höheren Beiträgen bei der Nutzung solarthermischer Energie in Verbindung mit besseren technischen Möglichkeiten hat in den letzten Jahren zu einer deutlichen Belebung dieses Marktsegmentes geführt. Auch wenn derzeit noch ca. 75% aller installierten thermischen Solaranlagen ausschließlich zur Trinkwassererwärmung eingesetzt werden, so liegt das Hauptaugenmerk der technischen Entwicklung fast

vollständig bei neuen Systemen zur solaren Raumheizung.

Eine Betrachtung der energetischen Situation am Beispiel der Bundesrepublik Deutschland macht deutlich, welche ökonomischen wie ökologischen Möglichkeiten in der Nutzung thermischer Solarenergie steckt.

Etwa 70% des Energiebedarfs in privaten Haushalten wird für die Raumheizung und Warmwasserbereitung aufgewendet. Laut einer Studie der AG Energiebilanzen [1] betrug der Endenergieverbrauch im Jahre 2001 in der Bundesrepublik 9469 PJ. Davon entfallen 33,9% auf die Bereitstellung der Raumheizungswärme. Allein die privaten Haushalte benötigten 2235 PJ (23,6%) für die Gebäudeheizung. Dieses Potenzial von umgerechnet 620 Milliarden kWh kann theoretisch durch thermische Solaranlagen gedeckt werden.

Die Erschließung dieses Marktes steht erst am Anfang. Im Jahr 2000 waren etwa 360 000 Solaranlagen installiert, damit waren ca. 3% aller Ein- und Zweifamilienhäuser mit Solaranlagen ausgestattet. Mittlerweile ist der Anteil auf etwa 4-5 % angestiegen. Der Beitrag am Endenergieverbrauch beträgt ca. 0,3%. Das enorme Erschließungspotenzial ist sicherlich ein Grund für die drastische Entwicklung des thermischen Solarmarktes. In den zurückliegenden Jahren betrug die Wachstumsrate zwischen 20 und 30%. Für 2005 erwartet die ARGE Solarwirtschaft [2] einen Anstieg der installierten Solaranlagen auf 1,5 Millionen und bis 2010 auf etwa 4,5 Millionen Anlagen. Die sich stark entwickelnde Solarindustrie muss nach Vorstellungen der ARGE Solarwirtschaft durch intensive Forschungstätigkeiten unterstützt werden. Ziele der Entwicklungsarbeit sind die Erhöhung des Systemwirkungsgrads, die Erhöhung des solaren Deckungsanteils bei der Heizungsunterstützung und Kostenreduktion. Um dies zu erreichen schlägt die ARGE Solarwirtschaft in ihrem Beitrag "Perspektiven der Solarwärmennutzung in Deutschland"[2] unter anderem vor:

- Optimierung des Solarspeichers zur Erhöhung des solaren Deckungsanteils
- Integration von Solaranlage, Lüftung und Heizung

Die Europäische Union hat sich zum Ziel gesetzt, in Europa bis zum Jahr 2010 eine installierte Kollektorfläche von 100 Millionen Quadratmetern zu erreichen. Zur Umsetzung dieser Aufgabe werden von Seiten der EU massive Massnahmen zur weiteren Entwicklung der Solarbranche und Steigerung der Nachfrage ergriffen. Mit einem weiterhin starken Anstieg des thermischen Solarmarktes ist zu rechnen.

Zur Entwicklung von Kombianlagen

Bereits 1999 hat der Deutsche Fachverband Solarenergie (heute Bundesverband Solarindustrie BSi) zusammen mit dem ITW unter Beteiligung von 20 Herstellern von thermischen Solaranlagen ein zweijähriges Projekt gestartet mit dem Ziel, das damals schon deutlich spürbare Interesse an dieser noch jungen Technologie zu verstärken und durch zielgerichtete Entwicklungen die Marktchancen zu verbessern. In diesem Projekt wurden wichtige Grundlagen sowie Prüfverfahren erarbeitet, um den Entwicklern und Anbietern mehr Sicherheit in der Bewertung der eigenen Produkte zu geben und den Kunden eine vernünftige Kaufentscheidung zu ermöglichen.

Heute bieten nahezu alle namhaften Hersteller Kombianlagen an. Viele Entwicklungen beruhen auf den im Projekt Kombianlagen erzielten Ergebnissen.

Auf internationaler Ebene hat die Task 26 der Internationalen Energieagentur (IEA) sich ebenfalls mit dem Thema "Solar Combisystems" beschäftigt. Nach einer Laufzeit von 4 Jahren wurde im Dezember 2002 vielversprechende Ergebnisse bezüglich Potenzial und Weiterentwicklung von Kombianlagen in Europa und USA veröffentlicht.

Die intensiven Anstrengungen aller beteiligten Gruppen (Verbände, Forschungsinstitute und Hersteller) haben diese rasante Entwicklung der solarthermischen Heizungsunterstützung vorangetrieben.

Den Erfolg dieser Entwicklung bestätigte auch die von der Stiftung Warentest in Auftrag gegebene Untersuchung. Elf Kombianlagen wurden in den Bereichen "Thermische Leistungsfähigkeit", "Betrieb und Verarbeitung", "Umwelteigenschaften und Sicherheit" untersucht. Durchweg konnten gute und sehr gute Noten bescheinigt werden.

Kombianlagen liefern bei einer typischen Größe von 10 bis 15 m² Kollektorfläche und einem Speichervolumen von 500 bis 1000 Litern eine jährliche Energieeinsparung von bis zu 30 % des Wärmedarfs eines Einfamilienhauses. Bezüglich der Wärmegestehungskosten stehen Kombianlagen den kleineren Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung fast nichts mehr nach.

Notwendige Entwicklungsschritte

Aufgrund der jährlichen Ungleichverteilung zwischen solarem Angebot und Wärmebedarf ist ein einfaches "upscaling" der bestehenden Systeme nicht effizient. Vielmehr müssen neue Wege realisiert werden, um auch in Zeiten geringer solarer Einstrahlung genügend Heizwärme zur Verfügung zu stellen.

Das hier vorgestellte Verfahren stützt sich dabei auf den Mechanismus der adsorptiven Wärmeerzeugung. Dieses Verfahren ist seit langem bekannt. Neu ist hier jedoch die Art und Weise, in der der Adsorptionsprozess verfahrenstechnisch in das Gesamtkonzept eingebunden ist.

Die Wärmespeicherung beruht auf der Nutzung der Wärme, die bei der Adsorption und Desorption von Wasserdampf an technischen Adsorbentien wie z.B. Silikagelen und Zeolithen umgesetzt wird. Diese hochporösen Materialien haben die Eigenschaft, Wasserdampf stark anzuziehen und unter Wärmeabgabe an ihrer Oberfläche zu binden (Adsorption). Umgekehrt wird bei Erwärmung des Adsorptionsmaterials der gebundene Wasserdampf wieder freigesetzt (Desorption). Silikagele sind glasartige amorphe Silikate, die großtechnisch hauptsächlich als Trocknungsmittel eingesetzt werden. Zeolithe werden in einer Vielzahl von technischen Anwendungen eingesetzt und ebenfalls großtechnisch hergestellt.

Sorptionsprozesse sind für die Langzeitspeicherung von Wärme besonders gut geeignet, da Energieverluste nur während der Be- und Entladephase auftreten und nicht von der Dauer der Speicherung abhängen. Es ist somit keine aufwändige Wärmedämmung notwendig. Zudem werden wesentlich höhere Energiedichten erreicht als in Wasser- oder Latentwärmespeichern (vgl. Tab. 1.1).

	Maximale Energiedichte	Faktor
Wasser	50-60 kWh/m ³	1
Latent	50-120 kWh/m ³	1-2
Adsorption	200-250 kWh/m ³	4-5

Tab. 1.1: Vergleich der Energiedichten verschiedener Technologien zur Wärmespeicherung bei einer Temperaturspreizung von 50 K

Vor dem Hintergrund einer zukünftigen Neustrukturierung der energiepolitischen Rahmenbedingungen (Regeneratives Wärmegesetz) ist besonders jetzt die zügige Entwicklung technisch realisierbarer Lösungen von entscheidender Bedeutung für die Positionierung der Solarthermie im Bereich der erneuerbaren Energieträger. Dies erfordert eine breit angelegte Forschung auf allen Gebieten der thermischen Solarenergie.

Auf internationaler Ebene wurde die Thematik der physikalisch-chemischen Energiespeicherung zur Anwendung in solarthermischen Anlagen zur Gebäudebeheizung von der im Sommer 2003 gestarteten Task 32 der Internationalen Energie Agentur (IEA) aufgegriffen.

Kapitel 2

MonoSorp - Beschreibung des Verfahrens

Das hier vorgeschlagene Verfahren basiert auf der Nutzung der freiwerdenden Adsorptionsenthalpie bei der Adsorption von Wasserdampf an porösen Adsorbentien. Dabei wird in einem offenen Prozess ein aus Zeolithen extrudierter Wabenkörper von feuchter Raumluft durchströmt. Die austretende erwärmte Luft wird in Verbindung mit einer kontrollierten Gebäudelüftung mit Wärmerückgewinnung zur Erwärmung der Raumluft genutzt.

2.1 Vorteile gegenüber bekannten Verfahren

Ziel dieser Überlegungen ist es, ein solares Heizungssystem mit sorptiver Wärmespeicherung zu konzipieren, das eine nahezu vollständige solare Beheizung im Ein- und Mehrfamilienhaus ermöglicht und zusätzlich die Probleme bzw. Nachteile bisher vorgestellter Verfahren (s. Abschnitt 4.1) überwindet. Daraus ergeben sich folgende Forderungen:

1. die Wärmefreisetzung muß unabhängig von der Solaranlage sein
2. ein guter Wärmetransport zwischen Adsorbens und Fluid
3. eine einfache Einbindung in das bestehende Heizsystem

Zu 1.)

Die Fragestellung ist, welche Feuchtequellen genutzt werden können ohne vorher Wasser verdampfen zu müssen.

Prinzipiell stehen zwei Feuchteträgermedien zur Verfügung. Zum einen die feuchte Umgebungsluft und zum anderen die feuchte Raumluft des Gebäudes. Beide Luftströme können zur Wärmefreisetzung im Adsorberbett eingesetzt werden. Wobei hier der feuchten Raumluft der Vorzug zu geben ist, da sie in der Regel in den Wintermonaten eine höhere Feuchte und eine höhere Temperatur aufweist.

Bei Verwendung von feuchter Luft als Wasserdampfträger kommt nur eine offene Betriebsweise der Anlage in Frage. So kann zum Beispiel die feuchte Raumluft durch eine Zeolithschüttung geleitet werden, was zu einer Erwärmung des Adsorberbetts und damit gekoppelt zu einer Erwärmung des Luftstroms führt. Warme, feuchte Raumluft ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi \approx 50\%$) tritt in das Adsorberbett ein und entsprechend erwärmte trockene Luft tritt aus dem Adsorberbett aus.

Zu 2.)

Der Wärmeübergang in Schüttungen ist aufgrund des direkten Kontakts zwischen Fluid und Feststoff, der turbulenten Durchströmung und der großen Übertragungsfläche sehr gut.

Um eine ausreichende Heizleistung zur Verfügung zu stellen, muss der geförderte Volumenstrom entsprechend groß sein (ca. $150\text{ m}^3/h$). Nun haben Schüttungen den Nachteil, dass sie einen erheblichen

Druckverlust erzeugen. Dies wiederum führt zu hohen Gebläseleistungen und damit zu unerwünscht hohen elektrischen Leistungsaufnahmen.

Das Problem des Druckverlusts bei gleichzeitig sehr guten Wärme- und Stofftransporteigenschaften kann mit Hilfe von extrudierten Wabenkörperstrukturen überwunden werden.

Abbildung 2.1 zeigt eine Struktur, die aus Zeolithpulver extrudiert wurde. Am Institut für Kunststofftechnologie (IKT, Prof. Fritz) der Universität Stuttgart, wird seit einigen Jahren erfolgreich an der Herstellung dieser Wabenkörper gearbeitet.

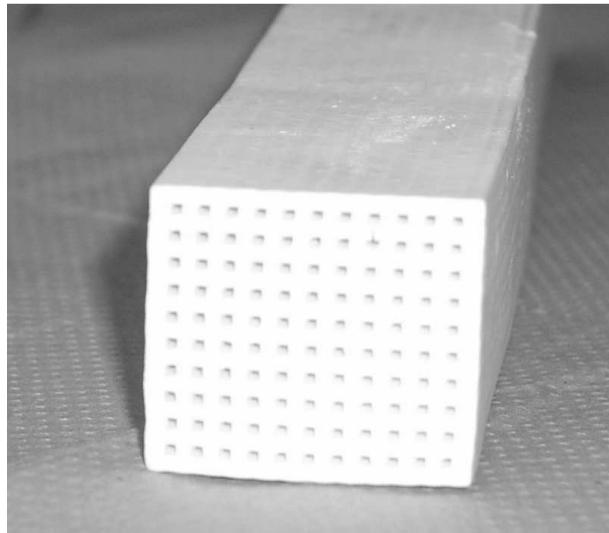


Abb. 2.1: Wabenkörper extrudiert aus Zeolithpulver

Durch die Verwendung dieser Strukturen erhält die offene Betriebsweise von Adsorptionsanlagen eine ganz neue Bedeutung. Wie in [3] beschrieben erreichen diese Strukturen Adsorptionsleistungen, die zum Teil besser sind als in Kugelschüttungen und dies in Verbindung mit einem sehr geringen Druckverlust. Desweiteren bieten diese Strukturen den Vorteil, signifikante Größen wie das Hohlraumverhältnis, den hydraulischen Durchmesser und die Wandstärke in weitem Umfang variieren und den speziellen Bedürfnissen anpassen zu können. Eine evtl. notwendige Unterteilung in mehrere Speichereinheiten ist problemlos möglich. Dabei können beliebige Geometrien (Länge, Höhe, Breite, zylindrisch, kubisch usw.) realisiert und den Einbaubedingungen angepasst werden. Auch die Anforderungen an den die Strukturen umgebenden Behälter sind minimal.

Zu 3.)

Die Einbindung des Speichers in das Heizsystem wird im folgenden Abschnitt erläutert.

2.2 Einbindung der gewonnenen Warmluft in den Heizprozess des Gebäudes

Bei modernen Gebäuden, die den Richtlinien der Energieeinsparverordnung (EnEV) genügen, teilt sich der Wärmebedarf zur Raumheizung folgendermaßen auf:

- Deckung der Transmissionswärmeverluste ca. 1/3
- Deckung der Lüftungswärmeverluste ca. 2/3

Die Transmissionswärmeverluste können durch Verbesserung der Gebäudedämmung weiter vermindert werden. Dabei nimmt das Kosten/Nutzen-Verhältnis mit steigender Dämmstärke zu.

Ein größeres Potenzial bietet die Verminderung der Lüftungsverluste. Aus diesem Grund werden moderne Niedrigenergiehäuser immer häufiger mit einer kontrollierten Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet. Abbildung 2.2 zeigt schematisch eine typische Anordnung. Die verbrauchte Raumluft wird in Räumen mit hoher Luftfeuchtigkeit (Küche, Bad) abgesaugt und über einen Wärmeübertrager nach außen geleitet. Die angesaugte kalte Umgebungsluft wird im Wärmeübertrager vorgewärmt und ins Gebäude eingeblasen (vorzugsweise in Wohn- und Schlafräume). Dadurch lässt sich der Heizwärmebedarf um ca. 30% reduzieren.

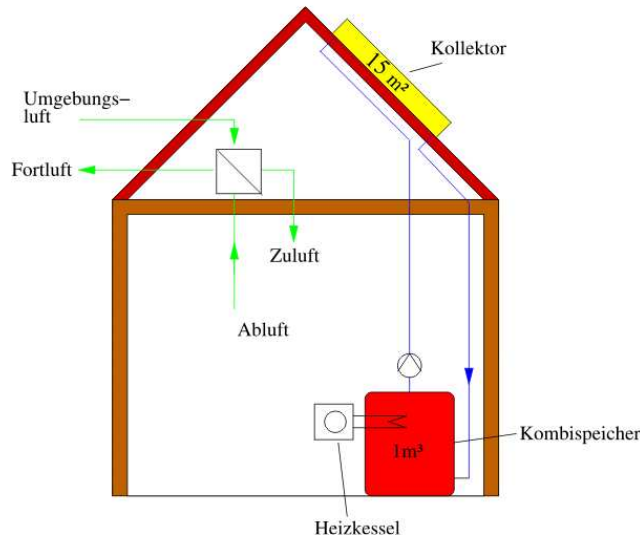


Abb. 2.2: Schematische Darstellung eines Gebäudes mit kontrollierter Lüftung mit Wärmerückgewinnung und typischer Kombianlage

Passivhäuser sind so gut gedämmt, dass das gesamte Gebäude über ein Luftheizungssystem beheizt wird. Hier wird für die Nachheizung des Lüftungsstroms oft eine elektrische Zuheizung im Wärmeübertrager eingebaut.

Nun ist es naheliegend zwischen angesaugter feuchter Abluft und Wärmeübertrager ein Adsorptionsbett zu schalten und so für eine weitere Temperaturerhöhung zu sorgen (vgl. Abbildung 2.3). Jetzt wird im Wärmeübertrager die angesaugte kalte Frischluft über die gewünschte Raumtemperatur ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) erwärmt und kann zur Gebäudebeheizung nach dem Prinzip der Luftheizung beitragen.

Zusätzlich wird die Kombianlage wie üblich betrieben und liefert ihrerseits ca. 3500 kWh Wärme für Heizung und Trinkwassererwärmung.

2.3 Desorption des Speichers in den Sommermonaten

Nachdem der Speicher in den Wintermonaten mit Feuchtigkeit beladen wurde, erfolgt die Desorption des Speichers mit der "Überschusswärme" der Kombianlage in den Sommermonaten (vgl. Abb. 2.4). Mit Überschusswärme ist hier die Wärme gemeint, die zur Verfügung steht, wenn der konventionelle Teil der Solaranlage vollständig mit Wärme versorgt ist. In den Sommermonaten wird lediglich Wärme zur Trinkwassererwärmung benötigt. Eine konventionelle Kombianlage würde nun in Stagnation gehen und keine Wärme mehr produzieren. Bei entsprechend groß dimensionierten Anlagen (30 m^2) sind dies bis zu 2000 Stunden im Jahr ([4]). Diese "Überschusswärme" kann nun je nach Verhältnis von Kollektorfläche zu Sorptionsspeichervolumen vollständig genutzt werden. Diese Tatsache führt zu einer deutlichen Steigerung des Kollektorertrags (nahezu Verdoppelung, s. Abschnitt 7.9!).

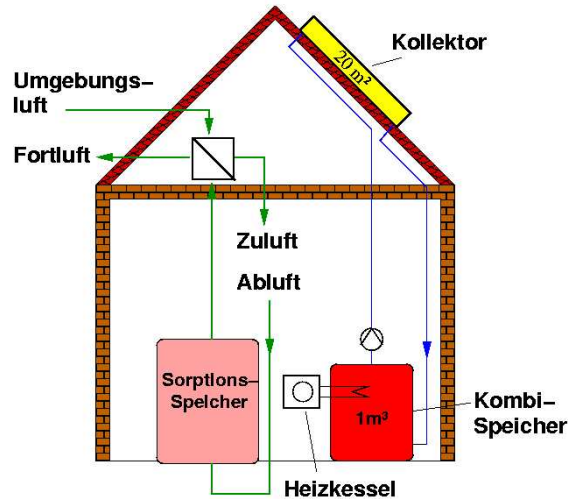


Abb. 2.3: Anlagenschema wie in Abb. 2.2 erweitert um einen Sorptionsspeicher und mit einer vergrößerten Kollektorfläche im Betrieb während der Heizungsperiode (Adsorptionsphase)

In dem hier realisierten Verfahren wird nun der Kollektorkreis zur Regeneration des Sorptionsspeichers verwendet. Wenn die Kollektoraustrittstemperatur $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht hat, wird der Solarkreis über einen zusätzlichen Luft/Wasser-Wärmeübertrager (HX2) geleitet. Auf der Luftseite wird dieser mit einem variablen Volumenstrom ($\dot{V}_{max} = 400\text{ m}^3/h$) mit vorgewärmter Umgebungsluft durchströmt. Die heiße Austrittsluft wird auf eine Zieltemperatur von $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ geregelt und dient zur Regeneration des Sorptionsspeichers.

Diese zusätzliche Wärmesenke führt zu einer optimalen Auslastung der Solaranlage und steigert den Kollektorsertrag um ca. 150% gegenüber bisherigen Betriebsweisen. Die zur Desorption des Adsorbens benötigten Betttemperaturen von ca. $160\text{...}180\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann mit handelsüblichen CPC-Vakuummöhrnkollektoren bei akzeptablen Wirkungsgraden erreicht werden (ca. 40 %, s. Abschnitt 6.2).

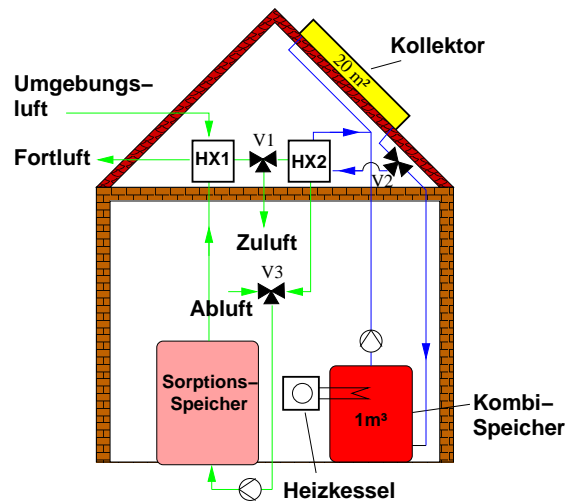


Abb. 2.4: Anlagenschema mit Sorptionsspeicher wie in Abb. 2.3 während der heizungsfreien Zeit (Desorptionsphase)

Kapitel 3

Aufgabenstellung und Ziele des Forschungsvorhabens

Ziel des nachfolgend dargestellten Forschungsvorhabens war es, das oben beschriebene Verfahren "MonoSorp" verfahrenstechnisch umzusetzen und einen Nachweis über die prinzipielle Funktion der Verfahrens zu erbringen. In dem Forschungsvorhaben, das einen zeitlichen Umfang von 18 Personenmonaten hatte, sollte durch experimentelle wie auch theoretische Untersuchungen eine generelle Bewertung bezüglich Eignung zur solothermischen Gebäudebeheizung und Umsetzbarkeit des Verfahrens durchgeführt werden. Eine Optimierung des Verfahrens war nicht Gegenstand dieses Vorhabens.

3.1 Arbeitsprogramm

Die durchgeführten Untersuchungen gliedern sich in einen experimentellen Teil und in einen theoretischen Teil.

Zum experimentellen Nachweis der Funktionsfähigkeit des Verfahrens sollte eine Demonstrationsanlage am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) aufgebaut, die eine Erprobung vorgeschlagenen Verfahrens unter realitätsnahen Betriebsbedingungen ermöglicht.

Detaillierte Simulationsstudien wurden erstellt, um ein besseres Verständnis über die komplexen Abläufe und die Wechselwirkungen und Einflüsse zwischen den Teilsystemen zu erhalten. Dadurch ist eine zielorientierte Vorgehensweise bei der Entwicklung einer optimierten Prozessführung unter transienten Betriebsbedingungen möglich.

3.1.1 Arbeitspunkte

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

1. Simulationsrechnungen zur Auslegung einer Demonstrationsanlage
In dem vorgesehenen Untersuchungszeitraum sollen mehrere Adsorptions- und Desorptionszyklen gefahren werden. Da die Desorption unter realen Bedingungen (Wärmeeintrag durch Kollektor) stattfinden soll, können diese Untersuchungen nur im Sommer durchgeführt werden. Ein Zyklus mit vollständiger Be- und Entladung des Versuchsspeichers soll nicht länger als eine Woche dauern. Durch Simulationsrechnungen ist das unter diesen Randbedingungen erforderliche Speichervolumen zu ermitteln.
2. Auslegung der Anlagenkomponenten
3. Herstellung der Formkörper
4. Aufbau der Versuchsanlage inkl. Kollektorkreis zur Desorption auf dem Prüfstand
Auf dem Testgelände des ITW wird eine Versuchsanlage aufgebaut, die alle Komponenten des vorgestellten Systems enthält.

5. Experimentelle Untersuchungen

- Experimentelle Überprüfung der thermischen Leistungsfähigkeit
In einer ersten Versuchsreihe sollen die bisher aus Laboruntersuchungen und Simulationsrechnungen gewonnenen Ergebnisse überprüft werden. Dazu wird das System unter realen Einsatzbedingungen betrieben.
- Bestimmung der adsorbierten Wassermenge unter typischen Betriebsbedingungen und Bestimmung der tatsächlichen Speicherdichte.
- Untersuchungen zur Regeneration des Speichers
Während die Wärmefreisetzung durch Adsorption keine technische Schwierigkeit darstellt, wirft die Regeneration des Speichers unter Verwendung der Solarstrahlung als Energiequelle weiteren Forschungsbedarf auf. In den experimentellen Untersuchungen sollen die notwendigen Randbedingungen hinsichtlich Desorptionstemperatur und -dauer ermittelt werden. Bedingt durch das stark transiente Verhalten aufgrund der ungleichmäßigen Strahlungsverhältnisse sollen erste Erfahrungen gesammelt werden, wie eine energetisch effiziente Regeneration des Speichers ermöglicht werden kann.
- Zur Bereitstellung der notwendigen hohen Temperaturen von 140°C - 180°C muss der Kollektorkreis bei erhöhtem Druck betrieben werden. Hierzu sollen Erfahrungen bezüglich der Auslegung des Kollektorkreislaufes und der zu verwendenden Sicherheitskomponenten (Sicherheitsventile, Volumenausdehnungsgefäß, etc.) und eventuelle Auswirkungen auf das Wärmeträgermedium gesammelt werden.

6. Überprüfung der Simulationsrechnungen durch Messergebnisse

Die gewonnenen Messdaten dienen als Grundlage für eine Überprüfung des mathematischen Modells zur numerischen Simulation der Ad- und Desorptionsvorgänge im Speicher.

7. Simulationsstudie zur Verbesserung des Gesamtverfahrens

Es wurden zwei Schwerpunkte untersucht:

- Detaillierte Simulation der Regeneration des Speichers unter transienten Zulaufbedingungen
- Simulation des Gesamtsystems inkl. Gebäude zur Optimierung und Berechnung der jährlichen Energieeinsparung
Dabei sollen die leistungsrelevanten Parameter des Gesamtsystems identifiziert und bewertet werden, um so zu einer verbesserten Anlagenauslegung zu gelangen. Die jährliche Energieeinsparung kann nur durch Simulationsrechnungen ermittelt werden.

8. Mitarbeit in der Task 32 "Advanced storage concepts for solar and low energy buildings" der Internationalen Energie Agentur IEA.

Kapitel 4

Stand der Technik

Obwohl die Forderung nach alternativen Speichermedien in den letzten Jahren immer lauter wird, sind bisher auf diesem Gebiet nur sehr wenige Arbeiten zur Verwendung in solarthermischen Anlagen bekannt geworden.

In diesem Zusammenhang rücken besonders die Entwicklung neuer oder besser angepasster Phasenwechselmaterialien und physikalisch-chemische Verfahren, dabei ist in erster Linie die Adsorption von Wasserdampf an porösen Adsorbentien gemeint, in den Blickpunkt des Interesses. Nachfolgend wird ein Überblick über den derzeitigen Stand der Technik bezüglich des Einsatzes von Adsorptionsverfahren zur thermischen Energiespeicherung gegeben.

4.1 Sorptionsspeicher UFE-Solar - ISE

Bereits 1996 entwickelte die Firma UFE Solar GmbH in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg, in einem vom Bundesland Brandenburg geförderten Projekt den Prototypen eines Sorptionsspeichers, der zur saisonalen Wärmespeicherung in solaren Raumheizungssystemen angewendet werden sollte.

Es ist das einzige bisher bekanntgemachte Verfahren, das über den Labormaßstab hinaus als Prototyp in Deutschland (Solarhaus Freiburg), in Österreich (AEE) und in Schweden getestet wurde.

Folgende Prozesse werden durchlaufen:

1. Ladung des Speichers durch die Solaranlage.
Während des Sommers wird das Adsorbens (hier Silikagel) unter Wärmezufuhr von der Solaranlage desorbiert, d.h. getrocknet. Der freiwerdende Wasserdampf wird kondensiert und in flüssiger Form in einem separaten Behälter gespeichert. Die Abwärme der Kondensation kann zur Vorwärmung des Brauchwassers genutzt werden.
2. Getrennte Aufbewahrung von trockenem Adsorptionsmaterial und kondensiertem Wasserdampf.
Ist das Sorptionsmaterial vollständig ausgeheizt, wird ein Ventil zwischen dem Behälter mit dem Sorptionsmaterial und dem Vorratsbehälter geschlossen. Solange kein Wasserdampf in den Adsorber gelangt, wird der Speicher auch bei Raumtemperatur nicht entladen.
3. Entladung des Speichers durch Adsorption des Wasserdampfs unter Abnahme der dabei freiwerdenden Wärme.
Zur Entladung des Speichers während der Heizperiode wird ein Ventil zwischen Adsorber und Vorratsbehälter geöffnet. Das Sorptionsmaterial zieht Wasserdampf so stark an, dass das gespeicherte Wasser bei niedrigen Temperaturen verdampft, in den Adsorber strömt und dort adsorbiert wird. Die dabei freiwerdende Adsorptionswärme wird für die Heizung genutzt. Ist das System evakuiert, so läuft dieser Prozess ohne äußere Einwirkung ab, solange die zur Verdampfung notwendige Niedertemperaturwärme von den Sonnenkollektoren bereitgestellt wird.

Das Kollektorfeld wird somit sowohl im Sommer zur Ladung des Speichers, als auch während der Heizperiode zur Entladung verwendet, wobei im zweiten Fall die Temperatur des Kollektorkreises mit Hilfe des Sorptionsspeichers auf ein für die Heizung nutzbares Niveau angehoben wird (Temperaturhub).

Phasen, in denen Heizbedarf und Strahlungsangebot zeitlich nicht übereinstimmen, z.B. in der Nacht, können durch die thermische Masse des Speichers überbrückt werden.

Zur Wärmeübertragung vom Kollektorkreis bei der Speicherladung und auf den Heizkreis bei der Entladung ist ein Wärmeübertrager in die Adsorptionseinheit integriert. Verdampfung und Kondensation des Wasserdampfs erfolgen im angeschlossenen Verdampfer und Kondensator.

Materialauswahl

Zur Auswahl des Speichermaterials wurden am Fraunhofer ISE die Wechselwirkungen von verschiedenen Typen von Silikagelen und anderen technischen Sorptionsmaterialien, wie Zeolithen oder Aktivkohlen, mit Wasserdampf und anderen Gasen vermessen. Von den vermessenen Materialien wurde das Stoffpaar Silikagel-N/Wasser für das beschriebene Verfahren als am besten geeignet identifiziert.

Neben der Wärmespeicherung werden am ISE weitere technische Anwendungsbereiche dieser Stoffsysteme, wie chemische Wärmepumpen für die Abwärmenutzung und zur Kälteerzeugung, sowie offene solare Kühlsysteme, untersucht.

Derzeit konzentrieren sich die Arbeiten am ISE auf die Entwicklung von thermischen Kurzzeitspeichern zum Einsatz in Adsorptionswärmepumpen. Vor diesem Hintergrund werden umfangreiche Arbeiten zum Material-Screening für Adsorptionsprozesse durchgeführt. Weiterhin wird der Einsatz von Adsorptionsprozessen im Bereich der solaren Klimatisierung erprobt.

4.2 AEE-Intec, Österreich

Das unter Abschnitt 4.1 beschriebene Verfahren wird seit einigen Jahren von der AEE-INTEC [5] weiterentwickelt. Zur Vereinfachung des Systems und zur Kosten- und Platzersparnis wurden die notwendigen Bauteile (Adsorber, Verdampfer und Kondensator) in einem gemeinsamen Behälter untergebracht. Das gesamte System ist evakuiert, so dass während der Heizungsperiode Wasser bei niedrigen Temperaturen durch die von einem Kollektorfeld zur Verfügung gestellte Wärme verdampft werden kann. Als Adsorbens wird weiterhin Silikagel eingesetzt, an dem der entstehende Wasserdampf adsorbiert. Die Adsorptionstemperatur ist deutlich höher als die Verdampfungstemperatur, so dass der resultierende Temperaturhub für die Raumheizung ausgenutzt werden kann. In den Sommermonaten wird das Adsorbens durch Wärmezufuhr vom Kollektorfeld wieder regeneriert. Nachdem das Verfahren im Labor erfolgreich getestet wurde, konnten erste Erfahrungen im realen Einsatz an einer Pilotanlage in einem Einfamilienhaus gesammelt werden.

Es zeigte sich, dass die Desorption des Adsorbens in den Sommermonaten gut gelang. Das Betriebsverhalten des Sorptionsspeichers während der Heizperiode war jedoch nicht zufriedenstellend. Das Adsorptionsverhalten des eingesetzten Arbeitspaares Silikagel/Wasser erwies sich als nicht optimal, da der erzielte Temperaturhub während der Adsorption nicht konstant ist. Ursächlich hierfür ist die Tatsache, dass die freiwerdende Adsorptionenthalpie stark vom Beladungszustand des Adsorbens abhängig ist. Zu Beginn der Speicherphase, bei weitgehend unbeladenem Speicher wird durch die Adsorption des Wasserdampfes eine deutliche Temperaturerhöhung von mehr als 70 K erreicht. Mit zunehmender Beladung verringert sich der Temperaturhub kontinuierlich, bis die Temperaturdifferenz

zwischen Sorptionspeicher und der Heizungsrücklauftemperatur nur noch wenige Kelvin beträgt und nicht mehr für die Deckung des Wärmebedarfs ausreichend ist. Durch diesen Umstand können nur ca. 60% der Speicherkapazität für die Raumheizung genutzt werden. Abhilfe sollen hier die Entwicklung bzw. Erprobung besser geeigneter Adsorbentien schaffen. Umfangreiche internationale Tätigkeiten auf dem Gebiet der Entwicklung angepasster Adsorbentien für die thermische Energiespeicherung sind in den letzten Jahren begonnen worden.

4.3 Zeolith-Speicher im Fernwärmenetz, ZAE Bayern

Das ZAE Bayern betreibt seit einigen Jahren einen Zeolith-Sorptionsspeicher zur Beheizung einer Schule in München. Der Speicher ist in ein Nahwärmenetz eingebunden und wird im offenen Kreislauf betrieben. Die Speichermasse beträgt 7000 kg Zeolith Type 13X. Der Speicher dient als Pufferspeicher zur effizienteren Ausnutzung der vom Netz zur Verfügung gestellten Wärme. Nachts, wenn wenig Wärme benötigt wird, wird der Zeolith-Speicher desorbiert mit Temperaturen zwischen 130 und 180 °C. Die anfallende Restwärme mit einer Temperatur von ca. 40 °C wird zur nächtlichen Beheizung der Schule benutzt. Tagsüber, wenn die Hauptwärmelast anfällt, wird der Speicher mit Umgebungsluft, die zuvor auf 25...30 °C aufgeheizt und in einem Befeuchter gesättigt wird, in den Speicher geblasen. Die austretende, trockene Luft hat eine Temperatur von ca. 120 °C. In einem Wärmeübertrager wird die Wärme an das Raumheizungsnetz der Schule abgegeben. Die Heizungstemperatur beträgt ca. 65 °C.

Die mit diesem Verfahren erzielte Speicherkapazität beträgt ca. 125 kWh/m³. Der COP der Anlage beträgt 0.92.

4.4 Mobile Wärmespeicherung mit Adsorptions-Materialien, ZAE Bayern

Ein neues Vorhaben des ZAE befasst sich mit der mobilen Wärmespeicherung mit Hilfe von Adsorptionsprozessen. Hierbei soll industrielle Abwärme zur Trocknung von Zeolithen genutzt werden. Ein konventioneller 18 Fuß-Überseecontainer wird mit einigen Tonnen Zeolith bestückt und durch Abwärmeprozesse energetisch geladen. Der getrocknete Zeolith wird in einem Container per LKW zu einem Wärmenutzer gefahren. Dort wird feuchte, gesättigte Luft eingeblasen und die resultierende Adsorptionswärme genutzt.

Derzeit wird geprüft, ob das Verfahren energetisch und ökonomisch sinnvoll ist. Zu klären ist wie die Prozess-Einbindung sowohl beim Wärmelieferant wie auch beim Wärmenutzer zu realisieren ist.

4.5 Untersuchungen SPF Rapperswil

Am SPF in Rapperswil wurden ebenfalls mit dem Stoffpaar Zeolith 13X - Wasserdampf Untersuchungen durchgeführt. Es wurde eine Laboranlage mit Zeolith-Pellets aufgebaut und einige Messungen durchgeführt. Im Rahmen der IEA-Task 32 arbeitet das SPF weiter an der Charakterisierung von Adsorptionsmaterialien.

Kapitel 5

Aufbau der Versuchsanlage

5.1 Simulationsstudie zur Auslegung der Demonstrationsanlage

Für die Dimensionierung der Versuchsanlage ist die zeitliche Dauer eines Adsorptions/Desorptions-Zyklus von entscheidender Bedeutung. Diese wird in erster Linie von dem verwendeten Adsorbens und der Speichermasse festgelegt. Bei gegebenen Zulaufbedingungen für die Adsorption (Raumluftfeuchte) und Desorption (Wärmeerzeugung durch Solarstrahlung) ergibt sich daraus das Volumen des Speichers und die luft- und flüssigkeitsseitigen Massenströme. Zur Festlegung der gesuchten Größen wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, unter der Zielsetzung, mindestens acht vollständige Zyklen innerhalb des Untersuchungszeitraums fahren zu können. Für diese Simulationsrechnungen wurden die Wetterdaten des Testreferenzjahres Würzburg verwendet und als Adsorbens ein handelsüblicher Zeolith 4A.

Da die mögliche Speichergröße und die verwendete Kollektorfläche direkt zusammenhängen, wurde zunächst der Kollektor ausgewählt. Für die Installation in der Versuchsanlage wird ein Vakuumröhrenkollektor mit zylindrischem Absorber und CPC-Reflektor verwendet, der eine Aperturfläche von ca. 4 m^2 besitzt. Dieser Typ von Kollektor zeichnet sich durch hohe Wirkungsgrade bei hohen Betriebstemperaturen aus. Unter Verwendung dieses Kollektors und den oben genannten Anforderungen zeigten die Simulationsrechnungen, dass das maximale Speichervolumen ca. 100 Liter beträgt.

Um die thermische Leistung des Kollektors bei maximaler Einstrahlung abzuführen ist bei einer luftseitigen Temperaturerhöhung von 70 K ein Luftmassenstrom von 0,025 kg/s erforderlich. Dies entspricht etwa 65% des Luftmassenstroms der unter Abschnitt 2 vorgestellten Anlage.

5.2 Auslegung der Anlagenkomponenten

5.2.1 Geometrie des Speichers

Für die zeitliche Dauer eines Adsorptions/Desorptions-Zyklus spielt die geometrische Verteilung der Speichermasse (Querschnittsfläche zu Strömungslänge) eine untergeordnete Rolle. Nun stellt sich die Frage, wie die Speichergeometrie ausgeführt werden sollte, um möglichst realitätsnahe Betriebsbedingungen darzustellen. Realitätsnahe bedeutet in diesem Zusammenhang Bedingungen zu schaffen wie sie in einer unter Abschnitt 2 beschriebenen "realen Anlage" herrschen würden. Unter dieser Voraussetzung sind zwei Geometrievarianten denkbar. Zum einen könnte der Strömungskanal in "realer" Länge ausgeführt werden mit einer dementsprechend kleinen Querschnittsfläche. Dies hätte zur Folge, dass die Strömungsverhältnisse in den Kanälen des Speichers denen einer realen Anwendung entsprechen. Aufgrund der niedrigen Strömungsgeschwindigkeit sind die Sorptionsvorgänge nicht kinetisch limitiert. Eine gleichmäßige Durchströmung des Speichers ist aufgrund der kleinen Querschnittsfläche unproblematisch.

Dagegen ist eine homogene Anströmung des realen Speichers aufgrund des Verhältnisses von Rohrquerschnitt und Speicherquerschnitt deutlich schwieriger zu erreichen. Eine effiziente Ausnutzung der

Speichermasse ist nur bei gleichmäßiger Strömungsverteilung am Speichereintritt gegeben. Zur Untersuchung dieser Problemstellung wird ein Verhältnis von Querschnittsfläche zu Strömungslänge entsprechend eines realen Speichers gewählt.

5.2.2 Konstruktion der Ein- und Ausströmöffnungen des Speichers

Um die homogene Strömungsverteilung am Eintritt in die Monolith-Struktur, bei gleichzeitig minimalem Druckverlust, zu realisieren, müssen geeignete Ein- und Ausströmtrichter konstruiert werden. Dazu wurde eine Design-Entwicklung in einem iterativen Prozess von CAD-Konstruktion (Pro/Engineer) mit anschließender Strömungssimulation (Fluent) durchgeführt. Ausgehend von einer zweidimensionalen Betrachtung wird zunächst die Anströmung in Abhängigkeit von der Einlaufgeometrie untersucht. Das Ziel ist, die oben genannten Bedingungen bei minimalem Platzbedarf zu erfüllen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend in eine reale 3D-Konstruktion überführt und die Gültigkeit überprüft. Gegebenenfalls müssen weitere Iterationsschritte durchgeführt werden.

5.2.3 Anlagenverschaltung

Abbildung 5.1 zeigt das Schema der Versuchsanlage, die am ITW aufgebaut wurde. Die Luft führenden Kreisläufe für die Adsorption und Desorption des Sorptionsspeichers wurden in einem klimatisierten Laborraum aufgebaut. Der Kollektor wurde auf dem Gebäudedach, direkt oberhalb des Labors installiert.

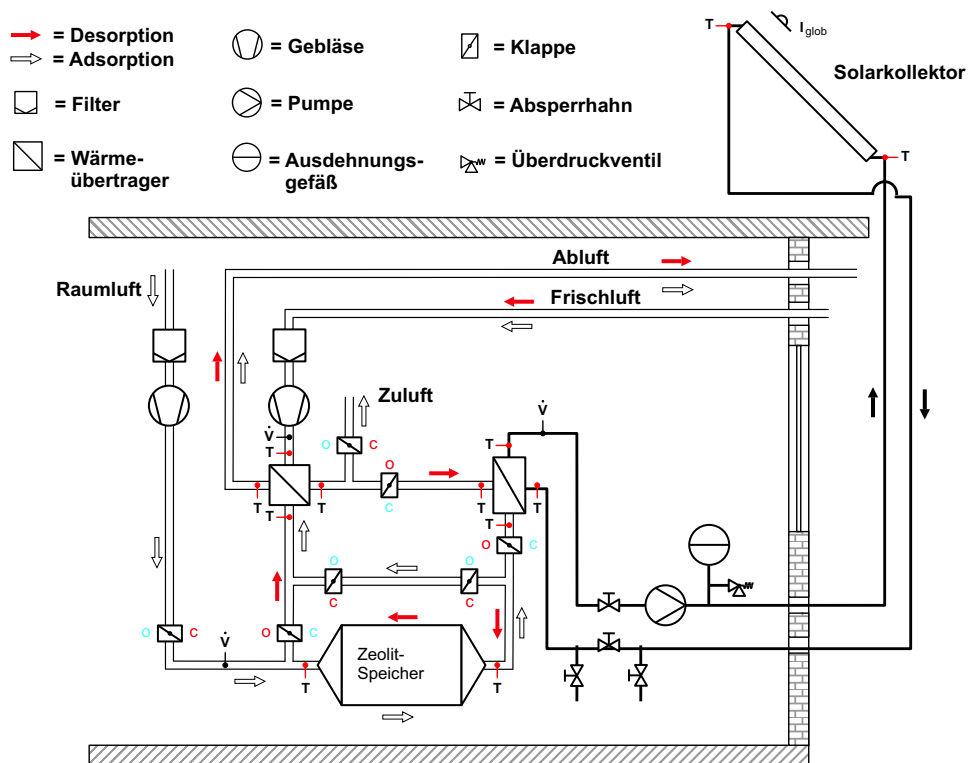


Abb. 5.1: Schematische Darstellung des Versuchsanlagenaufbaus

Die Pfeile zeigen die Strömungsrichtung in den beiden Betriebsmodi Adsorption (offene Pfeile) und Desorption (geschlossene Pfeile). Die Anlagenverschaltung ist so ausgeführt, dass die Desorption in entgegengesetzter Strömungsrichtung zur Adsorption durchgeführt werden kann.

5.2.4 Auslegung der Wärmeübertrager

Zwischen Kollektor- und Desorptionskreislauf wird ein Luft/Wasser- Wärmeübertrager benötigt. Besondere Anforderungen stellen die Höhe der Maximaltemperatur ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$), der hohe Druck auf der Wasserseite (15 bar) und die relativ kleinen Volumenströme (schlechterer Wärmeübergang) dar. Die Stromführung muss so gewählt werden, dass eine möglichst hohe Luft-Austrittstemperatur (Speicher-Eintrittstemperatur) erreicht wird. Um die Gebläseleistung gering zu halten, soll die Wärmeübertragung bei möglichst geringem Druckverlust erfolgen. Standard-Wärmeübertrager sind für diese Bedingungen in der Regel ungeeignet. In Frage kommen Platten- und Lamellenwärmeübertrager, die für einen Low-flow-Betrieb ausgelegt sein müssen.

Der Luft/Luft-Wärmeübertrager hat während der Adsorption die Aufgabe, die Adsorptionswärme auf die Frischluft zu übertragen, d.h. die aus dem Speicher mit einer Temperatur von ca. $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ austretende Luft soll bei einem Volumenstrom von $50\text{...}100\text{ m}^3/\text{h}$ die eintretende Frischluft um 20 bis 25 K erwärmen. In der Desorptionsphase dient er als Luftvorwärmer, d.h. er soll die Wärme der aus dem Speicher austretenden Luft auf die Frischluft übertragen, bevor diese in den Luft/Wasser-Wärmeübertrager eintritt. Der Luft-Volumenstrom soll auf eine Zieltemperatur von $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ geregelt werden und kann zwischen 50 und $150\text{ m}^3/\text{h}$ betragen. Neben einer Temperaturbeständigkeit von $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ soll der Luft/Luft-Wärmeübertrager einen geringen Druckverlust aufweisen.

5.3 Entwicklung und Aufbau der Versuchsanlage

Maßgabe bei der Entwicklung der Versuchsanlage war, das Verfahren so realitätsnah wie möglich in einem verkleinerten Labormaßstab zu untersuchen. Es wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, die alle wesentlichen Komponenten einer „realen“ Anlage (Sorptionsspeicher, Wärmeübertrager und Kollektorfeld) enthält. Bei der Realisierung der Versuchsanlage wurde besonderen Wert auf die Verwendung kommerzieller Anlagenkomponenten gelegt, um die gesammelten Erfahrungen direkt auf größere, im realen Maßstab zu erstellende Anlagen übertragen zu können. Lediglich der Sorptionsspeicher selbst ist kein kommerzielles Produkt. Er wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelt. Abbildung 5.2 zeigt die CAD-Skizze der Anlage und Abbildung 5.3 die danach aufgebaute Versuchsanlage, abgebildet ohne Wärmedämmung.

Der Aufbau der Anlage gestaltete sich aufwändiger als erwartet, hauptsächlich wegen Dichtigkeitsproblemen sowohl der Luftverrohrung (schwer auffindbare Lecks) als auch im Solarkreislauf (hohe Anforderungen wegen hoher Betriebstemperatur und -druck).

Im Folgenden wird eine Übersicht über die wichtigsten Komponenten der Anlage gegeben.

5.3.1 Versuchsspeicher

Um wichtige Anforderungen an den Versuchsspeicher zu definieren, ist die Betrachtung eines entsprechenden realen Speichers notwendig:

Der Sorptionswärmespeicher für die Anwendung in einem Einfamilienhaus, wie in Abschnitt 2 vorgestellt, hat ein Volumen von ca. 8 m^3 . Die konstruktiven Anforderungen bei der technischen Umsetzung eines solchen Wärmespeichers sind ein möglichst geringer Platzbedarf und ein geringer zusätzlicher Energiebedarf des für die Durchströmung notwendigen Gebläses. Die benötigte Stellfläche lässt sich bei normaler Raumhöhe durch eine Würfelform des Speichers von $2 \times 2 \times 2\text{ m}^3$ minimieren. Zur Reduzierung der Gebläseleistung kommen die in Abschnitt 5.4 beschriebenen Monolithe zum Einsatz.

Als Geometrie des Versuchsspeichers wurde eine würfelförmige Form mit $500 \times 500\text{ mm}^2$ Querschnittsfläche und 400 mm Länge gewählt (Volumen = 100 l). Für die Luftleitungen wurde der kleinste genormte Rohrquerschnitt verwendet (DN 80).

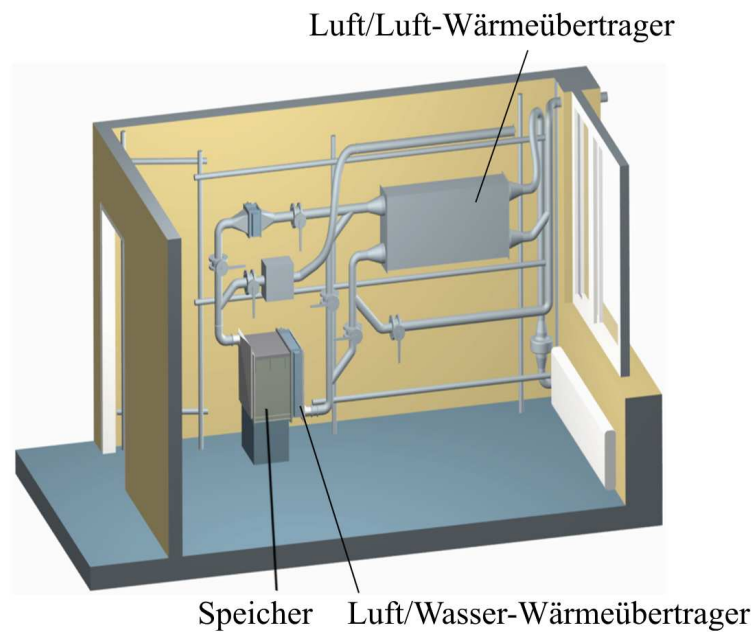


Abb. 5.2: CAD-Skizze der Versuchsanlage ohne Wärmedämmung. Sie zeigt den Sorptionspeicher mit Anströmtrichter und integriertem Luft/Wasser-Wärmeübertrager, Verrohrung und den Luft/Luft-Wärmeübertrager

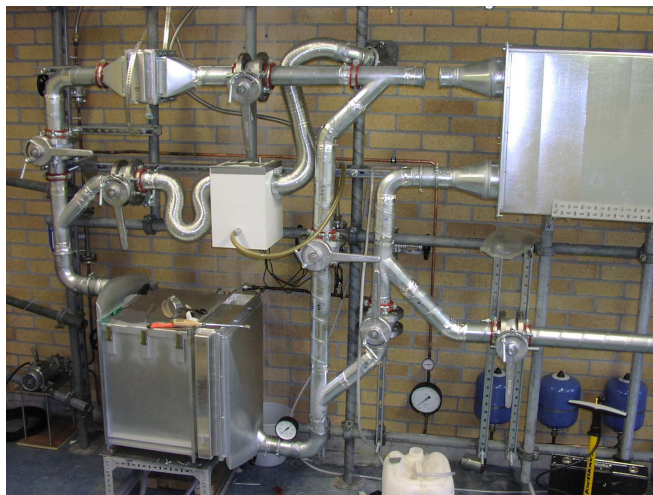


Abb. 5.3: Laboraufbau der Versuchsanlage

Entwicklung optimierter Ein- und Ausströmtrichter

Zur optimalen Ausnutzung des Speichermaterials ist aufgrund seiner Wabenstruktur eine gleichmäßige Anströmung der gesamten Querschnittsfläche erforderlich. Anders als z.B. in Kugelschüttungen, ist eine Vergleichmäßigung der Strömung im Innern des Speichers nicht möglich. Es galt, eine Anströmgeometrie zu entwickeln, die diese Forderung bei geringem Druckverlust und minimalem Raumbedarf erfüllt.

Durch die Verknüpfung des CAD-Programms Pro/ENGINEER zur dreidimensionalen Modellierung der Strömungsgeometrien mit der CFD-Software FLUENT zur Strömungssimulation war es möglich, komplexe Volumenkörper zügig zu modellieren und durch gezielte Veränderungen entsprechend den Er-

gebnissen der anschließenden Strömungssimulation zu optimieren. Eine originalgetreue Abbildung der einzelnen Wabenkanäle der Zeolithstruktur wäre dabei nicht zielführend gewesen. Um den Zeitaufwand für Vernetzung und Simulation gering zu halten, wurde daher für die Wabenstruktur ein Ersatzmodell (poröses Medium) mit gleichen hydrodynamischen Eigenschaften erarbeitet. Die Anströmgeometrie mit den besten Eigenschaften wurde in mehreren Iterationsschritten optimiert. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

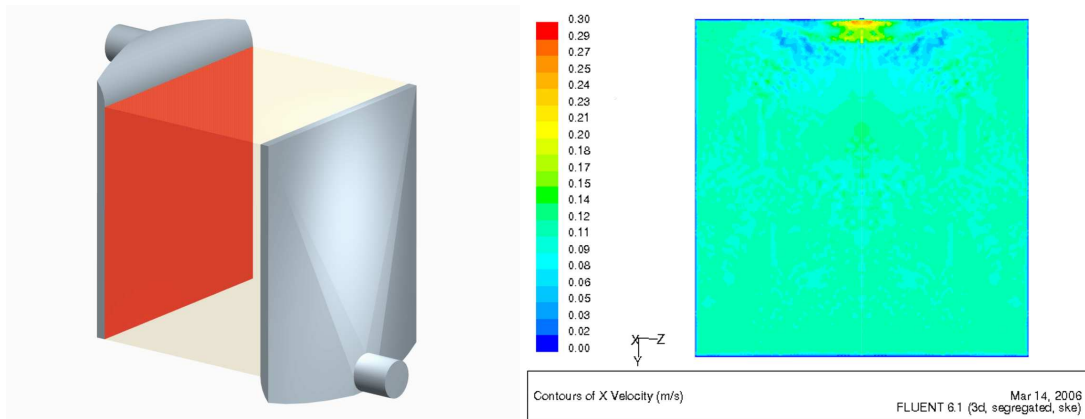


Abb. 5.4: Darstellung des Ein- und Auströmtrichters (links) und Geschwindigkeitsprofil in axialer Richtung in der Ebene des Strömungseintritts in die Wabenstruktur (rechts)

Die Simulationsrechnungen zeigten, dass eine gute Vergleichmäßigung der Strömung erreicht wird, wenn die aus dem kleinen Rohrquerschnitt austretende Strömung zunächst um 90° umgelenkt wird und dann in einem flachen Trichter tangential in den Einströmquerschnitt eintritt. Die rot dargestellte Fläche kennzeichnet die Ebene des Strömungseintritts in die Wabenstruktur. Das rechte Bild zeigt das Ergebnis der Strömungssimulation in dieser Ebene. Wie zu erkennen ist, liegt mit Ausnahme des kleinen gelb eingefärbten Bereichs in der Mitte des oberen Randes, ein nahezu vollständig homogenes Geschwindigkeitsfeld vor.

Die Ein- und Ausströmtrichter haben die gleiche Geometrie. Dadurch ist es möglich, die Adsorption und Desorption mit wechselnder Strömungsrichtung zu betreiben.

Der Speicher ist so gebaut, dass der Speicherinhalt mit relativ kleinem Aufwand zugänglich ist. Die Dichtungen sind aus Silikonschaumstoff ausgeführt, der bis 200°C beständig ist. Hier zeigte sich jedoch, dass nach einem längeren Zeitraum der Schaumstoff an Stellen hoher Druckbelastung spröde geworden war.

5.3.2 Solarkollektoren

Die Regeneration des Speichers (Desorption) erfolgt durch die Zufuhr eines heißen Luftstroms. Die Erhitzung der Luft wird durch einen Luft/Wasser-Wärmeübertrager realisiert. Wie im realen Betrieb wird die hierfür benötigte Wärme von Solarkollektoren geliefert. Da bei der Verwendung von 4A-Zeolithen für eine weitgehende Trocknung hohe Desorptionstemperaturen ($\vartheta_{des} > 160^\circ\text{C}$) benötigt werden, müssen Kollektoren eingesetzt werden, die besonders bei hohen Temperaturen einen hohen Wirkungsgrad aufweisen. Für die Untersuchungen werden Kollektoren vom Typ CPC14 Star Azzuro verwendet, die von der Firma Paradigma für dieses Forschungsvorhaben zur Verfügung gestellt wurden. Die auf der Dachfläche des Laborgebäudes installierte Kollektorfläche beträgt $4,4\text{ m}^2$ und ist in Abbildung 5.5 dargestellt.

Der Einsatz von Luftkollektoren bietet sich aus verschiedenen Gründen nicht an. Neben der geringen Marktverfügbarkeit von Luftkollektoren ist besonders die geringe Wärmekapazität von Luft als Wärmeträgermedium von Nachteil.



Abb. 5.5: Kollektorfeld der Versuchsanlage

5.3.3 Wärmeübertrager

Luft/Wasser-Wärmeübertrager

Im Luft/Wasser-Wärmeübertrager wird die von der Solaranlage gewonnene Wärme auf die in den Speicher einströmende Luft übertragen. Für diese Aufgabe wurde ein von der Firma WÄTAS gefertigter Aluminium-Lamellen-Luftheritzer im Kreuzstrom-Betrieb eingesetzt. Messungen der luftseitigen Austrittstemperatur an verschiedenen Stellen über dem Strömungsquerschnitt zeigten, dass im stationären Betrieb bei einer mittleren Wassertemperatur von $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ die maximale Temperaturabweichung 8 K beträgt. Dies zeigt die gleichmäßige Erhitzung der Luft und ermöglicht zusammen mit der homogenen Einströmung die gleichmäßige Erwärmung des Speicherinhalts. Die äußeren Abmessungen des Luft/Wasser-Wärmeübertrager wurden so gewählt, dass er in das Speichergehäuse unmittelbar vor dem Speichermaterial integriert werden konnte (die Einströmfläche beträgt $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$). Durch diese Anordnung werden die Wärmeverluste des erhitzten Luftstroms vom Austritt aus dem Wärmeübertrager bis zum Eintritt in das Speichermaterial minimiert: die Anordnung ist extrem platzsparend und strömungstechnisch optimal.

Luft/Luft-Wärmeübertrager

Der von der Firma Lüfta erworbene Aluminium-Plattenwärmeübertrager ist ein Standardbauteil aus der Lüftungstechnik. Diese Wärmeübertrager arbeiten im Gegenstrombetrieb und werden wegen ihres guten Wärmeübertragungsvermögens und des geringen Druckverlusts für die Wärmerückgewinnung im Lüftungssystem von Niedrigenergie- und Passivhäusern eingesetzt. Die Anströmfläche beträgt $550 \times 250\text{ mm}^2$, die Länge 1200 mm . Die Wärmeübertragerfläche beträgt laut Herstellerangaben 30 m^2 , der Wärmedurchgangskoeffizient $20\text{ W/m}^2\text{K}$ und der Druckverlust 11 Pa bei einem Durchsatz von $100\text{ m}^3/\text{h}$. Die Ganzmetall-Ausführung des Wärmeübertragers erlaubt Betriebstemperaturen bis $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Der Hersteller gibt für zwei Temperaturbereiche den Temperaturwirkungsgrad an. Daraus lässt sich die erreichbare Temperaturerhöhung des kalten Stroms berechnen. Der erste Temperaturbereich ist für die Adsorptionsphase interessant: bei einem Volumenstrom von $100\text{ m}^3/\text{h}$ beträgt der Temperaturwirkungsgrad 88% . Wenn die Luft den Sorptionsspeicher mit $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ verlässt, tritt sie aufgrund von Wärmeverlusten mit ca. $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ in die heiße Seite des Wärmeübertragers ein. Die Aussenluft tritt z.B. mit $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ in die kalte Seite ein. Mit dem Temperaturwirkungsgrad

$$P = \frac{T_{Zuluft} - T_{Aussenluft}}{T_{Abluft} - T_{Aussenluft}} \quad (5.1)$$

lässt sich die Ablufttemperatur zu 40 °C errechnen.

Der Temperaturwirkungsgrad im für die Desorption interessanten Temperaturbereich liegt laut Herstellerangaben bei 99% (Volumenstrom: 100 m³/h). Der Wärmeübertrager kann somit die Aussenluft von 25 °C auf 149 °C vorwärmen wenn sie mit 150 °C in die heisse Seite des Wärmeübertragers eintritt.

5.3.4 Sonstige Bauteile

Membranausdehnungsgefäß

Das Ausdehnungsgefäß soll nicht das vollständige Verdampfungsvolumen des Wasserfüllvolumens aufnehmen können, sondern lediglich die bei der Erwärmung des (flüssigen) Wassers entstehende Volumenausdehnung. Im Falle einer Überhitzung wird der Wasserdampf über das Sicherheitsventil abgeblasen. Die Dichte des Wassers ändert sich im Temperaturbereich von 10 °C auf 180 °C um 15 %. Bei einem Solarkreis-Füllvolumen von ca. 20 l ergibt sich ein Ausdehnungsvolumen von ca. 3 l. Es wurden drei Membranausdehnungsgefäße zu je 8 l der Fa. Reflex eingebaut, die Drücken bis 25 bar standhalten.

Pumpe Solarkreis

Die Kombination aus hohen Temperaturen und geringem Volumenstrom verhindern den Einsatz regulärer Solarpumpen. Es wurde eine spezielle Pumpe der Fa. Speck eingesetzt, die den Anforderungen genügt. Dieses Problem wird sich jedoch bei einer Anlage mit größerer Kollektorfläche und somit größerem Volumenstrom voraussichtlich nicht stellen.

Rohrleitungen

Die Luft führenden Rohrleitungen wurden in Wickelfalzrohr (Durchmesser DN 80) ausgeführt. Dies ist der kleinste Durchmesser, für den alle Komponenten (Bögen, Abzweigungen, Muffen,...) standardmäßig im Klima-/Lüftungshandel erhältlich sind. Größere, bis heute ungelöste Probleme stellen die Undichtigkeiten der Rohrverbindungen dar. Die Lecks sind zum Teil sehr klein und schwer auffindbar. Mit Silikondichtmasse und Warmschrumpfband konnte zwar ein Großteil der Lecks versiegelt werden, es fehlt jedoch noch die richtige Technik.

Der Solarkreis wurde aus Kupferrohren (DN 15) gefertigt. Wegen der hohen Betriebstemperaturen mussten die Verbindungen hartgelötet werden. Es gestaltete sich sehr umständlich und aufwändig, auch nachdem ein Solar-Installateur zur Unterstützung der ITW-eigenen Werkstatt zu Hilfe geholt worden war, die Rohrleitungen für einen Druck bis 15 bar abdichten. Zukünftig ist es besser, Rohrleitungen aus Edelstahl zu verwenden, die geschweisst werden können. Diese Technik wird allgemein für Fernwärmeleitungen eingesetzt, die Temperaturen bzw. Drücken von 200 °C bzw. 25 bar standhalten müssen.

Wärmedämmung

Die Dämmung der Solarkreisleitungen erfolgte mit Mineralwollschalen. Diese haben zwar sehr gute Dämmeigenschaften, sind aber aus verschiedenen Gründen für diesen Einsatz nur bedingt geeignet: sie sind schwer zu verarbeiten (starr, staubig), nicht UV-beständig und nicht wetterfest. Zum Schutz gegen Sonnenlicht und Regenwasser wurde über die Dämmschalen ein biegsames Aluminium-Rohr

gezogen. Diese Methode ist aber nicht für einen längerfristigen Einsatz geeignet. Stattdessen sollten temperaturbeständige Dämmschläuche benutzt werden. Diese sind einsetzbar bis 180 °C.

Eine gute Speicherdämmung ist ausschlaggebend für eine erfolgreiche Regeneration. Der Speicher wurde in mehreren Schichten gedämmt: auf den Speicher wurden zwei Lagen hochtemperaturbeständigen Dämmplatte von Armaflex geklebt. Darauf wurden weitere Schichten Mineralwollmatte oder Schaumstoff-Dämmplatte aufgebracht, Hohlräume wurden mit Mineralwolle ausgestopft. Die Gesamtdicke der Dämmung beträgt ca. 20 cm.

Die von warmer bzw. heißer Luft durchströmten Leitungsteile wurden mit Mineralwollschalen gedämmt. Da sich alle Luftleitungen im Innenbereich befinden, ist Mineralwolle hier gut geeignet.

5.3.5 Messtechnik

Für die energetische Bewertung des Verfahrens ist es erforderlich, verschiedene Zustandsgrößen der Stoffströme aufzunehmen. Dies sind für den Wasserkreislauf, der Volumenstrom und die Temperaturen am Ein- und Austritt des Kollektors und des Luft-Wasser-Wärmeübertragers. Auf der Luftseite werden der Volumenstrom, die Temperaturverteilung im Speicher, sowie die Lufttemperatur und -feuchtigkeit an Ein- und Austritt des Speichers gemessen. Für die Bewertung des Kollektors wird die in der Kollektorebene eintreffende Strahlung aufgenommen. Im Einzelnen wurde folgende Messtechnik ausgewählt:

Temperaturmessung

Für die Temperaturmessung des Wasser- und Luftstroms werden Platin-Widerstandsthermometer (Pt100) der höchsten Genauigkeitsklasse der Fa. Jumo eingesetzt. Die Messung der Temperaturverteilung im Speicher erfolgt mit Thermoelementen des Typs K (Nickel-Chrom-Nickel) von Fa. Jumo. Der kleine Durchmesser der Thermodrähte (0,5 mm) ermöglicht es, sie in die Monolith-Kanäle einzuführen. In regelmäßigen Abständen wurden die Temperatursensoren im ITW-eigenen Kalibrierlabor kalibriert.

Platinwiderstandsthermometer wurden sowohl in den Wasser- als auch in den Luftleitungen eingesetzt. Bei Temperaturmessungen in einer Rohrströmung muss sichergestellt sein, dass nicht eine punktuelle, sondern eine über den Querschnitt gemittelte Temperatur ermittelt wird. Dazu muss die Mediumtemperatur über den Rohrquerschnitt gleichmäßig sein. Wasserseitig kann wegen des kleinen Rohrquerschnitts und der hohen Strömungsgeschwindigkeiten von einer ideal durchmischten Strömung ausgegangen werden. Die Temperatur wird in der Rohrmitte gemessen. Im Luftkreislauf hingegen sind lange Ein- und Auslaufstrecken nötig (d.h. gerade, ungestörte Rohrstrecken), um ein definiertes Strömungsprofil zu erhalten. Hier wurde eine andere Methode angewendet: gelochte Kupferscheiben mit 0,5 cm Dicke und der Größe des Rohrquerschnitts (s. Abb. 5.6) wurden in das Rohr an den Temperaturmessstellen eingebracht. In eine radiale Bohrung wurde das Pt100 eingeschoben. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer nimmt die Kupferplatte im stationären Zustand die mittlere Gastemperatur an.

Volumenstrommessung

Im Wasserkreislauf wird ein Schwebekörper-Durchflussmesser der Fa. Krohne eingesetzt. Dieser zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit und eine Druck- bzw. Temperaturbeständigkeit bis 40 bar bzw. 180°C aus.

Der Luftvolumenstrom wird am Ein- und Austritt des Speichers gemessen. Es handelt sich hierbei um



Abb. 5.6: gelochte Kupferplatte für die Temperaturmessung im Luftstrom

einen thermischen Strömungssensor der Fa. Höntzsch, der die Luftgeschwindigkeit auf der Rohrmittelachse misst. Über ein Rechenverfahren wird dann auf den Volumenstrom geschlossen. Für eine korrekte Messung muss die Strömung drallfrei sein, d.h. es müssen ausreichende Ein- und Auslaufstrecken vorgesehen sein. Die nötigen Streckenlängen können je nach stromauf oder -ab eingebautem Formteil (z.B. 90°-Krümmer, Rohrverengung) 15 bis 40 Mal den Innendurchmesser betragen.

Feuchtigkeitsmessung

Um zu ermitteln, wie viel Wasserdampf adsorbiert oder desorbiert wird, wird die Wasserbeladung der Luft am Speichereintritt und -austritt gemessen. Zu Anfang wurden zwei kapazitive Feuchtesensoren der Fa. Testo eingesetzt, die sich aber als wenig geeignet erwiesen: sie müssen in kurzen Abständen (ca. alle zwei bis drei Tage) einer zeitaufwändigen Kalibrierung unterzogen werden, um ihre Messgenauigkeit von 2 % zu behalten.

Ab Ende 2006 wurden Taupunktspiegel-Messgeräte der Fa. Edgetech eingesetzt. Taupunktspiegel erreichen eine hohe Messgenauigkeit, haben einen großen Messbereich und bedürfen nur einer jährlichen Kalibrierung.

Strahlungsmessung

Um den Kollektorwirkungsgrad zu ermitteln, wird die in der Kollektorebene eintreffende Solarstrahlung gemessen. Dies erfolgt mit einem Pyranometer der Fa. Kipp & Zonen der höchsten Genauigkeitsklasse (Klasse 1).

Messdatenerfassung und -speicherung

Zwei Digitalmultimeter ermöglichen die Aufnahme der Messdaten mit hoher zeitlicher Auflösung. Ein Rechner übernimmt die Steuerung der Messung mit einem LabView-Programm und die Speicherung der Messdaten.

5.4 Auswahl und Herstellung der Monolithe

Eine wichtige Besonderheit des hier vorgestellten Konzepts ist die Einbringung des Adsorbens in Form von extrudierten Wabenkörpern, sogenannten Monolithen. Sie vereinen eine Reihe von positiven Eigenschaften, die für das vorgestellte Verfahren erforderlich sind. Sie sind derzeit noch nicht kommerziell erhältlich und es gibt weltweit nur sehr wenige Institutionen, die über das nötige Know-how zur Herstellung verfügen. Eine davon ist das Institut für Kunststofftechnologie (IKT) der Universität Stuttgart.

Zunächst sollen einige allgemeine Anforderungen an zur Wärmespeicherung verwendeten Adsorbentien formuliert werden:

1. hohe Speicherdichte pro Volumen
Das ideale Adsorbens hat eine hohe Aufnahmefähigkeit für Wasserdampf bei gleichzeitig hoher Adsorptionseenthalpie, so dass das Produkt $\Delta X_{ads} \times \Delta h_{ads}$ maximal wird, wobei die Wasserdampfaufnahmefähigkeit des Adsorbens durch die Materialeigenschaften des Zeoliths und den Zeolithanteil pro Volumen Adsorbens bestimmt wird.
2. schnelle Adsorptionskinetik
Eine schnelle Kinetik ist wichtig in Hinblick auf einen großen Temperaturhub während der Adsorption und auf eine kurze und damit energetisch günstige Regenerationszeit des Speichers.
3. geringer Druckverlust
Ein geringer Druckverlust bei der Durchströmung des Speichers ist erforderlich um den elektrischen Energieaufwand des Gebläses gering zu halten.
4. kostengünstig
Der verwendete Zeolith-Typ 4A ist ein großtechnisch hergestellter, preiswerter Zeolith.
5. niedrige Desorptionstemperatur
Besonders bei solarthermischer Regeneration des Speichers ist eine niedrige Desorptionstemperatur günstig, da mit steigender Temperatur der Kollektorwirkungsgrad abnimmt.

Wie sich zeigt, werden die Kriterien 1 bis 4 durch die Verwendung von aus Zeolith-Pulver extrudierten Monolithen erfüllt. Die Forderungen nach einer hohen Adsorptionseenthalpie bei gleichzeitig niedriger Desorptionstemperatur widersprechen sich. Vielmehr geht eine hohe Adsorptionseenthalpie zwangsläufig mit einer hohen Desorptionstemperatur einher. In dem hier vorgestellten Vorhaben werden den positiven Eigenschaften des Zeolith 4A Priorität eingeräumt und die nötigen hohen Desorptionstemperaturen durch die Verwendung von Hochleistungskollektoren realisiert (vgl. Abschnitt 5.5). Um das Zeolithpulver in dem Extrusionsverfahren in eine stabile Form zu bringen, muss ein Binder beigemischt werden. Bezüglich der Herstellung der Monolithe sind zwei Herstellungsverfahren zu unterscheiden, die auf der Wahl des Binders (polymerisch oder mineralisch) basieren. Da der Binder auch die Adsorptionseigenschaften beeinflusst, wurden beide Verfahren untersucht. Die Extrusion der polymerisch gebundenen Monolithe ist vergleichsweise einfach und die Extrudate weisen eine hohe mechanische Stabilität auf. Nach Austritt aus dem Extruder sind sie bereits formstabil. Die mineralisch gebundenen Monolithe müssen nach der Extrusion noch getrocknet werden. Dieser Arbeitsschritt ist im Technikumsmaßstab sehr zeitaufwändig. Bei einer großtechnischen Herstellung auf einer Produktionsstraße, wie sie beispielsweise bei der Herstellung von Autokatalysatorträgern angewendet wird, wäre dieser Nachteil gering.

5.4.1 Ermittlung der Adsorptionskinetik

Tabelle 5.1 listet die untersuchten Materialien auf. Außer dem Binder wurde auch der Gewichtsanteil Zeolith/Binder und zwei verschiedene Adsorbentien (Zeolith 3A und 4A), sowie unterschiedliche Monolith-Geometrien untersucht. Die Abmessungen der hergestellten Monolithe sind ca. $30 \text{ mm} \times 33 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$.

Binder	Adsorbens	Zeolithgehalt im Feststoff	Kanal- breite	Steg- breite	Zeolithgehalt am ¹ Gesamtvolumen
mineralisch	4A	70%	1,8 mm	1,3 mm	58%
polymer	4A	60%	1,3 mm	0,8 mm	37%
polymer	3A	70%	1,2 mm	0,5 mm	35%
polymer	3A	70%	1,5 mm	0,8 mm	40%

Tab. 5.1: Liste der für Vorversuche hergestellten Monolithe

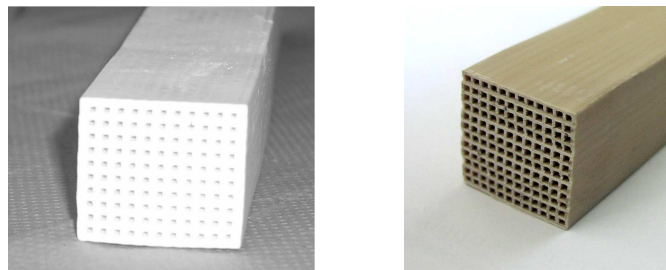


Abb. 5.7: Mineralisch gebundener Monolith (links) und polymerisch gebundener Monolith (rechts)

Für die Auswahl des geeignetsten Monolith-Typen wurden Vorversuche in einer Laborapparatur durchgeführt, die gerade einen Monolithen aufnehmen kann. In dieser Apparatur wurde die Adsorptionskinetik der Proben durch Adsorptions-/Desorptionszyklen ermittelt. Die Monolithe wurden vor Beginn der Messungen vollständig desorbiert. Abbildung 5.8 zeigt die Ergebnisse von Adsorptionsversuchen die an vollständig desorbierten Monolithen in der Laboranlage durchgeführt wurden. Die Monolithe wurden mit Luft einer relativen Feuchte von 25% durchströmt. Das linke Diagramm zeigt die Adsorption an einem mineralisch gebundenen Monolithen, das rechte Diagramm beispielhaft die Adsorption an einem polymerisch gebundenen Monolithen. Alle untersuchten polymerisch gebundenen Monolithe zeigten qualitativ ähnliche Kurvenverläufe.

Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der absoluten Feuchte des ein- und austretenden Luftstroms und die Temperaturprofile im Innern der Monolithe an fünf axialen Positionen in Strömungsrichtung. Deutlich zu erkennen ist die unterschiedliche Adsorptionskinetik von mineralisch und polymerisch gebundenen Monolith. Der mineralisch gebundene Monolith (linkes Diagramm) hat in den ersten 8 Stunden eine hohe Adsorptionsleistung. Der Wasserdampf wird vollständig adsorbiert. Es schließt sich ein relativ steiler Durchbruch an, einhergehend mit dem Absinken der Austrittstemperatur. Die vollständige Beladung ist nach ca. 22 Stunden erreicht. Derartiges Adsorptionsverhalten kennzeichnet eine nur geringe kinetische Limitierung der Adsorption.

Die untersuchten polymerisch gebundenen Monolithe (rechtes Diagramm) haben demgegenüber le-

¹Zum Vergleich: Schüttungen aus Zeolithkugeln haben etwa einen Zeolithgehalt von 40% am Gesamtvolumen

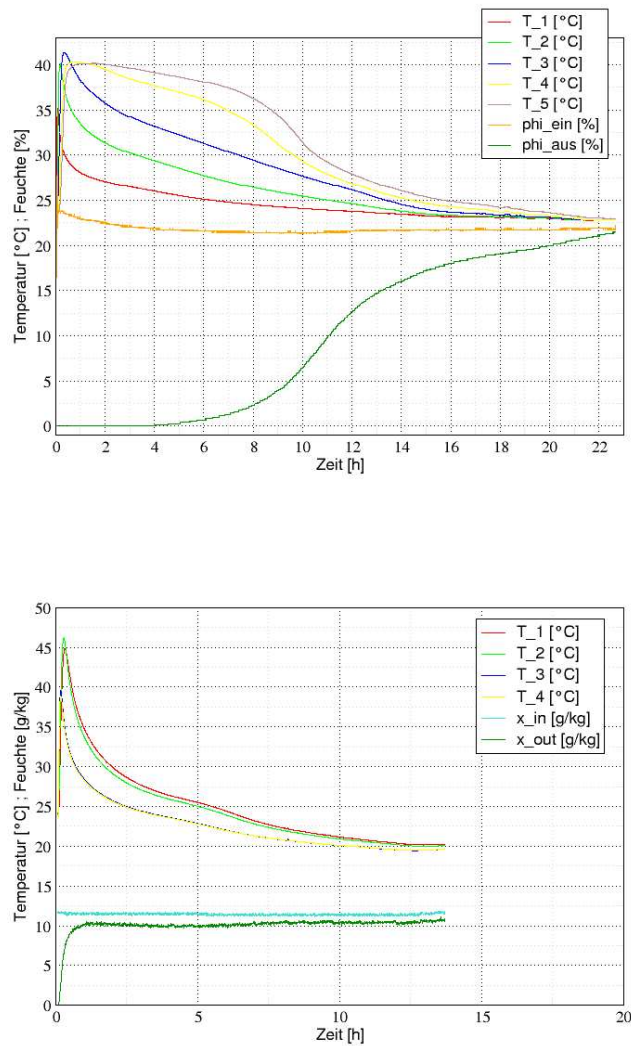


Abb. 5.8: Adsorptionsexperimente an mineralisch gebundenen (links) und an polymerisch gebundenen Monolithen (rechts): Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte des ein- und austretenden Luftstroms sowie Temperaturverlauf an fünf Positionen im Innern der Monolithe in Strömungsrichtung.

diglich zu Beginn der Adsorption eine hohe Adsorptionsleistung mit entsprechend starker Wärmetönung über der gesamten Monolithlänge. Danach nähern sie sich über einen sehr langen Zeitraum asymptotisch ihrer Gleichgewichtsbeladung an. Dies zeigt, dass zunächst eine Adsorption an den oberflächennahen Zeolithen stattfindet. Die Diffusion in die Kanalwand hinein wird durch den polymerischen Binder stark behindert. Eine nutzbare Temperaturerhöhung ist nur für einen sehr kurzen Zeitraum gegeben.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass die polymerisch gebundenen Monolithe für eine Anwendung zur sorptiven Wärmespeicherung nicht geeignet sind. Die mineralisch gebundenen Monolithe zeigen dagegen eine hervorragende Kinetik und können mit hohem Feststoffgehalt pro Volumen hergestellt werden. Die Wasseraufnahme wird durch den Binder nicht behindert und die erreichte Maximalbeladung entspricht der einer Kugelschüttung. Trotz des im Technikumsmaßstab zeitaufwändigen Herstellungsverfahrens wurde dieser Monolith-Typ für das weitere Vorhaben ausgewählt.

5.4.2 Bestimmung der benötigten Desorptionstemperatur ϑ_{des}

An der ausgewählten mineralisch gebundenen Probe wurden ebenfalls in der Laborapparatur Experimente durchgeführt, um die benötigte Desorptionstemperatur zu bestimmen. Der untersuchte Monolith wurde vor den Messungen vollständig beladen. Das linke Diagramm in Abbildung 5.9 zeigt den zeitlichen Verlauf der desorbierten Wassermenge in Gewichtsprozent der Probe für unterschiedliche Desorptionstemperaturen. Die maximal desorbierte Wassermenge beträgt ca. 18 Gew.%. Eine vollständige Desorption wird ab einer Temperatur von 166°C erreicht. Eine weitere Temperaturerhöhung beschleunigt die Desorption. Diese Untersuchungen wurden mit trockener Luft durchgeführt ($\varphi = 4\%$). Die Erhöhung der Feuchte im Zuluftstrom bei gleicher Temperatur führt, entsprechend der Adsorptions-Gleichgewichtslage, zu einer Abnahme der desorbierbaren Wassermenge (vgl. Abb. 5.9, rechts). Dieser Effekt kann nur durch eine höhere Desorptionstemperatur kompensiert werden.

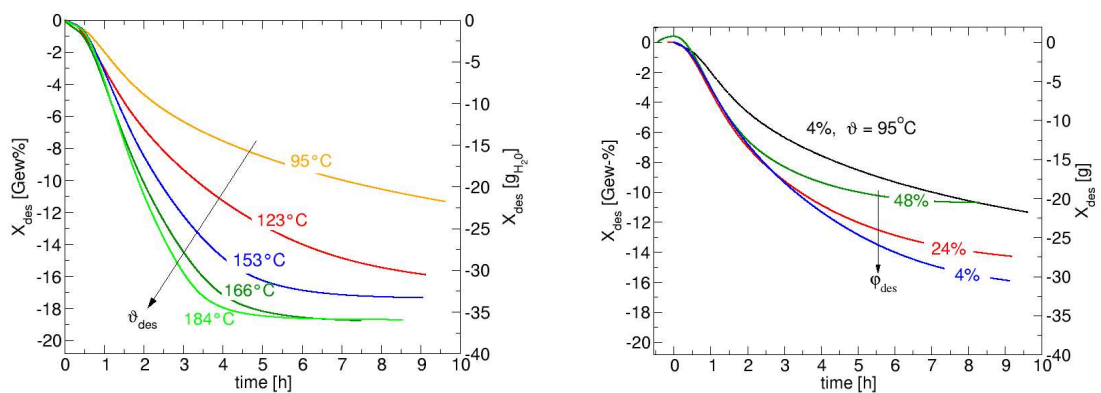


Abb. 5.9: Desorption des mineralisch gebundenen Monolithen: Zeitlicher Verlauf der desorbierten Wassermenge in Abhängigkeit von der Desorptionstemperatur ϑ_{des} (links), Einfluss der relativen Feuchte (bezogen auf 20°C) des Zuluftstroms bei konstanter Temperatur $\vartheta_{des} = 123^{\circ}\text{C}$.

5.4.3 Herstellung der Monolithe

Die Herstellung der Monolithe wurde als Unterauftrag an das Institut für Kunststofftechnologie der Universität Stuttgart (IKT) vergeben. Das IKT verfügt über das Know-how und die apparative Ausstattung, um die gewünschten Monolithe herzustellen.

Abbildung 5.10 zeigt den Extrusionsprozess am Zweischnellenextruder. Man erkennt den Anfang des Extrusionsstranges, dessen Förderung wegen seiner geringen Formstabilität manuell unterstützt werden muss. Nach der Extrusion folgt die Trocknungsphase, in der das als Plastifizierungshilfsmittel beigefügte Wasser entfernt wird. Hauptproblem bei der Trocknung von Wabenstrukturen in einem Ofen ist der über den Querschnitt ungleichmäßige Feuchtigkeitsentzug (die Energieaufnahme erfolgt nur über die Oberfläche) und somit ungleichmäßigen Schwindungsprozess. Dies kann zu Zugspannungen und Rissbildung führen. Der erste Schritt des Trocknungsprozesses erfolgt deswegen mit Hilfe einer Mikrowelle (15 min bei 450 W), die eine gleichmäßige Energieaufnahme über den gesamten Körper erlaubt. Auf diesen Schritt folgt die Vortrocknung: die Monolithe werden bei niedriger Temperatur (ein Tag bei 35 bis 45°C) in einem Trockenschrank getrocknet. Anschliessend erfolgt die Aktivierung bei hohen Temperaturen (4 bis 5 Stunden bei 200°C). Die Aktivierung entfernt die Restfeuchte aus dem Wabenkörper und stellt die mechanische Festigkeit her.

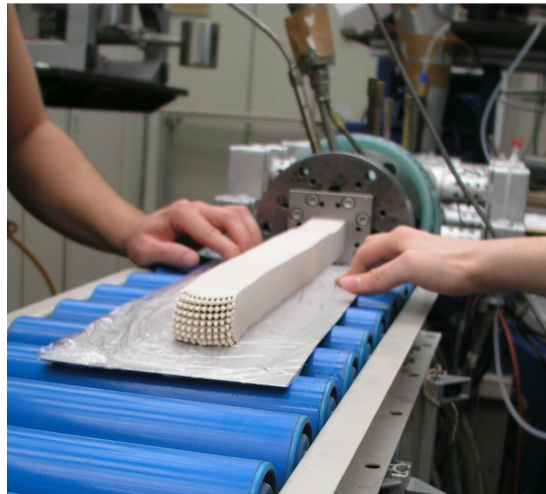


Abb. 5.10: Extrusionsprozess am Zweischnellenextruder

Das Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile der Universität Stuttgart stellte freundlicherweise Öfen für die Aktivierung zur Verfügung und nahm anschliessend Porositätsmessungen vor, um den Effekt der Aktivierung zu untersuchen. Die so genannten Quecksilber-Porosimetrie erlaubt die Bestimmung der Porenverteilung in Festkörpern, genauer der Meso- und Makroporen.

Es wurde je eine Probe vor der Aktivierung, nach einer 2,5-stündigen Aktivierung bei $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ und nach einer 4-stündigen Aktivierung bei $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ untersucht. Abbildung 5.11 oben veranschaulicht den Anstieg der Gesamtporosität mit der Aktivierungstemperatur und -haltezeit. Dabei wächst der mittlere Porenradius. Die Zunahme des mittleren Porenradius ist auch im unteren Diagramm erkennbar: er verschiebt sich von $0,047\mu\text{m}$ (ohne Aktivierung) über $0,23\mu\text{m}$ (Aktivierung bei $190\text{ }^{\circ}\text{C}$) nach $0,59\mu\text{m}$ (Aktivierung bei $200\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Dies ist mit dem thermischen Abbau der organischen Bestandteile in der Probe zu erklären. Es ist anzunehmen, dass die Zunahme des mittleren Porenradius die Adsorptionskinetik beschleunigt, da die Zugänglichkeit der Poren erleichtert wird. Ein quantitativer Zusammenhang zwischen Aktivierungsdauer bzw. -haltezeit und Adsorptionkinetik muss aber noch genauer untersucht werden. Dieses Wissen ist vor allem wichtig im Hinblick auf den Energieaufwand bei der Herstellung der Monolithe. Wenn eine solarthermische Aktivierung bei Inbetriebnahme der MonoSorp-Anlage ausreichend für gute Adsorptionskinetik wäre (d.h. bei max. $175\text{ }^{\circ}\text{C}$), könnte die energie-intensive Aktivierung im Ofen eingespart werden.

Darüberhinaus ist der Zeolithgehalt der hergestellten Monolithe von Interesse. Dazu wurde vom IKT eine thermogravimetrische Analyse an einer Monolith-Probe vor und nach der thermischen Aktivierung durchgeführt. Die Thermogravimetrie erlaubt die Bestimmung der Zusammensetzung eines Stoffs unter der Voraussetzung, dass die enthaltenen Stoffe sich bei unterschiedlichen Temperaturen verflüchtigen. Diese Methode ist für Monolithe gut geeignet, da sich alle anderen Komponenten bei niedrigeren Temperaturen verflüchtigen als Zeolith. Abb. 5.12 zeigt die temperaturabhängige Massenabnahme der Probe vor bzw. nach der Aktivierung ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 h).

Der Zeolithanteil nach der Aktivierung liegt bei $71\text{ Gew}\text{--}\%$, d.h. mehr als $2\text{ Gew}\text{--}\%$ über dem Wert vor der Aktivierung ($68,4\text{ Gew}\text{--}\%$).

Wie sich herausstellte, war die Herstellung der angeforderte Menge von 100 l Monolithe an der Grenze der Kapazitäten des IKT-Technikums. Die eingesetzten (Küchen-)Mikrowellen waren hauptverantwortlich für das niedrige Produktionstempo. Hinzukommende personelle und maschinelle Engpässe am IKT verzögerten die Fertigstellung der benötigten 500 Stück um mehrere Monate. Es ist dem engagierten Einsatz der beteiligten Wissenschaftler und studentischen Hilfskräfte zu verdanken, dass die

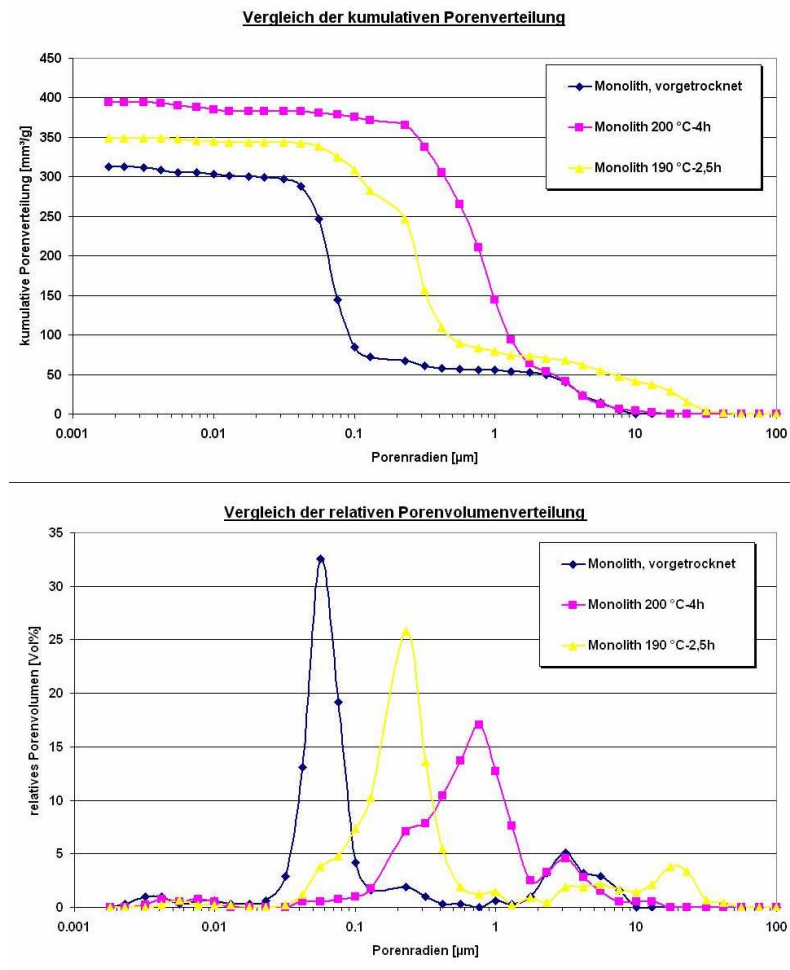


Abb. 5.11: Ergebnisse der Porositätsmessung an Monolith-Proben bei verschiedenen Aktivierungstemperaturen und -haltezeiten (Analyse des IfKB, Universität Stuttgart). Oben: Vergleich der kumulativen Porenverteilung, unten: Vergleich der relativen Porengrößenverteilung

benötigte Menge hergestellt werden konnte. So ist es dank der guten und intensiven Zusammenarbeit mit dem IKT im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gelungen, den weltweit ersten Sorptionspeicher aus extrudierten Wabenkörpern herzustellen.

Mit relativ niedrigem Aufwand kann der Herstellungsprozess für die zukünftige Produktion größerer Mengen automatisiert werden: eine sich an den Extruder anschließende Trocknungsstrasse mit Mikrowelle würde die zeitaufwendigsten Arbeitsschritte überflüssig machen.

Einen Blick in den geöffneten Speicher zeigen die Fotos in Abbildung 5.13. Im linken Foto ist die Anordnung der Monolithe beim Füllen des Speichers zu sehen. Im Hintergrund sind die Rohre des Luft/Wasser-Wärmeübertragers zu erkennen. Das rechte Foto zeigt den vollständig gefüllten Speicher. Es wurden 20 Thermoelemente in den Speicher eingebracht, um Temperaturen an verschiedenen Stellen im Innern des Speicher zu messen.

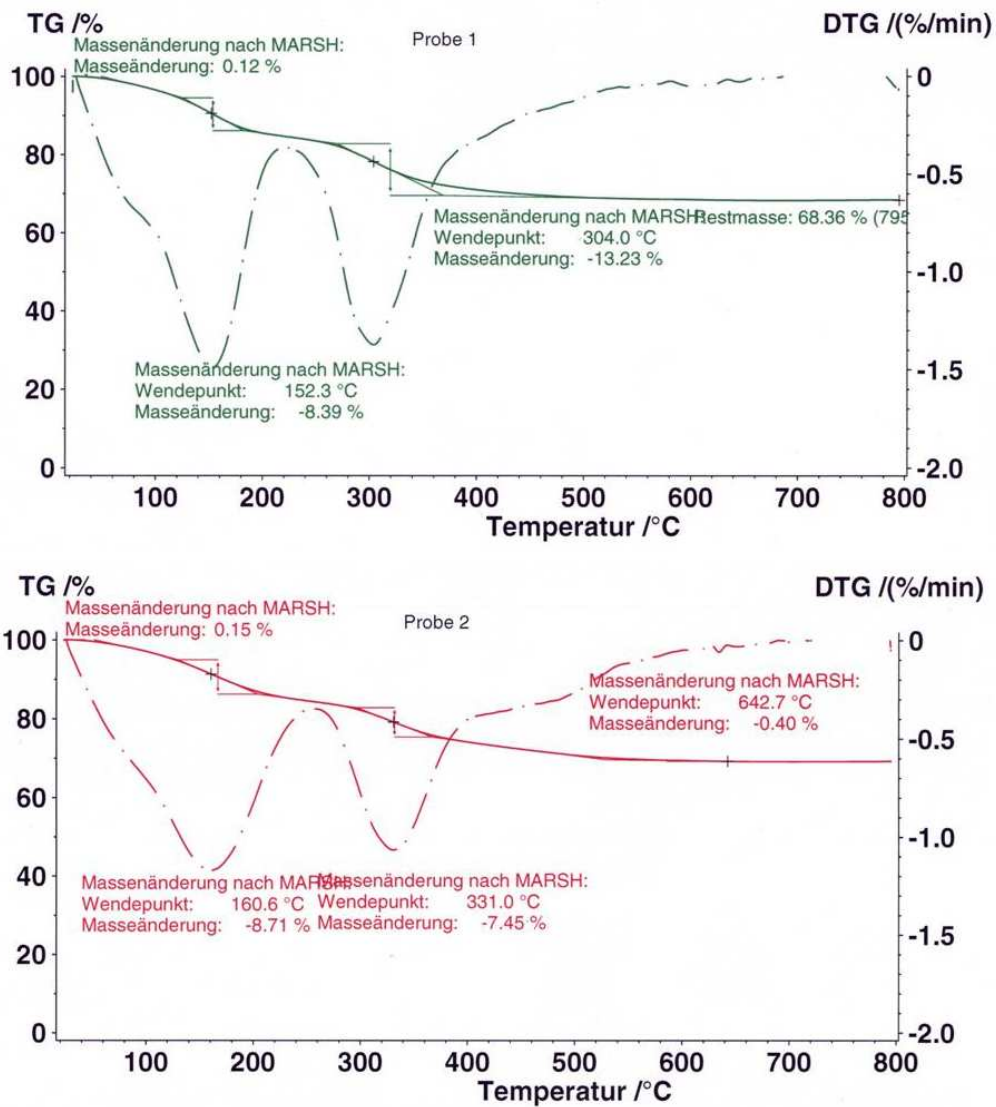


Abb. 5.12: Thermogravimetrische Analyse eines Monolithen vor (oben) und nach der Aktivierung bei 200 °C, 4 h (unten)(Analyse vom IKT, Universität Stuttgart)

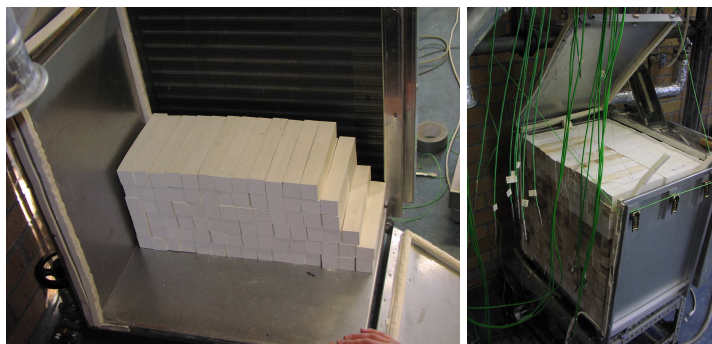


Abb. 5.13: Blick in den geöffneten Speicher: Anordnung der Monolithe im Speicher (Foto links), vollständig gefüllter Speicher bestückt mit Thermoelementen zur Temperaturmessung im Adsorptionsbett (Foto rechts)

Kapitel 6

Experimentelle Untersuchungen

Der ursprüngliche Projekt-Zeitplan sah vor, im Sommer 2006 die solarthermische Regeneration des Sorptionsspeichers zu untersuchen. Wegen des um sechs Monate verzögerten Projektbeginns war die Versuchsanlage erst im Spätsommer 2006 betriebsbereit. Zudem standen aus den in Abschnitt 5 beschriebenen Lieferschwierigkeiten die benötigten Monolithe erst im Herbst 2006 zur Verfügung. Aus diesen Gründen wurden die geplanten Versuchsreihen abgeändert: im Spätsommer wurden erste Adsorptionsexperimente an einer kommerziellen Zeolith-Kugelschüttung vorgenommen und die noch ausreichende Sonneneinstrahlung für eine solarthermische Desorption genutzt. Nach Lieferung der Monolithe im Herbst war der Kollektorertrag zu gering, um den Speicher vollständig zu regenerieren. Um mit den Versuchen über den Winter fortfahren zu können, wurde ein elektrischer Heizstab in den Kollektorkreis eingebaut.

Mit den Experimenten an der Versuchsanlage sollten hauptsächlich zwei Fragestellungen untersucht werden: Erreicht die Anlage die erwartete thermische Leistungsfähigkeit? Und: ist die solarthermische Regeneration des Speichers mit handelsüblichen Komponenten möglich?

6.1 Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit

Zwei Größen sind hier von Interesse: die Energiespeicherdichte und der erreichbare Temperaturhub der Frischluft.

6.1.1 Adsorptions-Experimente an Kugelschüttung

Der Kugeldurchmesser der eingebrachten Zeolith-Schüttung betrug zwischen 1,6 mm und 2,5 mm. Die Schüttung wurde in den in Abb. 6.1 dargestellten Behälter eingebracht. Bei dem verwendeten Zeolith handelt es sich um das Produkt Zeosorb4A der Firma Tricat Zeolites, das als Bindemittel ca. 20% Ton enthält. Vor der in Abbildung 6.2 dargestellten Adsorption wurden die Zeolithe bei 180 °C im Ofen getrocknet.

Der Speicher wurde mit feuchter Raumluft ($\varphi \approx 35\%$) mit einem Volumenstrom von $15\text{ m}^3/\text{h}$ durchströmt und bis zur Sättigung beladen. Abbildung 6.2 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe während der Adsorptionsphase im Speicher, die an fünf axialen Stellen gemessen wurden. Die Positionen der Temperaturmessstellen sind der rechts stehenden Grafik zu entnehmen. Außerdem sind für den ein- und austretenden Luftstrom die jeweilige Temperatur und der Wassergehalt (im unteren Diagramm) gezeigt.

Es bilden sich steile Temperaturprofile aus, die auf eine ebenfalls steile Adsorptionsfront schließen lassen. Es resultiert eine Austrittstemperatur (T_{out}), die während der gesamten Adsorptionsphase annähernd konstant bleibt. Der Durchbruch des Adsorptivs erfolgt erst bei nahezu vollständig beladenem Speicher. Ein derartiges Adsorptionsverhalten wird angestrebt, um einen möglichst großen

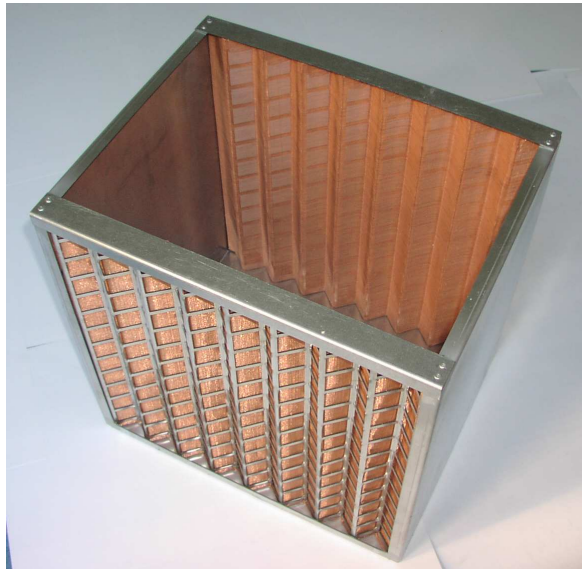


Abb. 6.1: Behälter für Kugelschüttung (aus Edelstahl, Kupfergitter)

Temperaturhub zwischen ein- und austretender Luft zu erreichen.

Die maximale Temperaturerhöhung im Speicher betrug ca. 22 K. Daraus lässt sich durch Gleichsetzen der Adsorptionswärme

$$\dot{Q}_{ads} = \dot{m}_{tr.L} \cdot \Delta x \cdot \Delta \bar{h}_{ads} \quad (6.1)$$

und

$$\dot{Q}_{ads} = \dot{m}_{tr.L} \cdot c_p \cdot \Delta T_{ads} \quad (6.2)$$

die mittlere Adsorptionseenthalpie zu $\Delta \bar{h}_{ads} \approx 3600 \text{ kJ/kg}_{ads}$ bestimmen.

Dieser Mittelwert liegt in guter Übereinstimmung mit der Literatur.

Die adsorbierte Wassermasse lässt sich durch Aufintegration der Feuchtedifferenz zwischen ein- und austretender Luft bestimmen. In dem 100 l großen Speicher wurden insgesamt ca. 12 kg Wasser adsorbiert.

Zur Überprüfung dieses Messwerts kann die adsorbierte Wassermasse aus Herstellerangaben berechnet werden: In den Speicher wurden 61,5 kg der Zeolith-Schüttung (gewogen nach Trocknung bei 180°C, d.h. mit einer Restfeuchte von ca. 2 Gew-%) eingebracht. Der Anteil an reinem Zeolith beträgt 80 Gew-%. Wenn von einer Gleichgewichtsbeladung von 18 Gew-% ausgegangen wird, so berechnet sich die adsorbierte Wassermasse zu ca. 11 kg. Dies bestätigt den gemessenen Wert von 12 kg. Die Abweichung des Messwerts von ca. 8 % ist mit Messungenauigkeiten zu erklären (insbesondere Feuchte- und Luftvolumenstrommessung).

Damit beträgt die Speicherkapazität der Schüttung ca. 120 kWh/m³, was gut dem Doppelten der Energiespeicherdichte eines Warmwasserspeichers (bezogen auf eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 50 \text{ K}$) entspricht.

Der Temperaturhub zwischen Speichereintritt und -austritt betrug ca. 20 K. Der niedrige Volumenstrom (ca. 15 m³/h) ist unter anderem mit dem hohen Druckverlust der Kugelschüttung zu erklären.

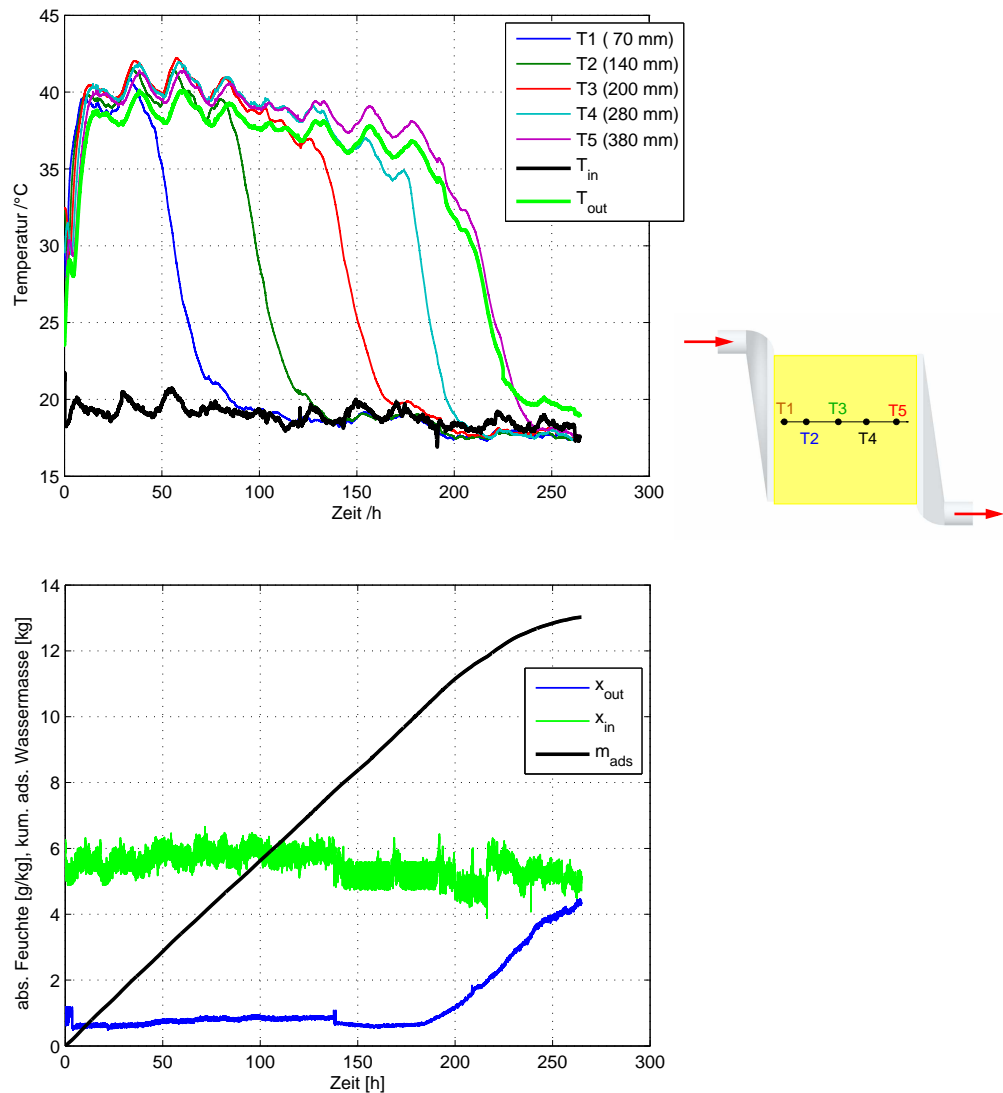


Abb. 6.2: Adsorptionsphase an Kugelschüttung. Wanderung der Temperaturfront im Speicher in axialer Richtung (oben); Verlauf der Ein- und Austrittsfeuchte und Masse an adsorbiertem Wasser (unten); Zuströmbedingungen: $T_{zu} \approx 19^\circ\text{C}$, $\varphi = 35\%$, $\dot{V} \approx 15 \text{ m}^3/\text{h}$

6.1.2 Adsorptions-Experimente am Monolith-Speicher

Nachdem die Monolithe geliefert waren, wurden sie in den Speicher eingebaut (eingebrachte Trockenmasse: ca. 62 kg), mit Thermoelementen versehen und solarthermisch regeneriert. Abbildung 6.3 zeigt die anschließende Adsorption mit feuchter Raumluft ($\varphi \approx 40\%$) und einem Volumenstrom von $22 \text{ m}^3/\text{h}$. Das obere Diagramm enthält die zeitlichen Temperaturverläufe während der Adsorptionsphase im Speicher, die an vier axialen Stellen gemessen wurden. Die Positionen der Temperaturmessstellen sind wieder der rechts stehenden Skizze zu entnehmen. Außerdem sind die Speichereintritts- und Speicheraustrittstemperaturen dargestellt. Das untere Diagramm zeigt den Verlauf des Wassergehalts der ein- und austretenden Luft.

Die Temperaturen im Speicher erreichen zu Beginn der Adsorption hohe Werte und fallen dann schnell

ab. Dies liegt darin begründet, dass die Adsorption direkt im Anschluss an die Desorption gestartet wurde und noch Regenerationswärme als fühlbare Wärme im Speicher vorhanden war.

Die Temperaturerhöhung $T_{out} - T_{in}$ beträgt ca. 14 K. Der berechnete Wert bei einer Eintrittsfeuchte von $\varphi \approx 40\%$ beträgt rund 24 K. Zudem sind die Temperaturprofile im hinteren d.h. weiter stromabwärts gelegenen Teil des Speichers (Temperaturen T3 und T4) etwas weniger steil als im vorderen Teil (T1 und T2). Dieses Verhalten, zusammen mit dem schnellen Durchbruch, zeigt dass der Speicher nicht vollständig regeneriert war. Die dieser Messung vorangegangene Regeneration erfolgte im Spätherbst unter Verwendung der Kollektoren (vgl. Abschnitt 6.2.4). Die benötigten Temperaturen für eine vollständige Desorption wurden nicht über einen ausreichenden Zeitraum erreicht.

Nach Abschluss der Adsorption weisen die Werte für Ein- und Austrittsfeuchte eine Abweichung von ca. 3 g/kg auf. Dies zeigt die Messungenauigkeit der eingesetzten kapazitiven Feuchtesensoren.

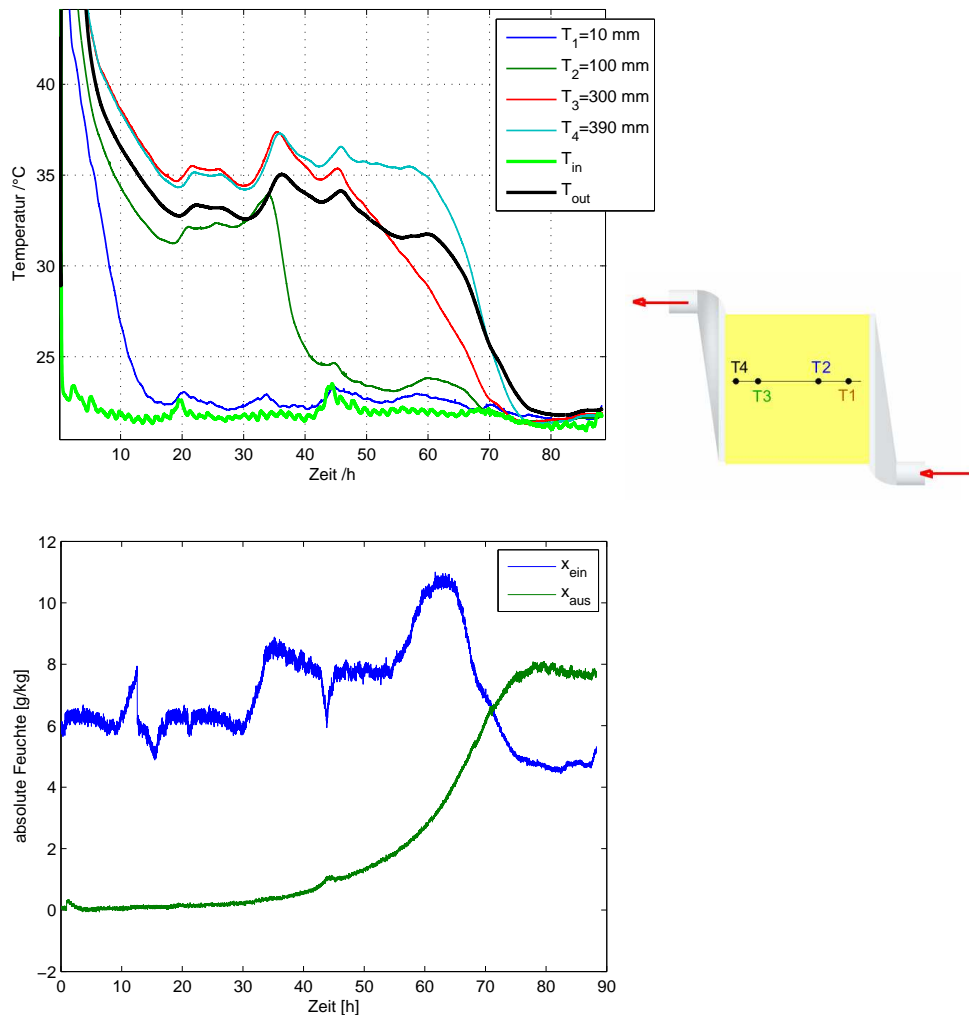


Abb. 6.3: Adsorptionsphase an Monolith-Speicher. Wanderung der Temperaturfront im Speicher in axialer Richtung (oben); Verlauf der Ein- und Austrittsfeuchte und Masse an adsorbiertem Wasser (unten); Zuströmbedingungen: $T_{zu} \approx 22^\circ\text{C}$, $\varphi_{zu} = 40\%$, $\dot{V} = 22 \text{ m}^3/\text{h}$

Die nächste Desorption erfolgte mit dem elektrischen Heizstab. Die unbefriedigend arbeitenden kapazitiven Feuchtesensoren wurden zu diesem Zeitpunkt durch die wesentlich zuverlässigeren Taupunktspiegel-Messgeräte ersetzt. Abbildung 6.4 zeigt die darauf folgende Adsorption mit einer Eintrittsfeuchte von 40 bis 60 %. Der Luft-Volumenstrom betrug $50 \text{ m}^3/\text{h}$. Das obere Diagramm zeigt die Temperaturanhebung zwischen Speichereintritt und -austritt für verschiedene Eintrittsfeuchten: bei ca. 40 % relativer Feuchte sind dies 20 K, bei 50 %: 25 K und bei 60%: 30 K. Das untere Diagramm zeigt den Verlauf der Wasserbeladung der Luft gemessen am Speichereintritt und -austritt sowie die daraus berechnete kumulierte adsorbierte Wassermasse. Der steile Anstieg der Austrittsfeuchte gegen Ende der Adsorption deutet auf eine hohe Adsorptionskinetik hin. Nach zwei Tagen ist die Adsorption abgeschlossen. Aus den Messungen ergab sich durch Aufintegration der Feuchtedifferenz zwischen ein- und austretender Luft für die Masse an adsorbierten Wasser ca. 13 kg. Dieses Messergebnis ist in guter Übereinstimmung mit dem theoretischen Wert von 13,6 kg adsorbiertes Wasser bei einer maximalen reversiblen Beladung von 18 Gew-%. Die Abweichung ist hier mit der Unsicherheit bei der Messung des Luftvolumenstroms zu erklären.

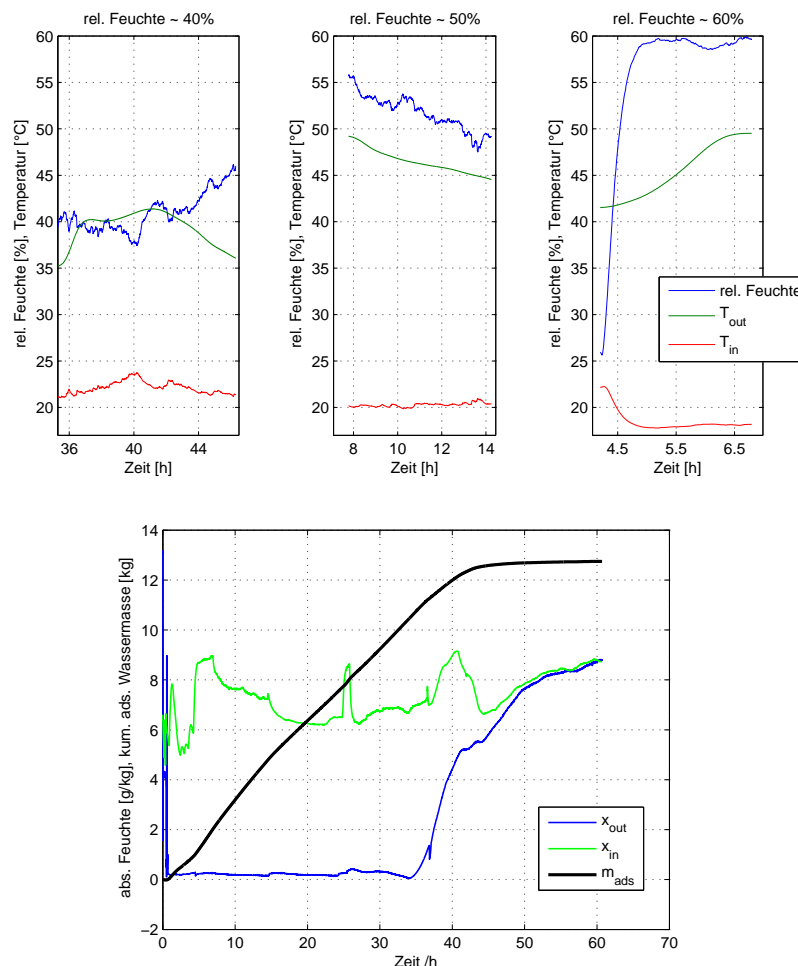


Abb. 6.4: Adsorptionsphase an Monolith-Speicher. Temperatur an Speichereintritt und -austritt bei verschiedenen relativen Feuchten am Eintritt (oben); Verlauf der Ein- und Austrittsfeuchte und Masse an adsorbiertem Wasser (unten); Zuströmbedingungen: $T_{zu} \approx 20^\circ\text{C}$, $\varphi_{zu} = 40\text{...}60\%$, $\dot{V} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

6.2 Solarthermische Regeneration des Speichers

Eine wichtige Frage, um die es in diesem Projekt zu beantworten geht, ist, ob es gelingt, solarthermisch die benötigte Wärme in Form von heißer Luft zur Aufheizung des Speichers für die Desorption zur Verfügung zu stellen. Wie in Abschnitt 5.4.2 gezeigt, liegt die Mindestanforderung bei einer Betttemperatur von 170°C . Neben der Frage nach dem thermischen Wirkungsgrad handelsüblicher Kollektoren bei diesen Temperaturen bestehen zwei weitere Schwierigkeiten: Gelingt es die angesaugte Umgebungsluft mit der bestehenden Anlage auf eine Temperatur von 170°C aufzuheizen und wie wirkt sich der durch die schwankende Solarstrahlung stark transiente Wärmeeintrag auf die Aufheizung des Speichers aus? Diese Fragen wurden im Sommer 2006 an dem Speicher mit Kugelschüttung mit in-stationärem Solarwärmeeintrag untersucht.

6.2.1 Desorption der Kugelschüttung mittels Solarkollektor

Abbildung 6.5 zeigt einen typischen Betriebstag des Sonnenkollektors zu Beginn der Speicherregeneration. Um ca. 10 Uhr morgens wird eine Kollektoraustrittstemperatur (Volumenstrom im Kollektorkreis $\dot{V} = 80 \text{ l/h}$) von ca. 110°C erreicht. Zu diesem Zeitpunkt wird das Gebläse eingeschaltet und mit der Aufheizung des Speichers begonnen. Die Luft Eintrittstemperatur in dem Luft/Wasser-Wärmeübertrager beträgt ca. 23°C . Die vom Kollektor abgegebene Leistung beträgt je nach Einstrahlungsintensität, die dem Bild oben rechts entnommen werden kann zwischen $2,0$ und $2,5 \text{ kW}$. Der Kollektorwirkungsgrad, der ebenfalls in Abbildung 6.5 dargestellt ist, liegt in dem gemessenen Temperaturbereich bei ca. 50% . Dies ist in guter Übereinstimmung mit der nach Norm EN12975 ermittelten Wirkungsgradkennlinie des Kollektors. Bei einer mittleren Kollektortemperatur von 180°C beträgt der Kollektorwirkungsgrad noch ca. 40% . Das zeigt, dass mit handelsüblichen Kollektoren die Bereitstellung der benötigten Desorptionswärme auch bei hohen Temperaturen, wie sie für zeolithische Adsorbentien notwendig sind, erreicht wird.

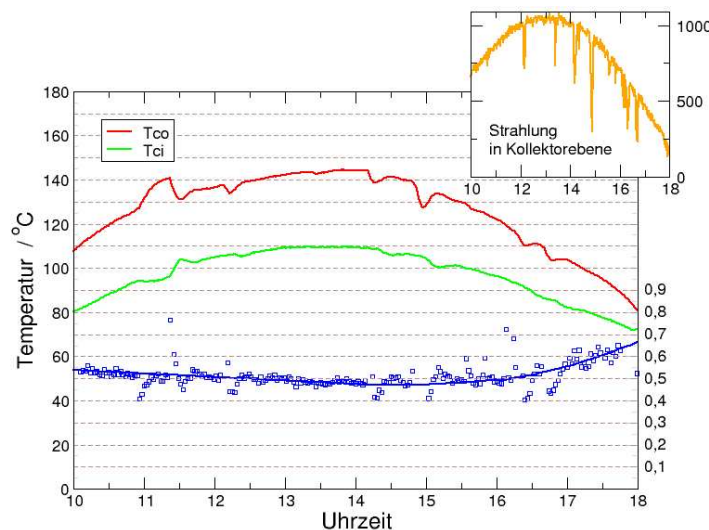


Abb. 6.5: Kollektorein- und -austrittstemperaturen und Kollektorwirkungsgrad an einem sonnigen Spätsommertag (12.9.06) am ersten Tag einer Desorptionsphase.

6.2.2 Stationäre Desorption mittels elektrischem Heizstab

Da aufgrund der Jahreszeit eine solarthermische Desorption nur noch begrenzt möglich war, wurde in den Solarkreislauf parallel zum Kollektor ein elektrischer Heizstab eingebaut, um auch in den Wintermonaten die Desorption des Speichers zu ermöglichen.

Zunächst wurden Desorptionsuntersuchungen mit konstanter wasserseitiger Eintrittstemperatur in den Luft/Wasser-Wärmeübertrager durchgeführt. Der elektrische Heizstab (maximale Leistung 3 kW) wird über einen Eurotherm-Regler auf eine konstante Temperatur geregelt. Abbildung 6.6 zeigt die Aufheizung des Luftstroms bei stufenweiser Anhebung der Wassereintrittstemperatur. Im ersten Schritt wird die angesaugte Raumluft von der Temperatur T_1 in dem Luft/Luft-Wärmeübertrager mittels dem aus dem Speicher austretenden Luftstrom auf die Temperatur T_2 vorgewärmt. Mit dieser Temperatur tritt der Luftstrom in den Luft/Wasser-Wärmeübertrager ein und wird dort auf die Desorptionstemperatur T_3 aufgeheizt. Die wasserseitige Eintrittstemperatur in den Luft/Wasser-Wärmeübertrager ist als T_{Wasser} gekennzeichnet. Im Sorptionsspeicher wird die mittlere Temperatur $T_{Speicher}$ erreicht. Es zeigt sich, dass mit einer Temperatur von 180°C im Solarkreis die angestrebte Desorptionstemperatur von 170°C erreicht wird. Der Luft-Volumenstrom betrug ca. $30\text{ m}^3/\text{h}$.

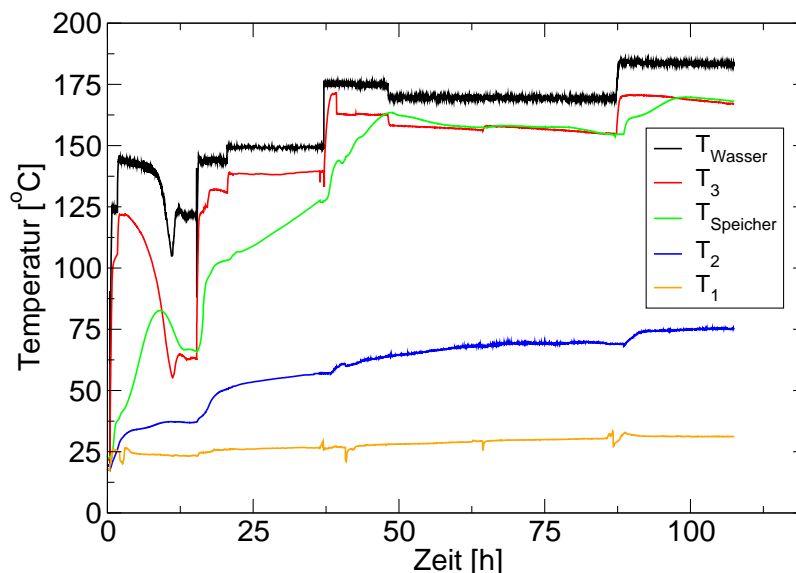


Abb. 6.6: Temperaturanhebung für Desorption im Luft/Luft- und Luft/Wasser-Wärmeübertrager. T_1 : Raumlufttemperatur, T_2 : Lufttemperatur nach Vorwärmung im Luft/Luft-Wärmeübertrager, T_3 : Lufttemperatur nach Aufheizung im Luft/Wasser-Wärmeübertrager, T_{Wasser} : Eintrittstemperatur des Wassers in den Luft/Wasser-Wärmeübertrager, $T_{Speicher}$: Temperatur im Sorptionsspeicher

6.2.3 Instationäre Desorption mittels elektrischem Heizstab

Nachdem das stationäre Aufheizen des Speicherinhalts mit dem Heizstab auf die benötigte Desorptionstemperatur gelungen war, wurde der Heizstab als Kollektorsimulator eingesetzt. Dazu wurden die im Sommer 2006 aufgezeichneten Daten (Einstrahlung, Kollektorrücklauftemperatur) von einem Regelalgorithmus eingelesen und entsprechend der Wirkungsgradkennlinie daraus die zu erwartende "Kollektoraustrittstemperatur" berechnet. Dieser Wert wird dem Eurotherm-Regler des elektrischen Heizstabs als Sollwert übermittelt. Auf diese Weise kann die Kollektorleistung in Abhängigkeit von der

Einstrahlung reproduziert und die Desorption unter instationären Bedingungen untersucht werden. Hieraus ergeben sich die in Abb. 6.7 gezeigten Speichertemperaturprofile. Zusätzlich aufgetragen ist die aus Ein- und Austrittsfeuchte berechnete kumulierte desorbierte Wassermasse.

Durch die instationäre Betriebsweise treten im Vergleich zur instationären Regeneration zusätzliche Effekte auf. So steigt zu Beginn jeder Aufheizphase die Kurve der desorbierten Wassermasse kurzzeitig an. Dies deutet darauf hin, dass hier eine Adsorption stattfindet, was daran liegt, dass die relative Feuchte der Eintrittsluft größer als am Vortag ist und so lange adsorbiert wird, bis der Speicher die nötige Temperatur für die Desorption erreicht.

Weiterhin wird aus dem starken Abfall der Speichertemperatur über Nacht nochmal deutlich, dass eine effiziente Regeneration nur bei geringen sensiblen Wärmeverlusten, d.h. einer guten Wärmedämmung möglich ist. Verstärkt wird dieses Problem durch den geringen Luftvolumenstrom (ca. 30 statt der geplanten 100 bis 150 m^3/h), so dass die Regeneration wesentlich langsamer abläuft.

Aus dem Verlauf der desorbierten Wassermasse wird deutlich, dass ein großer Teil des Wassers bei Temperaturen bis 130°C desorbiert wird.

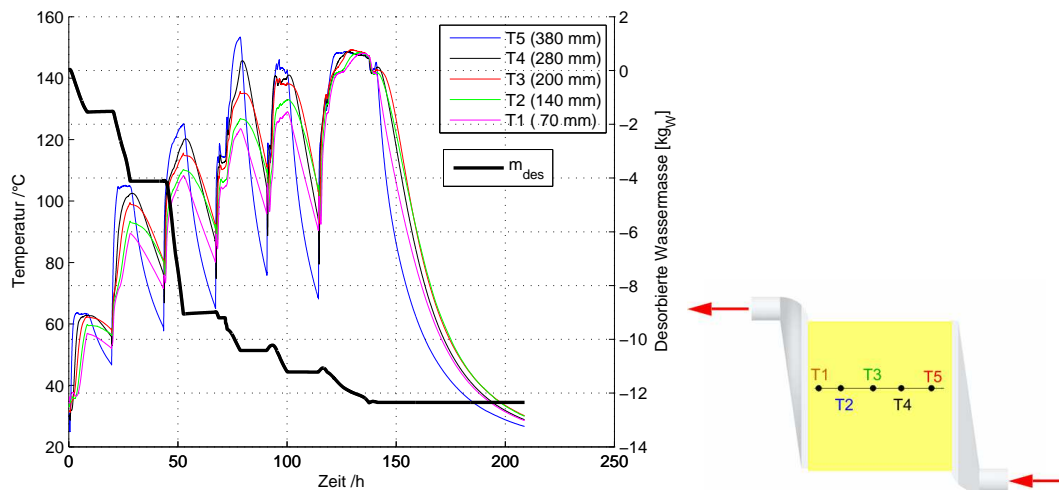


Abb. 6.7: Instationäre Desorption mit Heizstab: Verlauf der Temperatur an 5 verschiedenen Stellen im Speicher und kumulierte desorbierte Wassermasse.

Daraus geht hervor, dass es zielführend ist, über einen langen Zeitraum mit mittleren Temperaturen zu desorbieren gefolgt von einem relativ kurzen Temperaturpeak bei 170°C um die restliche Feuchtigkeit auszutreiben. Aus diesem Verhalten können Hinweise für eine effiziente Desorptionsstrategie und ein optimiertes Speicherdesign gewonnen werden: Optimal ist die Unterteilung des Speichers in mehrere Teile, die unabhängig voneinander desorbiert werden können. So kann an Tagen mit kleinem Wärmeangebot eine "Grund-Desorption" bei niedrigeren Temperaturen durchgeführt werden und an Tagen hoher Einstrahlung die Restfeuchte aus den Speicherteile ausgetrieben werden, die bereits zum großen Teil bei niedrigen Temperaturen regeneriert wurden.

6.2.4 Solarthermische Desorption

Zwei sonnige Herbsttage konnten für die Regeneration der Monolithe mit den Kollektoren genutzt werden. Abb. 6.8 zeigt für zwei Tage die Verläufe der Temperatur im Speicher (an fünf Stellen, s. Skizze in Abb. 6.8 unten) und der absoluten Feuchte der Luft an Speichereintritt und -austritt. Am ersten Tag gelingt es, den Speicher im vorderen Teil (d.h. stromab direkt nach dem Luft/Wasser-Wärmeübertrager)

auf ca. $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu erwärmen, den hinteren auf knapp $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Am zweiten Tag erreicht die Temperatur im vorderen Teil $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, im hinteren $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hieraus wird deutlich, dass bei der solarthermischen Regeneration immer wieder der vordere Speicherbereich aufgeheizt wird. Wegen der Wärmeverluste des Speichers an die Umgebung dauert es sehr lang, bis das gesamte Speichervolumen auf die nötige Desorptionstemperatur gebracht ist. Es ist also eine Strategie vonnöten, die Wärme an den Ort im Speicher zu bringen, wo tatsächlich noch eine Regeneration stattfindet. Denkbar ist z.B. eine Aufteilung des Speichers in mehrere kleine voneinander unabhängig regenerierbare Speicherteile. Eine andere Lösung wäre der Einbau mehrerer Einströmöffnungen über die Speicherlänge, so dass die heiße Luft verschiedenen Speicherteilen zugeführt werden kann.

Es ist noch viel Forschungs- und Konstruktionsarbeit nötig, um die solarthermische Regeneration auf effiziente Weise zu ermöglichen.

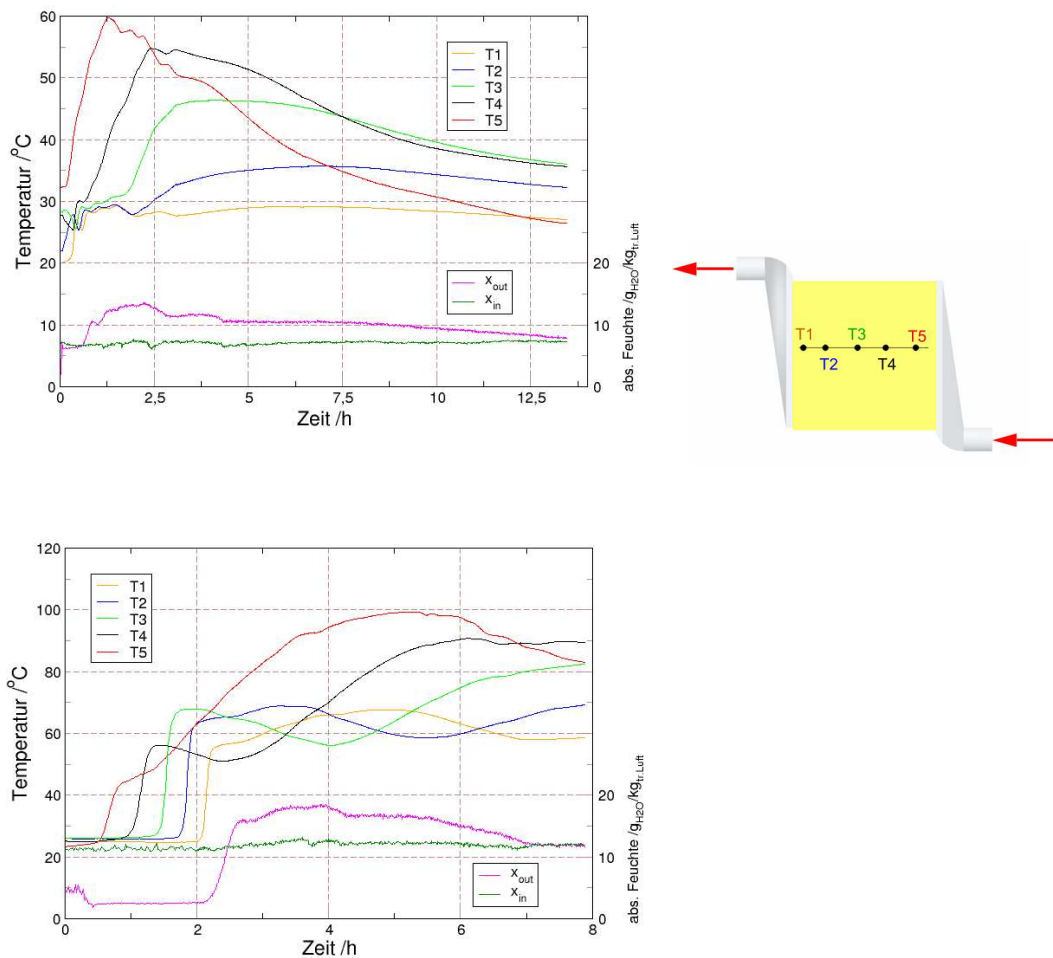


Abb. 6.8: Solarthermische Regeneration an dem mit Monolithen gefüllten Speicher: Verlauf der Temperatur an 5 verschiedenen Stellen im Speicher und Verlauf der absoluten Feuchte an Speichereintritt und -austritt.

Kapitel 7

Numerische Simulation

Ein komplexes Verfahren, wie das in Kapitel 2 vorgestellte, macht eine detaillierte Simulation zur Bewertung und zur weiteren Entwicklung des Verfahrens zwingend notwendig.

7.1 Anforderungen an das Simulationsmodell

Die sich stellende Simulationsaufgabe kann in zwei Teilsysteme gegliedert werden:

1. Die Simulation des Gebäudes und der thermischen Solaranlage
2. die Simulation der Sorptionsprozesse in einem durchströmten Festbett.

Bei genauerer Betrachtung der beiden Teilsysteme ist festzustellen, dass sie sich im Hinblick auf ihre mathematische Beschreibung und die Dynamik der ablaufenden Vorgänge deutlich unterscheiden. Das erste Teilsystem ist ein komplexes System, bestehend aus vielen Einzelkomponenten mit einer eher geringen Dynamik. Zeitschrittweiten von Minuten bis zu einer halben Stunde sind ausreichend. Die Einzelkomponenten lassen sich häufig durch einfache Gleichungen beschreiben und werden örtlich nicht oder nur gering diskretisiert.

Der Beschreibung des zweiten Teilsystems liegt eine eher mikroskopische Betrachtung der physikalisch-chemischen Vorgänge der Adsorption bzw. Desorption zu Grunde. Die Dynamik des Systems schwankt sehr stark. Je nach Zulaufbedingungen muß zeitlich und örtlich sehr fein diskretisiert werden. Im Bereich wandernder Temperatur- und Konzentrationsfronten und bei stark schwankenden Zulaufbedingungen während der Desorptionsphasen im Sommer tritt eine hohe Dynamik auf. Während den Stillstandszeiten können dagegen Zeitschritte im Stundenbereich gewählt werden.

Es wird deutlich, dass eine Abbildung beider Teilsysteme in einem Simulationsprogramm den Anforderungen nur unzureichend gerecht wird. Da für beide Problemstellungen exzellente Programme zur Verfügung stehen, ist dies auch nicht erforderlich.

7.2 Simulation des Adsorptions- und Desorptionsprozesses mit PDEX

Die Modellbildung der Sorptionsvorgänge erfolgt in eindimensionaler Form mit separater Energie- und Stoffbilanz für die Gas- und Feststoffphase ergänzt um eine Gleichung zur Berechnung des Adsorptionsgleichgewichts. Durch die getrennte Bilanzierung der Gas- und der Feststoffphase ist die Berücksichtigung der komplexen Wechselwirkung von Wärme- und Stofftransport möglich. Die Koeffizienten des radialen, ortsabhängigen Wärme- und Stofftransports werden durch empirische Korrelationen wiedergegeben. Zur Lösung des resultierenden Systems parabolischer Differentialgleichungen der allgemeinen Form

$$\bar{B} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\bar{v} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{1}{x^c} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{D} \cdot x^c \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \bar{Q}$$

wird das Programmpaket **PDEX** eingesetzt.

Die zugrunde liegende Numerik wurde am Konrad-Zuse-Zentrum unter dem Namen PDEX1M entwickelt. **PDEX1M** steht für **Parabolic Differential Equation eXtrapolation solver in 1-D with Moving grid techniques** und ist ein adaptives numerisches Verfahren zur Lösung von Systemen gekoppelter, nichtlinearer partieller Differentialgleichungen (PDG) in einer Raumdimension. Die örtliche Diskretisierung beruht auf einem Finite Differenzen-Verfahren mit variabler Orts- und Zeitschrittweitensteuerung. Durch eine Fehlerschätzung in Ort und Zeit in Verbindung mit dem adaptiven Gitter wird eine hohe Genauigkeit bei gleichzeitig großer Stabilität und Robustheit des Verfahrens erreicht. Am Institut für Chemische Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart wurde das Paket für eine benutzerfreundliche Anwendung auf typische verfahrenstechnische Problemstellungen weiterentwickelt [6].

Abbildung 7.1 zeigt beispielhaft die Berechnung der Temperatur- und Beladungsfronten sowie die

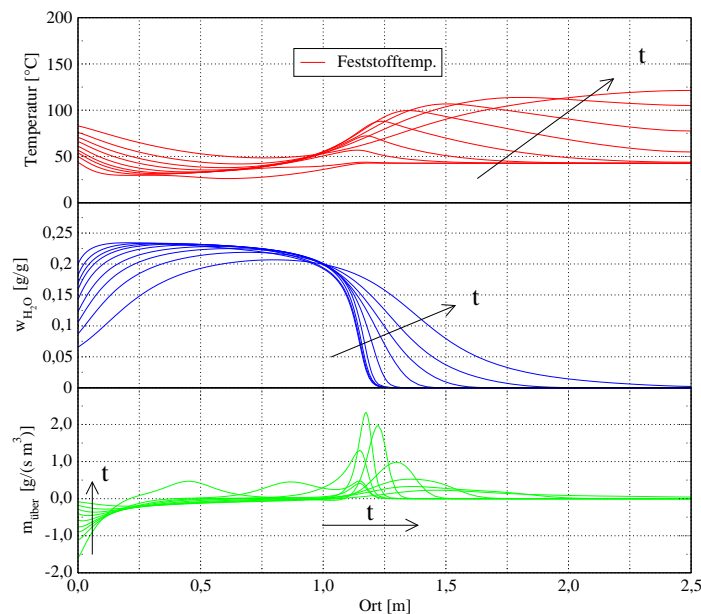


Abb. 7.1: Wanderung der Temperatur- und Beladungsfronten im Sorptionsspeicher während einer Regenerationsphase von fünf Stunden

übergehenden Massenströme zwischen Gas- und Feststoffphase im Sorptionsspeicher. Dargestellt ist eine kurze Desorptionsphase (5 h) eines teilbeladenen Bettes hervorgerufen durch eine plötzliche Erhöhung der Zulufttemperatur auf 120°C durch Zuschalten des Solarkreislaufs zur Regeneration. Im vorderen Bereich findet eine Desorption statt. Der freiwerdende Wasserdampf wird von der Luftströmung durch das Bett getragen und adsorbiert wieder unter großer Wärmetönung sobald er an unbeladenes Material gelangt in der Mitte des Speichers.

7.2.1 Modellannahmen

Die Ungleichverteilung der Strömung über den Monolithquerschnitt wird in den Modellannahmen nicht berücksichtigt. Vielmehr werden die ablaufenden Prozesse für einen einzelnen repräsentativen Kanal des Monolithen berechnet. Folgende Annahmen bzw. Vereinfachungen werden getroffen:

- Die Querschnittsbelastung und der Druck sind konstant über der Katalysatorlänge.
- Die Gasphase verhält sich ideal.
- Die Strömung im Monolithkanal ist laminar.

Durch Berücksichtigung des hydrodynamischen und thermischen Strömungsanlaufs wird dem

örtlich ungleichmäßigen Wärme- und Stofftransport Rechnung getragen. Die Berechnung der Parameter erfolgt nach [7].

- Die Berechnung der axialen Wärmeleitfähigkeit in der Gas- und Feststoffphase erfolgt nach dem Fourierschen Gesetz.
- In der Gasphase wird die axiale Dispersion der Masse in Anlehnung an das Ficksche Gesetz beschrieben.
- Die Stoffwerte in der Gasphase werden in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet, die Stoffwerte der Feststoffphase sind konstant.
- Das parabelförmige Geschwindigkeitsprofil der laminaren Strömung wird durch die modifizierte Wärmeleitung und Dispersion nach *Taylor* [8] berücksichtigt.
- Die Beschreibung der Adsorptionskinetik ist noch nicht enthalten.
- Der radiale Wärmetransport im Monolithen wird nicht berücksichtigt.

7.3 Bilanzgleichungen

Aus den oben getroffenen Definitionen und Vereinfachungen resultiert ein System partieller Differentialgleichungen in parabolischer Form, mit der die mathematische Beschreibung der physikalischen und chemischen Abläufe des durchströmten Monolithen möglich ist. Das System besteht aus je einer Energiebilanz sowie je einer Massebilanz für die Gas- und die Feststoffphase, sowie einer Gleichung zur Berechnung des Adsorptionsgleichgewichts.

- Energiebilanz der Gasphase:

$$\varepsilon \rho_g c_{p,g} \frac{\partial \vartheta_g}{\partial t} = -G_z c_{p,g} \frac{\partial \vartheta_g}{\partial z} + \varepsilon \lambda_{eff} \frac{\partial^2 \vartheta_g}{\partial z^2} + \alpha_{s,g}(z) a_v (\vartheta_s - \vartheta_g) \quad (7.1)$$

- Energiebilanz der Feststoffphase:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s c_{p,s} \frac{\partial \vartheta_s}{\partial t} = (1 - \varepsilon) \lambda_s \frac{\partial^2 \vartheta_s}{\partial z^2} + \frac{\dot{m}_{ads}}{V} \cdot \Delta h_{ads} - \alpha_{s,g}(z) a_v (\vartheta_s - \vartheta_g) \quad (7.2)$$

- Massebilanz der Komponente H_2O in der Gasphase:

$$\varepsilon \rho_g \frac{\partial w_{H_2O,g}}{\partial t} = -G_z \frac{\partial w_{H_2O,g}}{\partial z} + \varepsilon D_{eff} \frac{\partial^2 w_{H_2O,g}}{\partial z^2} - \dot{m}_{ads} \quad (7.3)$$

- Massebilanz der Komponente H_2O in der Feststoffphase:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial w_{H_2O,s}}{\partial t} = \frac{\dot{m}_{ads}}{V} \quad (7.4)$$

- Adsorptionsgleichgewicht

$$0 = X_{GG,H_2O} - X_{iso} \quad (7.5)$$

7.3.1 Randbedingungen

Die parabolische Form der Gasphasenbilanzen macht für jede Gleichung zwei Randbedingungen erforderlich. Sie werden am Anfang und am Ende des Integrationsbereichs nach *Danckwerts* formuliert und besitzen die allgemeine Form:

- Randbedingung für die Energiebilanz der Gasphase auf der Eintrittseite:

$$G_z c_{p,g} \vartheta_{g,zu} = G_z c_{p,g} \vartheta_g - \varepsilon \lambda_{eff} \frac{\partial \vartheta_g}{\partial z} \quad (7.6)$$

Für die Austrittsseite der Gasphase wie auch für die Ränder der Feststoffphase werden horizontale Tangenten angesetzt.

7.3.2 Beschreibung der Transportgrößen

Eigenberger et al. zeigten, dass durch die allmähliche Ausbildung einer Diffusionsgrenzschicht der Stoffübergang am Kanaleintritt zunächst sehr hoch ist und in Strömungsrichtung stetig auf den Grenzwert der laminaren Strömung abfällt [6]. Diesem Effekt kann bei eindimensionaler Berechnung durch die von *Martin* [9] vorgeschlagene empirische Korrelation Rechnung getragen werden.

$$Nu_{z,\vartheta} = \left[3.66^3 + 0.7^3 + \left(1.077^3 (Re Pr d_h/z)^{1/3} - 0.7 \right)^3 + \left(\frac{1}{2} \left(\frac{2}{1+22Pr} \right)^{1/6} \sqrt{Re Pr d_h/z} \right)^3 \right]^{1/3} \quad (7.7)$$

Damit berechnen sich die ortsabhängigen Wärme- bzw. Stoffübergangskoeffizienten $\alpha(z)$ bzw. $\beta(z)$ zu:

$$\alpha(z) = \frac{Nu_{z,\vartheta} \lambda_g}{d_h} \quad \text{und} \quad \beta_j(z) = \frac{Sh_{z,\vartheta} D_{N_2,j}}{d_h} \quad (7.8)$$

7.3.3 Berechnung des übergehenden Stoffstroms

Bei der Berechnung des übergehenden Stoffstroms wird im ersten Ansatz der Stofftransport aus der Gasphase an die Feststoffoberfläche als geschwindigkeitsbestimmender Schritt angenommen. Diese Annahme ist gerechtfertigt, wenn nur an der Kanaloberfläche adsorbiert wird, was hier natürlich nicht gewünscht ist. Der Stofftransport von der Gasphase an die Wand wird durch den Stoffübergangskoeffizient β_{H_2O} berücksichtigt, dessen Berechnung unter 7.3.2 beschrieben wurde.

Bis zur Erreichung des Gleichgewichtszustands erfolgt ein Stoffstrom in Richtung des Konzentrationsgradienten. Dieser Effekt wird durch folgenden Ausdruck beschrieben:

- momentane Feststoffbeladung

$$X_s = \frac{w_{H_2O,s}}{(1 - w_{H_2O,s})} \quad (7.9)$$

- Berechnung des übergehenden Stoffstroms

$$\dot{m}_{ads} = \frac{\rho_s \cdot \beta_{H_2O}(z) \cdot a_v \cdot (X_{GG,H_2O} - X_s)}{1 + \frac{k}{D_e} \frac{\Delta \zeta}{A}} \quad (7.10)$$

In diesem Ansatz ist die Kinetik des Adsorptionsvorgangs und die Diffusion des Wasserdampfes in die Kanalwand hinein durch einen einfachen Hemmterm wiedergegeben. Im nachfolgenden Abschnitt 7.3.4 wird gezeigt, dass dieser modifizierte "shrinking core"-Ansatz zu guten Annäherung des zeitlichen Verlaufs des Adsorptionsprozesses führt.

7.3.4 Berücksichtigung der Diffusionshemmung

Die Modellvorstellung geht davon aus, dass zunächst die äußersten Adsorptionsplätze an der Oberfläche der Kanalwand belegt werden. Ist die äußere Oberfläche belegt, müssen alle weiteren H_2O -Moleküle in die Wand hineindiffundieren, bis sie zu freiem Speichermedium gelangen und dort ihrerseits freie Plätze belegen können. Dadurch wächst die Dicke der Schicht von außen nach innen immer weiter an und der Diffusionsweg wird zunehmend länger.

Dieser Mechanismus wird durch den "Shrinking-Core-Ansatz" wiedergegeben. Vereinfachend wird angenommen, dass die Adsorptionsfront symmetrisch ins Wandinnere vordringt und sich an der Stelle der Adsorptionsfront eine scharfe Grenzfläche zwischen dem belegten und dem freien Speichermedium ausbildet [10].

Die treibende Kraft für den Diffusionsstrom ins Innere des Speichermediums ist die Konzentrationsdifferenz zwischen der äußeren Oberfläche c_{Of1} und der Grenzfläche c_{Grenz} . Wieviel H_2O -Moleküle an der Grenzschicht adsorbieren, wird von der Adsorptionsgeschwindigkeit und dem Diffusionsstrom bestimmt. Können an der Grenzschicht aufgrund einer hohen Adsorptionsgeschwindigkeit mehr Moleküle angelagert werden als durch Diffusion nachgeliefert werden, wird die Diffusion im Feststoff zum geschwindigkeitsbestimmenden Schritt. Auf eine ausführliche Herleitung des modifizierten "Shrinking-Core-Modells" wird an dieser Stelle verzichtet. Sie kann unter [11] nachgelesen werden.

$$1 + \frac{k}{D_e} \frac{\Delta \zeta}{A} \approx 1 + D_h w_{H_2O(NO_3)_2}^{exp} \quad (7.11)$$

Mit Hilfe des eingeführten Hemmterms, wird in erster Näherung der Einfluss der Diffusion in die Kanalwand hinein über die Zunahme der gebildeten Adsorbatschicht beschrieben, wobei die unbekanntenen Koeffizienten D_h und exp als anzupassende Parameter zur Verfügung stehen.

Dieser Ansatz wurde in das Modell implementiert und die freien Parameter mit Hilfe einer Adsorptionsmessung an einer Monolith-Probe angepasst. Hier wurde in einen kleinen Strömungskanal ein Monolith eingesetzt und mit feuchter Raumluft durchblasen. Am Ein- und Austritt des Monolithen wurde die Temperatur und Feuchte der Luft gemessen. Fünf Thermoelemente wurden in den Monolithen eingeschoben um ein örtliches Temperaturprofil im Monolithen aufzunehmen. Für die Bestimmung der freien Parameter wurde eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen simulierter und gemessener Gasaustrittstemperatur angestrebt. Abbildung 7.2 zeigt das Ergebnis der Anpassung. Im oberen Bild sind die gemessene und die simulierte Austrittstemperatur über der Versuchsdauer dargestellt.

Das untere Bild zeigt für vier verschiedene Zeitpunkte die simulierten Temperaturprofile des Feststoffs im Inneren des Monolithen im Vergleich mit den durch die fünf Thermoelemente im Inneren gemessenen Temperaturen. Auch hier wird eine bemerkenswerte Übereinstimmung erzielt. Dabei muss bedacht werden, dass die von den Thermoelementen gemessenen Temperaturen nicht exakt zugeordnet werden können. Die Thermoelemente haben einen Durchmesser von 0,5 mm. Es ist anzunehmen, dass sie durch das Einschleiben in jeweils einen Kanal die Kanalwand berühren und somit eine Mischung aus Feststofftemperatur und Gastemperatur messen.

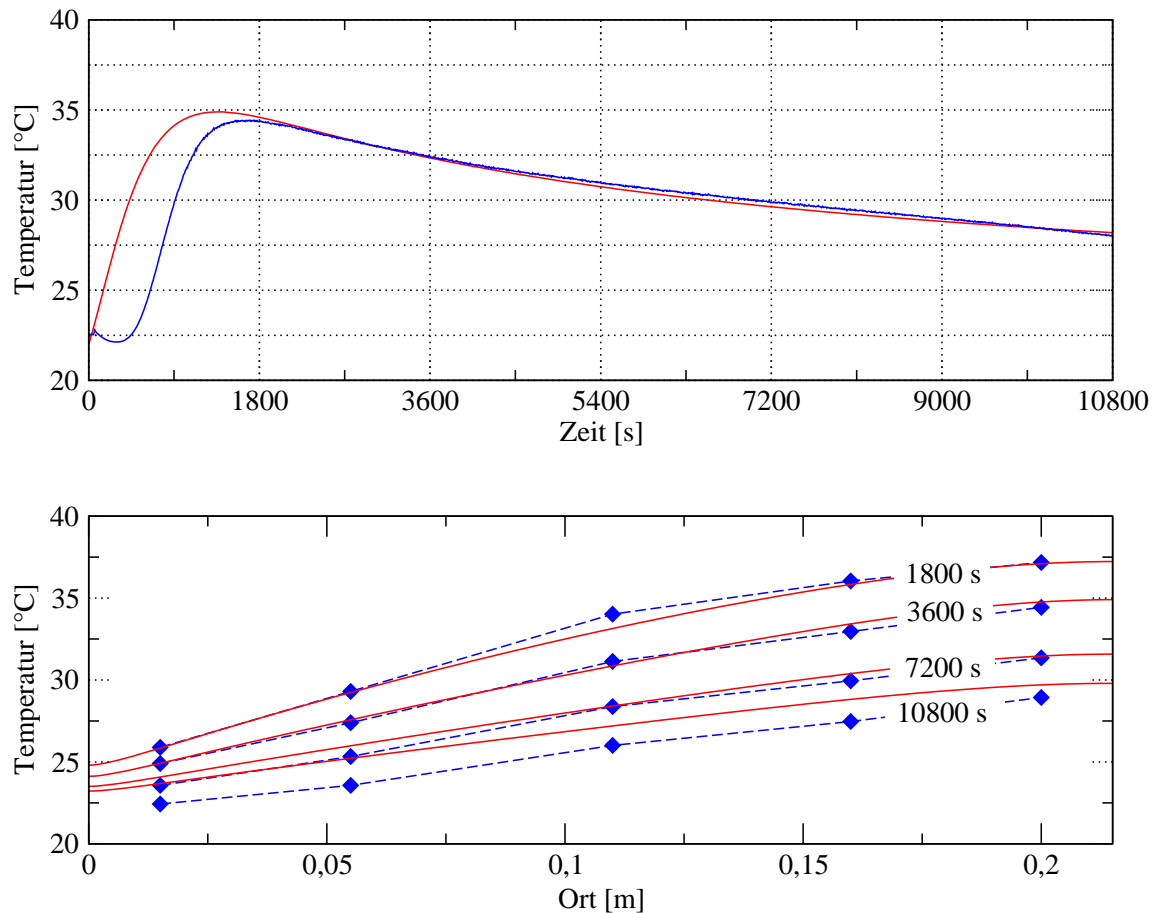


Abb. 7.2: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturprofile. Bild oben: zeitlicher Verlauf der Austrittstemperatur, Bild unten: Temperaturprofile im Monolithen zu verschiedenen Zeitpunkten

7.3.5 Bestimmung des Adsorptionsgleichgewichts X_{GG,H_2O}

Der Zeolith 4A ist typischer Zeolith zur Adsorption von Wasserdampf. Er wird von zahlreichen Firmen kommerziell angeboten. Abbildung 7.3 zeigt Adsorptionsisothermen für den Typ 4A-8/2 (Messdaten vom Hersteller Uetikon).

Adsorptionsisothermen diese Typs lassen sich durch einen einfachen Langmuir-Ansatz folgender Form mit genügender Genauigkeit angepasst:

$$X_{GG} = X_{max}(T) \cdot \frac{b_T \cdot \phi}{1 + b_T \cdot \phi} \quad (7.12)$$

$$X_{max}(T) = X_{max} - a \cdot T_{Gas} \quad (7.13)$$

$$b_T = b_0 \cdot e^{\frac{k}{T_{Gas}}} \quad (7.14)$$

$$\phi = \frac{p_{H_2O}}{p_s} \quad (7.15)$$

Für die in Abbildung 7.3 gezeigten Adsorptionsisothermen wurden die benötigten Parameter ermittelt.

$$a = 0,0120 \quad (7.16)$$

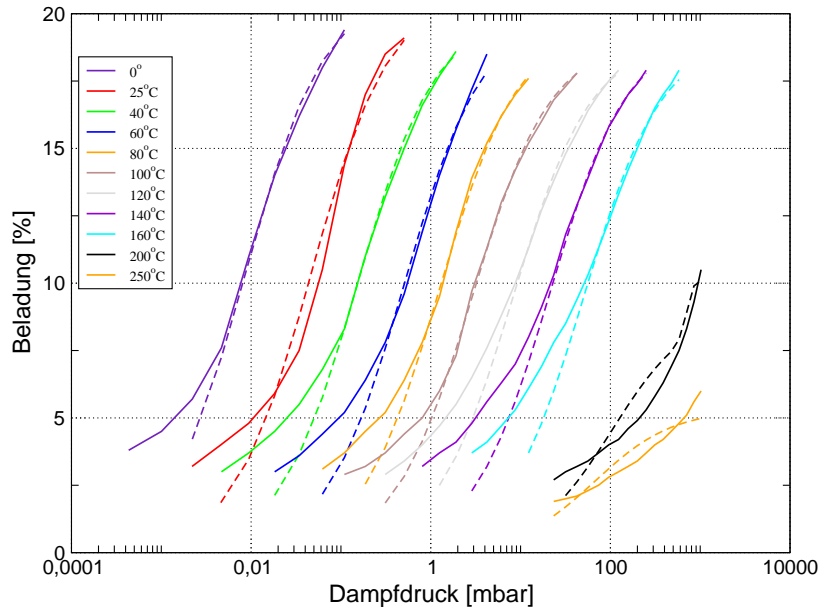


Abb. 7.3: Adsorptionsisothermen für Zeolith 4A. Durchgezogene Linien: Messdaten vom Hersteller, gestrichelte Linien: Anpassung

$$b_0 = 19,53 \quad (7.17)$$

$$k = 1000,9 \quad (7.18)$$

$$X_{max} = 23,96 \quad (7.19)$$

Es zeigt sich, dass in weiten Bereich eine gute Übereinstimmung erzielt wird.

Aus Abbildung 7.3 ist zu erkennen, dass die Isothermen für die Temperatur von 200°C und 250°C ihren typischen Verlauf ändern. Dies führt dazu, dass der verwendete Langmuir-Ansatz in diesem Temperaturbereich nicht mehr geeignet ist, das Adsorptionsgleichgewicht richtig wiederzugeben.

7.3.6 Bestimmung der mittleren Adsorptionsenthalpie $\Delta\bar{h}_{ads}$

Neben der Berechnung des Adsorptionsgleichgewichts ist die Bestimmung der Adsorptionsenthalpie notwendige Voraussetzung zur Berechnung der während des Adsorptionsvorgangs freiwerdenden Wärme (vgl. 5.4). Der Hersteller des verwendeten Zeolithpulvers gibt eine maximale Adsorptionsenthalpie von ca. 4200 kJ/kg_{ads} an. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Bindungsenthalpie mit steigender Beladung abnimmt.

Im Rahmen der Modellierung wurde auf eine beladungsabhängige Adsorptionsenthalpie verzichtet und stattdessen eine mittlere Adsorptionsenthalpie $\Delta\bar{h}_{ads}$ eingesetzt. Diese wurde aus experimentellen Untersuchungen an den verwendeten Monolithen bestimmt. Die Berechnung der Wärmetönung über eine mittlere Adsorptionsenthalpie ist hier gerechtfertigt, da wie die Abbildungen 6.2 und 6.3 zeigen, eine steile Adsorptionsfront durch das Bett wandert und das Adsorbens vollständig bis zur Sättigung beladen wird. Der experimentell ermittelte Wert beträgt:

$$\Delta\bar{h}_{ads} = 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (7.20)$$

7.4 Simulation des Gebäudes inkl. Kombianlage mit TRNSYS

Das Gebäude wird durch ein Dreizonenmodell abgebildet. Die Differenzierung in eine Süd- und eine Nordzone berücksichtigt das unterschiedliche thermische Verhalten aufgrund unterschiedlicher solarer Einstrahlung. Mit Ausnahme der Fensterflächen (Süd: 10 m^2 und Nord: 3 m^2) sind die Zonen symmetrisch aufgebaut. Die Luftwechselrate des Gebäudes von insgesamt $0,6 \frac{1}{h}$ (entspricht $192 \text{ m}^3/h$) wird aufgeteilt in $0,2 \frac{1}{h}$ freie Lüftung (Fugen, Fenster, Türen) und $0,4 \frac{1}{h}$ kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung. Nach oben wird das Gebäude durch eine dritte Zone, das Dach, abgeschlossen. Die Dachzone ist ebenfalls mit einer Luftwechselrate von $0,6 \frac{1}{h}$ belüftet, wird jedoch nicht beheizt. Um ein realistisches Heizungsverhalten nachzuempfinden, werden die Nord- und die Südzone über eine Radiatorheizung auf eine Solltemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ beheizt. Die witterungsgeführte Heizungsregelung wird über zwei PID-Regler realisiert. Der Gesamtwärmebedarf für Raumheizung und Trinkwarmwasser, inkl. Speicherverluste beträgt 7924 kWh pro Jahr.

Für das Gebäude mit Standort Würzburg und vier Bewohnern ergibt sich folgender Wärmebedarf:

Wärmebedarf [kWh/a]			
Trinkwasser	Raumheizung		gesamt
	Transmission	Lüftung	
1600	2954	5907	10470

Genauere Angaben zum Gebäude sind [12] zu entnehmen. Der Einbau der kontrollierten Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung = 90%) führt zu einer Verminderung des Wärmebedarfs für Raumheizung um ca. 3410 kWh/a auf 5680 kWh/a . Dies entspricht einer Einsparung von 37,5%.

Damit berechnet sich die aufzubringende Gesamtheizwärme Q_{conv} (Raumheizung und Trinkwarmwasser) einer konventionellen Heizungsanlage zu:

$$Q_{conv} = Q_{d,HW} + Q_{d,SH} + Q_{conv,loss} \quad (7.21)$$

$$7924 = 5680 + 1600 + 644 \quad \text{kWh/a} \quad (7.22)$$

Die anteilige jährliche Energieeinsparung durch die Solaranlage berechnet sich damit wie folgt:

$$f_{sav} = \frac{Q_{conv} - Q_{aux}}{Q_{aux}} \quad (7.23)$$

Darin ist Q_{aux} die Wärmemenge, die unter Einbindung der Solaranlage noch von der Nachheizung zu decken bleibt.

7.5 Beschreibung der Kombianlage

Die Kombianlage, die in das Referenzgebäude integriert ist, entspricht einer Anlage mit Schichtspeicher und externem Wärmeübertrager zur Trinkwassererwärmung wie sie im Projekt "Kombianlagen" [13] definiert wurde.

Der Speicher hat ein Volumen von 1 m^3 . Es werden hocheffiziente Vakuumröhren-Kollektoren mit

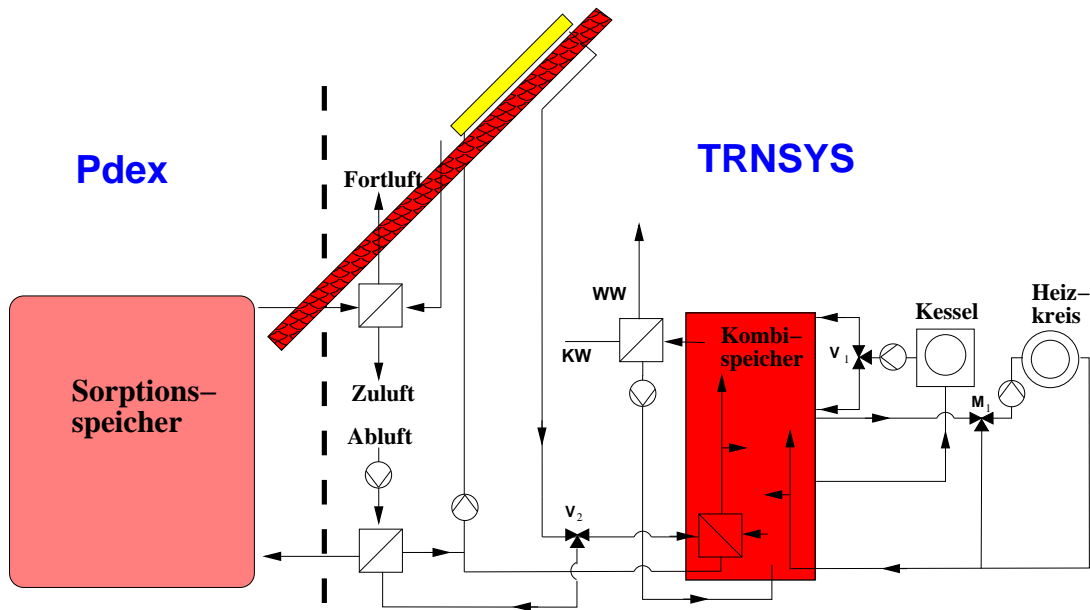


Abb. 7.4: Schematische Darstellung der Kombianlage mit Sorptionspeicher

CPC-Reflektor verwendet, um bei den benötigten hohen Temperaturen zur Desorption des Sorptionspeichers (ca. 170°C) noch gute Wirkungsgrade zu erzielen. Der Kollektorkreis wird mit $12 \text{ l}/(\text{h m}^2_{\text{coll}})$ durchströmt.

Genauere Angaben zur Kombianlage können [13] entnommen werden.

In den Sommermonaten außerhalb der Heizperiode dient die Kombianlage zur Erwärmung des Trinkwassers. Ist das Bereitschaftsvolumen des Kombispeichers bis auf 80°C erwärmt (was bei der großen Kollektorfläche recht schnell geht), würde die Solaranlage normalerweise abschalten und keine Energie mehr liefern. In der hier realisierten Verschaltung wird nun der Kollektorkreis zur Regeneration des Sorptionspeichers verwendet.

Die Beladung des Kombispeichers durch die Solaranlage wird bei Erreichen einer Temperatur im Bereitschaftsteil von 80°C abgeschaltet und erst wieder eingeschaltet, wenn die Temperatur auf 70°C abgesunken ist. In der Zwischenzeit steht nun die Solaranlage zur Regeneration des Sorptionspeichers zur Verfügung. Dazu wird zunächst der Kollektorkreis im Kurzschluss gefahren, das heißt, der Luft/Wasser-Wärmeübertrager wird wasserseitig durchströmt bis die Kollektoraustrittstemperatur 125°C erreicht hat. Dann wird auf der Luftseite des Wärmeübertragers mit einem variablen Volumenstrom ($\dot{V}_{\text{max}} = 400 \text{ m}^3/\text{h}$) von vorgewärmter Umgebungsluft durchströmt. Die heiße Austrittsluft steht dem Sorptionspeicher zur Regeneration zur Verfügung. Dabei wird der Luftvolumenstrom auf eine Zieltemperatur von 160°C geregelt. Der Luft/Luft-Wärmeübertrager dient zur Vorwärmung der angesaugten Umgebungsluft.

7.6 Koppelung von TRNSYS und PDEX

Die beiden oben beschriebenen Teilsysteme sind über den Abluftstrom des Gebäudes und dem aus dem Sorptionsbett austretenden, erwärmten Luftstrom miteinander gekoppelt.

Zur Berechnung des Heizenergieaufwands benötigt TRNSYS die Information, mit welcher Temperatur (Austrittstemperatur des Sorptionsbettes) der Abluftstrom dem Wärmeübertrager der Wärmerückgewinnungsanlage zugeführt wird. Um dies zu berechnen benötigt PDEX wiederum die Information aus der TRNSYS-Simulation mit welcher Temperatur und Feuchte und mit welchem Massenstrom die Ab-

luft in den Sorptionsspeicher eintritt.

Die Kopplung der beiden Programme besteht in einer sequentielle Simulation der beiden Teilsysteme. Zunächst wird eine TRNSYS-Simulation ohne die zusätzliche Aufheizung des Abluftstroms durch das Sorptionsbett durchgeführt. Die für die PDEX-Simulation benötigten Eintrittswerte in den Sorptionsspeicher, Temperatur, Massenstrom und relative Feuchte werden berechnet und in einen Datenfile geschrieben. In einer anschließenden PDEX-Simulation werden diese Zulaufbedingungen eingelesen. Die Austrittstemperatur aus dem Sorptionsspeicher wird berechnet und ebenfalls in einen Datenfile geschrieben. In einem zweiten TRNSYS-Run kann nun mit realistischen Eintrittstemperaturen in den Wärmeübertrager der Wärmerückgewinnung gerechnet werden und die Energieeinsparung durch die Verwendung des Sorptionsspeichers ermittelt werden. Die Zulaufbedingungen für den Sorptionsspeicher ändern sich dabei während der Heizungsperiode (Winter) nicht. Lediglich der Heizenergiebedarf des Gebäudes verringert sich. Da die Zulaufbedingungen des Sorptionsspeichers während der Regenerationsphase (Sommer) über eine Vorwärmung des angesaugten Luftstroms auch von der Austrittstemperatur des Sorptionsspeicher beeinflusst werden, ist eine weitere Iterationsschleife der beiden Simulationsschritte notwendig. Auf diese Weise gelingt eine einfache Koppelung der beiden Simulationsprogramme, die genaue Ergebnisse liefert.

Mit dem dargestellten Verfahren kann das thermische Verhalten des Gesamtsystems, bestehend aus Gebäude mit mechanischer Belüftung und Wärmerückgewinnung, solarer Kombianlage und Sorptionswärmespeicher wiedergegeben werden. Nur durch die geschlossene Simulation des Gesamtsystems können die dynamischen Effekte, die durch die Kopplung der Teilsysteme entstehen korrekt bewertet werden.

7.7 Untersuchung der Regelparameter zur Regeneration des Sorptionswärmespeichers

In der nachfolgenden Parametervariation werden die Einflüsse der wichtigsten Regelparameter auf das Regenerationsverhalten (Desorption) des Sorptionswärmespeichers (SWS) untersucht. Zwei Indikatoren werden zur Bewertung der Regeneration herangezogen: Die im System umgesetzten Wärmemengen und die Restbeladung des Sorptionswärmespeichers am Ende der Desorptionsphase.

Die Randbedingungen der Systemsimulation sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Kollektordaten	
Kollektorfläche:	20 m ²
Anstellwinkel:	45°
Azimuthwinkel:	0°
Massenstrom:	12 kg/m ² _{coll} h
Zusatzheizung	
max. Leistung	15 kW
Warmwasserspeicher	
Volumen	1 m ³
Klima	
Wetterdaten	Würzburg
Brauchwasser	
täglicher Warmwasserverbrauch	200 l/d
Warmwasser Soll-Temperatur	45 °C
durchschnittliche Kaltwassertemperatur	10 °C
Desorptionsluftstrom	
max. Luftmassenstrom	400 kg/h
Lüftung	
Luftwechselrate (gesamt)	0,6 1/h
Luftwechselrate (kontrolliert)	0,4 1/h
Luftwechselrate (Freilüftung)	0,2 1/h
Gebäude	
Wohnfläche	128 m ²
Gebäudevolumen	320 m ³
Heizung	
Vorlauf-/Rücklauf-Temperatur:	50 / 30 °C
Heizperiode:	1.Sep. bis 1.Juni
Sorptionswärmespeicher	
Form	zylindrisch
Höhe (Strömungslänge)	2,5 m
Durchmesser	2 m
Volumen	7,85 m ³
Nutzungsperiode	1.Dez. bis 1.Juni

Tab. 7.1: Randbedingungen Trnsys-Deck

7.7.1 Regelungen

Im Laufe eines Betriebsjahres der Anlage werden verschiedene Zustände der Systemverschaltung durchlaufen, die in Abbildung 7.5 dargestellt sind. Nicht aktive Bauteile, bzw. Leitungsführungen sind gestrichelt dargestellt.

- **Typ I:** Lüftungsschaltung bei Heizungsunterstützung während der Nutzungsperiode des Sorptionswärmespeichers (SWS).
- **Typ II:** Lüftungsschaltung bei Heizungsunterstützung außerhalb der Nutzungsperiode des Sorptionswärmespeichers.
- **Typ III:** Kurzschluss des Solarkreislaufs während der Nutzungsperiode des Sorptionswärmespeichers.
- **Typ IV:** Kurzschluss des Solarkreislaufs außerhalb der Nutzungsperiode des Sorptionswärmespeichers.
- **Typ V:** Lüftungsschaltung bei Regeneration des SWS während der Heizperiode
- **Typ VI:** Lüftungsschaltung bei Regeneration des SWS außerhalb der Heizperiode

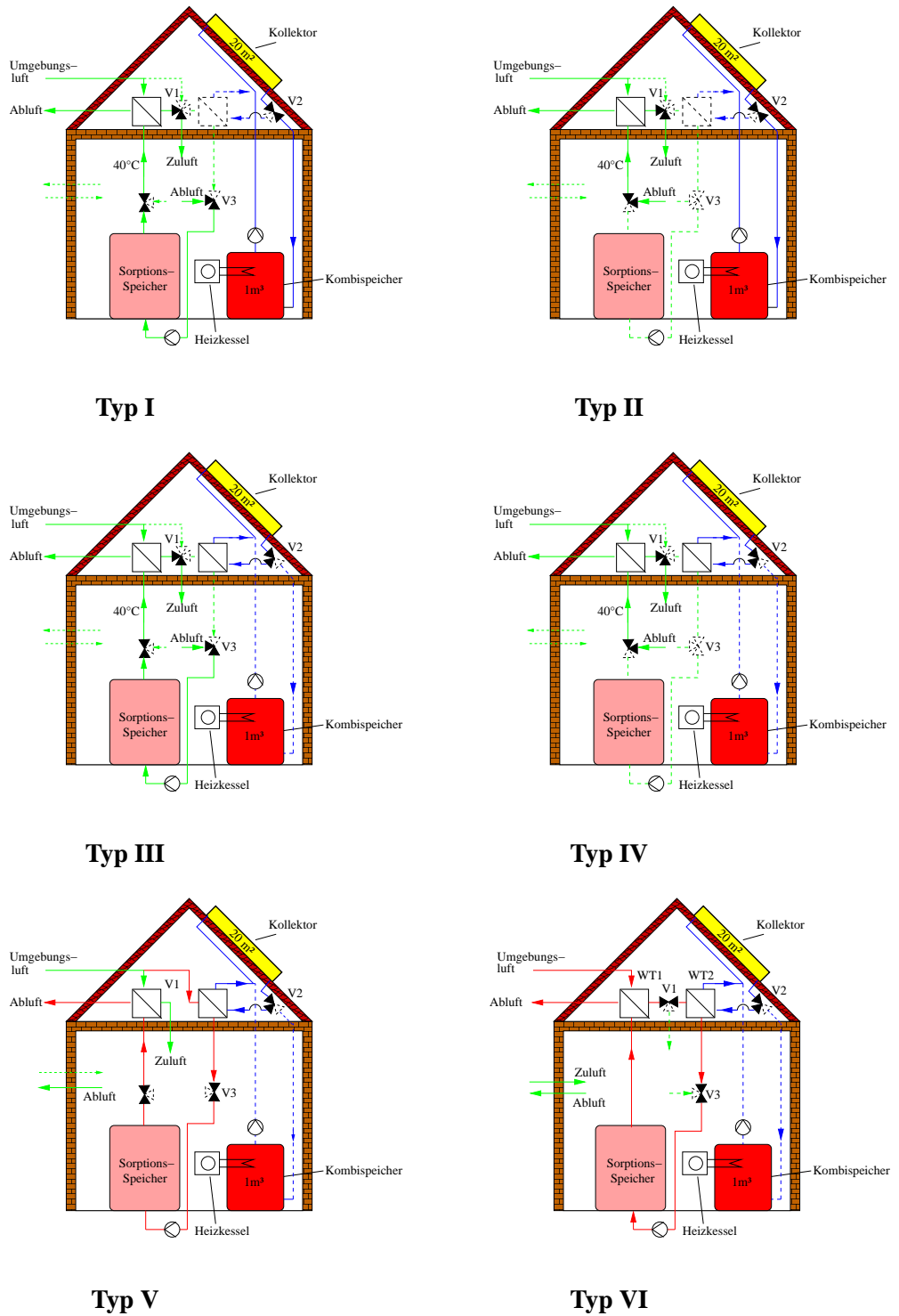


Abb. 7.5: Verschiedene Lüftungsschaltungen während einer Jahressimulation

Die Nutzungsphase des Sorptionswärmespeichers ist der Zeitraum, in der dem Speicher feuchte Raumluft zugeführt wird und die Adsorptionswärme zu Heizzwecken genutzt wird. Dieser Zustand findet während der Heizperiode statt, ist jedoch, in Abhängigkeit von der Größe des Sorptionswärmespeichers, kurzer als die Heizperiode.

Höchste Priorität in der Systemregelung hat die Wärmebelastung des Kombispeichers. Solange dieser seine maximale Solltemperatur ϑ_{sto} nicht erreicht hat, wird die Solaranlage ausschließlich zur Beladung des Kombispeichers eingesetzt (Typ I+II).

Sobald der Kombispeicher beladen und der Kreislauf Solarkollektor-Kombispeicher abgeschaltet ist, läuft die Solaranlage im "Kurzschluss". Diese Zustände werden in Abbildung 7.5, Typ III und IV dargestellt. Sie entsprechen den Schaltungen Typ I+II mit dem Unterschied, dass der Kollektor nicht den Kombispeicher speist sondern über den auf der Luftseite undurchströmten Luft/Wasser-Wärmeübertrager geleitet wird, bis zur Erreichung der Temperatur ϑ_{ein} , ab der in den Desorptionsmodus umgeschaltet wird.

Überschreitet die Kollektorausstrittstemperatur die Mindesttemperatur (ϑ_{ein}), wird der Luftmassenstrom für die Regeneration des Sorptionswärmespeichers eingeschaltet. Während der Desorptionsphase wird der Luftmassenstrom zwischen 120 kg/h und dem Maximalwert $\dot{m}_{des,max} = 400 \text{ kg/h}$ auf die Solltemperatur (ϑ_{PID}) geregelt.

Wenn die Solarstrahlung abnimmt und die Kollektorausstrittstemperatur unter den Wert (ϑ_{aus}) sinkt, wird der Desorptionsluftmassenstrom wieder abgeschaltet.

Alle Schaltungen orientieren sich an einer bestmöglichen Heizungsunterstützung. Während der Heizperiode wird folglich stets der Luftstrom mit der höchsten Temperatur dem Wärmerückgewinnungs-Wärmeübertrager zugeführt. Im Fall der Regeneration während der Heizperiode wird die Raumzuluft durch die Regenerationsabluft (nach Austritt aus dem Sorptionswärmespeicher) erhitzt. Im Sommer hingegen ist keine Heizungsunterstützung notwendig und es wird die Wärme der Desorptionsabluft für eine Vorheizung der verwendeten Desorptionszuluft genutzt.

7.7.2 Begriffsdeklarationen

Folgende Parameter werden im folgenden variiert:

- ϑ_{ein} : Kollektorausstrittstemperatur, bei deren Überschreiten die Lufterhitzung für die Desorption beginnt.
- ϑ_{PID} : Regeltemperatur, auf die die Lufttemperatur während der Desorption am Sorptionswärmespeichereintritt geregelt wird.
- ϑ_{aus} : Kollektorausstrittstemperatur, bei deren Unterschreiten die Lufterhitzung für die Desorption abgeschaltet wird.
- ϑ_{sto} : Obere Speichertemperatur, bei deren Überschreiten der Kombi-Speicher nicht mehr weiter geladen wird.
- η_{HX} : Wirkungsgrad des Luft/Wasser-Wärmeübertragers

Folgende Auswirkungen werden in der Auswertung erwähnt:

- $Q_{sol,Kombi}$: Solare Beladung des Kombispeichers: Jahressumme der dem Kombispeicher zugeführten solaren Wärme.

- $Q_{aux,Kombi}$: Jahressumme der dem Kombispeicher zugeführten Wärme von der Nachheizung (Heizkessel).
- $Q_{SWS+WRG}$: Jahressumme des dem Gebäude durch die Wärmerückgewinnung und den Sorptionswärmespeicher zugeführten Wärme.
- Q_{col} : Jahressumme der vom Solarkollektor abgegebenen Nutzwärme.
- Restbeladung: Wasserbeadung in Gew-% des Sorptionswärmespeichers nach Abschluss der Regenerationsphase.

7.7.3 Ausgangskonfiguration

Als Einstellgrößen für die Referenzsimulation wurden folgende Zahlenwerte verwendet:

- $\vartheta_{PID} = 160^{\circ}C$
- $\vartheta_{ein} = 125^{\circ}C$
- $\vartheta_{aus} = 75^{\circ}C$
- $\vartheta_{sto} = 80^{\circ}C$
- $\eta_{HX} = 90\%$

Diese vier Temperaturen, sowie der Wirkungsgrad des Wärmeübertragers wurden im Folgenden einer Parametervariation unterzogen und die Ergebnisse bezüglich der Referenzsimulation verglichen.

7.7.4 Regeltemperatur ϑ_{PID}

Die Regeltemperatur wurde zwischen 140 und 200°C in 20 K Schritten variiert.

Auswirkungen auf die Jahres-Wärmemenge

Abbildung 7.6 zeigt die Jahres-Wärmemenge eines Referenzjahres bei Variation von ϑ_{PID} . Dargestellt wird die solare Beladung des Kombispeichers ($Q_{Kombi,sol}$), die notwendige Nachheizwärme ($Q_{Kombi,aux}$) sowie die über die Wärmerückgewinnungsanlage der Gebäudezuluft zugeführte Wärme ($Q_{SWS+WRG}$, inklusive Adsorptionswärme). Abbildung 7.6-a) zeigt dies in absoluten Werten. Abbildung 7.6-b) setzt sie in Relation zur Ausgangskonfiguration.

Die Abbildung verdeutlicht, dass bei einer höheren Regeltemperatur die Wärmerückgewinnungsanlage dem Gebäude weniger Wärme zuführt. Zur Deckung des Heizwärmebedarfs muss somit mehr Wärme aus dem Kombispeicher entnommen werden und die Nachheizenergie $Q_{aux,kombi}$ steigt.

Der geringere Kollektorumsatz resultiert daraus, dass der Kollektor bei höheren Temperaturen betrieben wird und sich somit dessen Wirkungsgrad verschlechtert. Ausserdem verringert sich die Betriebszeit durch die höhere Regeltemperatur.

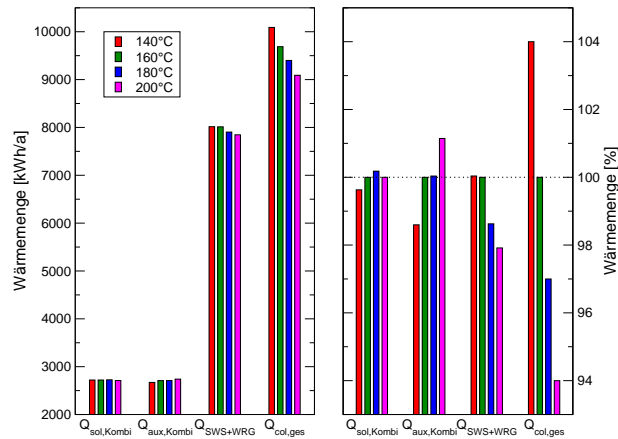


Abb. 7.6: Wärmeverbrauch bei Variation von ϑ_{PID}

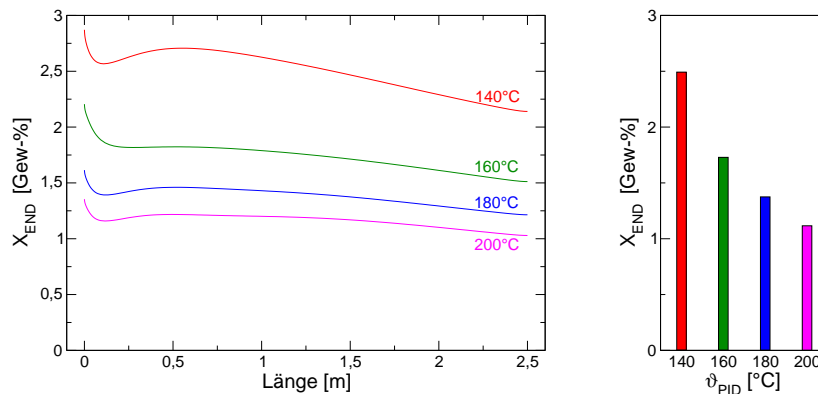


Abb. 7.7: Restbelastung bei Variation von ϑ_{PID}
 a) Verlauf der Restbelastung über der Länge des SWS
 b) Gesamt-Restbelastung des Sorptionswärmespeichers

Auswirkungen auf die Restbelastung

Die Auswirkungen auf die Beladung ist in Abbildung 7.7 dargestellt.

Abbildung 7.7 a) zeigt den örtlichen Verlauf der Beladung über der Zeit am Ende der Desorptionsphase (1. Dezember). In Abbildung 7.7 b) wurden durch Integration aus den Kurven in a) die Gesamt-Restbelastung bestimmt.

Es wird erkennbar, dass durch eine höhere Regeltemperatur eine geringere Restbelastung bestehen bleibt. Im Weiteren ist eine nicht proportionale Abnahme festzustellen.

7.7.5 Obere Kollektorausstrittstemperatur ϑ_{ein}

Die Kollektorausstrittstemperatur, ab der der Desorptions-Luftkreislauf aktiviert wird, wurde zwischen 85 und 145°C in 20 Kelvin-Schritten variiert.

Auswirkungen auf die Jahres-Wärmemenge

Abbildung 7.8 zeigt den Jahres-Wärmeumsatz des Gebäudes. Es ist keine ausgeprägte Tendenz zu erkennen. Die Schwankungen liegen meist innerhalb einem Prozentpunkt, lediglich der Wärmeumsatz in der Wärmerückgewinnungsanlage nimmt bei einer Einschalttemperatur von 145°C stärker ab. Es ist jedoch eine Abnahme der Kollektornutzwärme bei höheren Einschalttemperaturen erkennbar. Da die Abhängigkeiten sehr schwach sind, wurde von einer weiteren Untersuchung abgesehen.

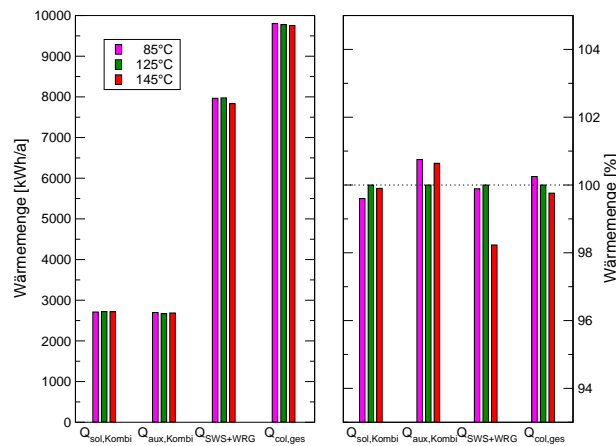


Abb. 7.8: Wärmeverbrauch bei Variation von ϑ_{ein}

Auswirkungen auf die Restbeladung

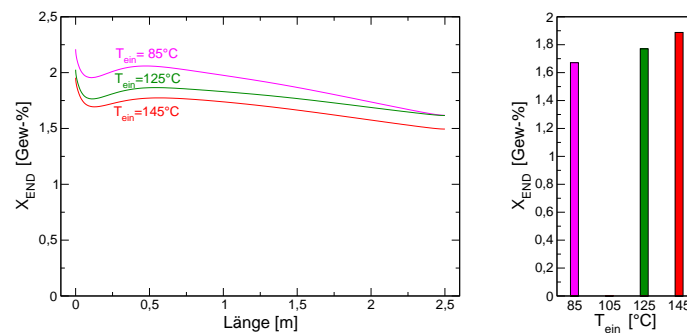


Abb. 7.9: Restbeladung bei Variation von ϑ_{ein}
 a) Verlauf der Restbeladung über der Länge des SWS
 b) Gesamt-Restbeladung des Sorptionswärmespeichers

Diagramm 7.9 zeigt eine schwach ausgeprägte, jedoch vorhandene Tendenz. Geringere Einschalttemperaturen verringern die Restbeladung. Im Vergleich zur Variation der Reglertemperatur ist dieser Effekt jedoch deutlich geringer.

7.7.6 Untere Kollektorausstrittstemperatur ϑ_{aus}

Die Regeltemperatur, unterhalb der der Desorptions-Luftkreislauf deaktiviert wird, wurde zwischen 75 und 135°C in 20 Kelvin-Schritten variiert.

Auswirkungen auf die Jahres-Wärmemenge

Abbildung 7.10 zeigt den Jahres-Wärmeumsatz des Gebäudes bei Variation von ϑ_{aus} . Eine Tendenz ist erkennbar. Eine hohe Ausschalttemperatur verursacht einen geringeren Wärmeumsatz der Rückgewinnungsanlage inklusive Adsorptionswärme. Die benötigte Heizwärme wird somit durch eine erhöhte solare Speisung der Kombianlage und durch Zusatzheizung ausgeglichen. Der Kollektor liefert bei höheren Ausschalttemperaturen weniger Wärme.

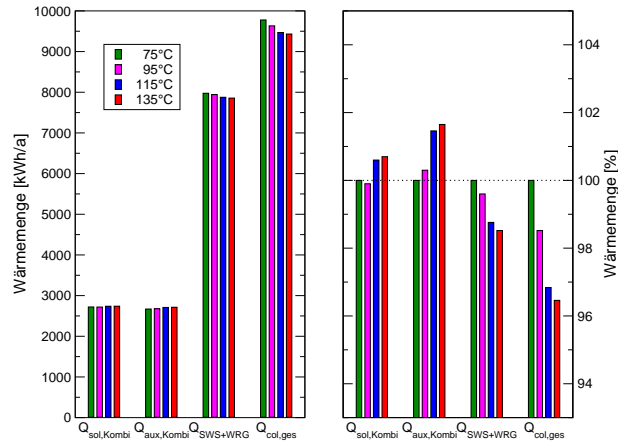


Abb. 7.10: Wärmeverbrauch bei Variation von ϑ_{aus}

Auswirkungen auf die Restbelastung

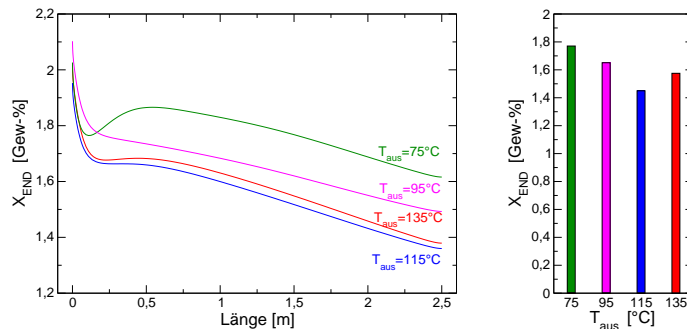


Abb. 7.11: Restbelastung bei Variation von ϑ_{aus}
 a) Verlauf der Restbelastung über der Länge des SWS
 b) Gesamt-Restbelastung des Sorptionswärmespeichers

Bei Ausschalttemperaturen unterhalb 115°C zeigt Abbildung 7.11 eine Tendenz. Niedrigere Ausschalttemperaturen resultieren in einer höheren Restbelastung. Die Abweichung der Simulation mit einer Ausschalttemperatur von 135°C erklärt sich einerseits durch die geringere Differenz zwischen PID-Regeltemperatur und Ausschalttemperatur, was negative Auswirkungen auf die Regelung hat. Zum Anderen im Vorhandensein eines Optimums zwischen dem Temperaturniveau der in den Sorptionswärmespeicher eingebrachten Luft und der Desorptionsdauer. Das mittlere Temperaturniveau sinkt bei geringerer Ausschalttemperatur, was einen negativen Einfluss auf die Desorption hat. Zum anderen steigt die Dauer der Desorptionsphase, da die Solaranlage

länger Wärme für die Desorption liefern kann. Diese gegenläufigen Effekte machen die Existenz eines Optimums bezüglich der Ausschalttemperatur deutlich.

7.7.7 Obere Speichertemperatur ϑ_{sto}

Die maximale Kombispeichertemperatur, oberhalb der die solare Beladung des Kombispeichers abgeschaltet wird, wurde zwischen 60 und 90°C in 10 Kelvin-Schritten variiert.

Auswirkungen auf die Jahres-Wärmemenge

Abbildung 7.12 zeigt den Jahres-Wärmeumsatz des Gebäudes bei Variation von ϑ_{sto} .

Eine höhere maximale Kombispeichertemperatur resultiert in einer stärkeren Nutzung der Solaranlage zur Beheizung des Kombispeichers. Die Wärmerückgewinnung liefert etwas weniger Wärme an das Gebäude. Wesentlich ist jedoch, dass sich die zusätzlich benötigte Nachheizwärme verringert. Die im Kollektor umgesetzte Energie bleibt in etwa konstant.

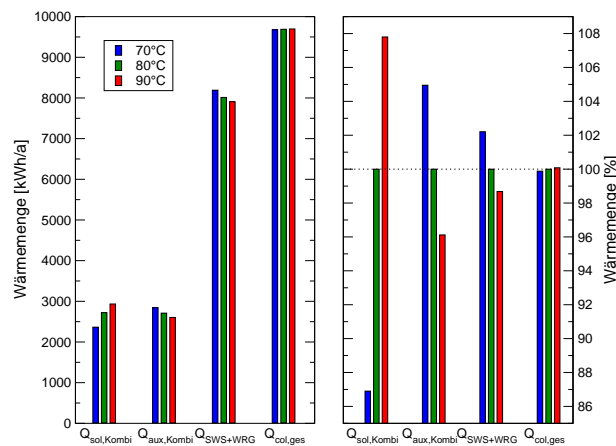


Abb. 7.12: Wärmeverbrauch bei Variation von ϑ_{sto}

Auswirkungen auf die Restbeladung

Diagramm 7.13-a) zeigt eine Abhängigkeit der Restbeladung im Sorptionswärmespeichers von der maximalen Kombispeichertemperatur. Eine Erhöhung der maximalen Kombispeichertemperatur führt zu einer höheren Beladung am Ende der Desorptionsphase. Die Einflüsse sind jedoch gering.

7.7.8 Wirkungsgrad des Luft/Wasser-Wärmeübertragers

Es werden lediglich die Ergebnisse einer ersten TRNSYS-Simulation ausgewertet. Es ist zu beachten, dass somit die veränderte Wärmerückgewinnung durch die Parametervariation des Wirkungsgrades nicht berücksichtigt wird.

Eine darauffolgende zweite TRNSYS-Simulation scheiterte aufgrund des Konvergenzverhaltens des in TRNSYS integrierten PID-Reglers (Type 120). Mit den Eingangsdaten einer vorhergehenden PDEX-Simulation mit einem geringeren Wirkungsgrad als 90% konvergiert der Regler in der TRNSYS-Simulation nicht mehr.

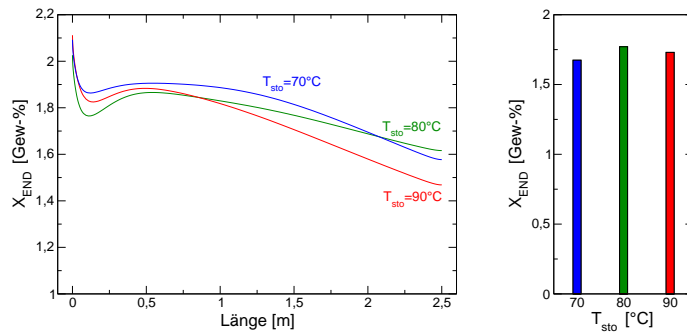


Abb. 7.13: Restbeladung bei Variation von ϑ_{sto}
 a) Verlauf der Restbeladung über der Länge des SWS
 b) Gesamt-Restbeladung des Sorptionswärmespeichers

Auswirkungen auf die Jahres-Wärmemenge

Abbildung 7.14 zeigt die vom Kollektor an den Desorptions-Luft-Kreislauf abgegebene Wärme des Wärmeübertragers (WT2).

Es wird deutlich, dass die Verringerung der übertragene Wärme nicht proportional zum Wirkungsgrad

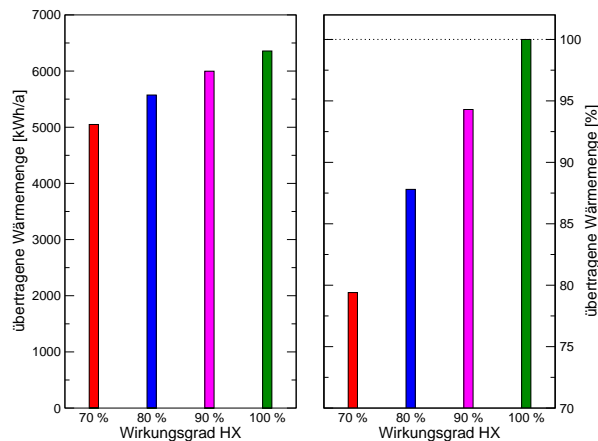


Abb. 7.14: Wärmeverbrauch bei Variation von η_{HX}

des Wärmeübertragers ist. Dies kann zwei Gründe haben:

Zum Einen verwendet die TRNSYS-Simulation die Sorptionswärmespeicher-Austrittsdaten der Ausgangskonfiguration. Somit werden der Wärmerückgewinnungsanlage diese Daten zugeführt und es wird in der ersten Simulation nicht die wahre Wärme rückgewonnen.

Zum Zweiten ist es möglich, dass die Temperatur-Regelung des Desorptions-Luft-Kreislaufes einen Einfluss auf die angeforderte Wärme und zudem auf das Temperaturniveau des Kollektors ausübt.

Die Zusammenhänge können komplex sein und sind am Besten mit weiteren Simulationen zu klären.

Auswirkungen auf die Restbeladung

Abbildung 7.15 zeigt die Restbeladung am Ende der Desorptionszeit. Es ist zu erkennen, dass ein geringerer Wirkungsgrad eine höhere Restbeladung verursacht. Eine Tendenz ist gut zu erkennen. Der Einfluss der Variation des Wirkungsgrades auf die Restbeladung ist in einer gleichen Größenordnung wie der Einfluss der PID-Regeltemperatur.

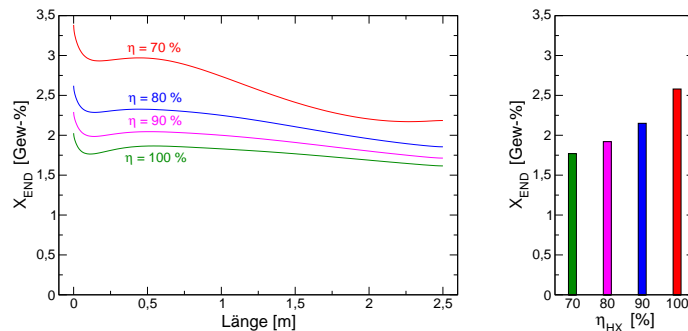


Abb. 7.15: Restbeladung bei Variation von η_{HX}
 a) Verlauf der Restbeladung über der Länge des SWS
 b) Gesamt-Restbeladung des Sorptionswärmespeichers

7.8 Schlussfolgerung der Parametervariation

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Einflüsse der Ein- und Ausschalttemperatur des Desorptionszyklusses (ϑ_{ein} , ϑ_{aus}) auf die Heizungsunterstützung sowie Wasserentladung des Sorptionswärmespeichers sehr klein und meist vernachlässigbar sind.

Die PID-Regeltemperatur und der Wirkungsgrad des Luft/Wasser-Wärmeübertragers (ϑ_{PID} , η_{HX}) haben einen großen Einfluss auf die Desorption, jedoch geringe Auswirkungen auf die benötigte Heiz-Zusatzwärmemenge.

Die maximale Speichertemperatur (ϑ_{sto}) hat auf die Desorption einen geringen Einfluss, jedoch wahrnehmbare Auswirkungen auf die Heizungsunterstützung. Trotz bedeutend höheren Wärmeverlusten im Kombispeicher sinkt die Zusatzheizwärme.

Tabelle 7.2 zeigt eine Zusammenfassung der Einflüsse der Parameter auf die Wärmemenge der Zusatzheizung und die Restbeladung des Sorptionswärmespeicher bei Erhöhung der Variationsparameter. Ein doppelter Pfeil (\uparrow , \downarrow) bedeutet, dass der Einfluss groß ist. Ein einfacher Pfeil (\uparrow , \downarrow) zeigt eine geringe Abhängigkeit. Die Richtung des Pfeils steht für die Richtung der Tendenz bei Erhöhung des entsprechenden Variationsparameters, wobei ein doppelseitiger Pfeil (\updownarrow) aussagt, dass keine klare Tendenz erkennbar ist.

7.9 Ergebnis der Jahressimulation

Mit der oben beschriebenen Prozedur ist es gelungen eine detaillierte und genaue Aussage über die Leistungsfähigkeit des vorgestellten Verfahrens im dynamischen Betrieb während eines ganzen Betriebsjahres zu erhalten.

Parameter	Einfluss			
	Zusatzheiz- Wärmemenge	Restbeladung	Einfluss	Empfehlung
ϑ_{PID} ↑	↑	↓	hoch	160 °C
ϑ_{ein} ↑	↕	↑	gering	≈ 100 °C
ϑ_{aus} ↑	↑	↕	mittel	115 °C
ϑ_{sto} ↑	↓	↕	hoch	70 °C
η_{HX} ↑	-	↑	hoch	100%

Tab. 7.2: Einfluss der Variationsparameter und Empfehlungen

Das für diese Berechnung gewählte Volumen des Sorptionsspeichers beträgt 10 m^3 . Unter den Zulaufbedingungen, wie sie sich aus der Gebäudesimulation ergeben, beträgt die Beladezeit für dieses Volumen ca. 1700 h. Danach ist der Speicher mit Wasserdampf gesättigt. Er kann also ca. 2 bis 3 Monate Adsorptionswärme liefern. Um diese Wärme sinnvoll einzusetzen, wird in den nachfolgend dargestellten Jahressimulationen mit der Beladung des Sorptionsspeichers Anfang Dezember begonnen. Anfang bis Mitte März ist der Sorptionsspeicher dann gesättigt.

Abbildung 7.16 zeigt das Temperaturprofil am Austritt aus dem Sorptionsspeicher für ein komplettes Jahr. Die Simulationsrechnung beginnt bei Jahresstunde 8016 (1. Dezember). Die feuchte Gebäudebluft tritt mit ca. 20 °C in den Speicher ein und verlässt ihn mit ca. 40 °C . Diese um ca. 20 °C erwärmte Luft wird der Wärmerückgewinnungsanlage zugeführt. Ende Februar fällt die Temperatur deutlich ab, der Speicher ist nun gesättigt. In der nun folgenden Zeit wird der Speicher mit Hilfe der Solaranlage, wie oben beschrieben, desorbiert. Ab April treten die Situationen, in denen die Solaranlage zur Desorption genutzt werden kann, immer häufiger auf. Die daraus resultierenden Austrittstemperaturen aus dem Sorptionsspeicher werden während der Heizperiode weiterhin für die Gebäudebeheizung genutzt, indem sie auf den Wärmeübertrager der Wärmerückgewinnungsanlage geleitet werden. Ende August ist der Sorptionsspeicher nahezu vollständig regeneriert. Die mittlere Speicherfeststofftemperatur beträgt dann ca. 170 °C . Erst im Dezember wird wieder mit der Feuchtebeladung des Sorptionsspeichers begonnen. Die Speicherfeststofftemperatur hat sich zu diesem Zeitpunkt auf ca. 130 °C abgekühlt. Dies entspricht einer Wärme von ca. 220 kWh , die zusätzlich zur Adsorptionswärme für die Raumheizung genutzt wird.

Die spannende Frage, welche Energieeinsparung durch diese Anlage erreicht werden kann, beantwortet Tabelle 7.3 bzw. Abbildung 7.17. Dargestellt ist der monatliche Gesamtwärmebedarf (Raumheizung und Trinkwasser) und die von den unterschiedlichen Wärmequellen gelieferte Wärme.

Die insgesamt erreichte anteilige jährliche Energieeinsparung f_{sav} beträgt: **66%**.

Bemerkenswert ist, dass dem Sorptionsspeicher eine Gesamtwärmemenge von 2813 kWh bei einer adsorptiven Speicherkapazität des Materials von 1300 kWh entnommen wurde. Hierfür sind zwei Ur-

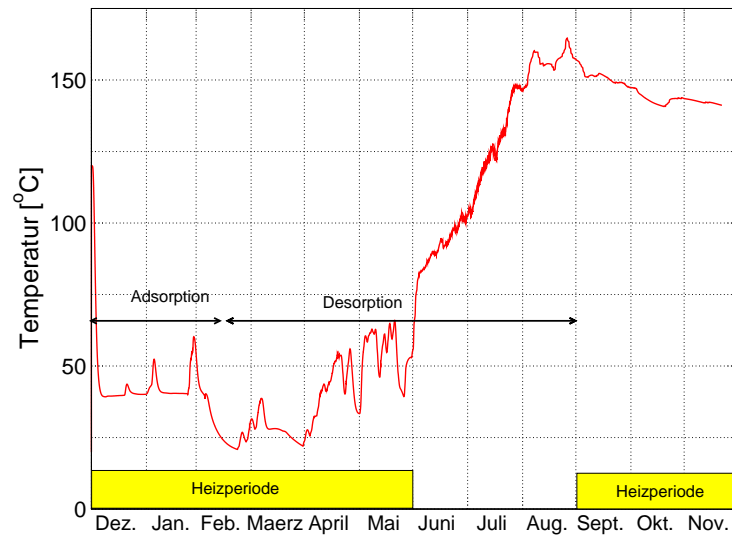


Abb. 7.16: Austrittstemperatur des Sorptionsspeicher

Monat	Q_{gesamt} [kWh]	Q_{Ssp} [kWh]	Q_{Kombi} [kWh]	Q_{aux} [kWh]
Jan.	1504	763	233	508
Feb.	1212	442	318	499
März	1011	551	355	193
April	385	150	223	0
Mai	307	104	203	0
Juni	125	0	125	0
Juli	125	0	125	0
Aug.	124	0	124	0
Sept.	247	0	247	0
Okt.	573	0	183	409
Nov.	949	0	196	753
Dez.	1343	803	207	333
Gesamt	7924	2813	2416	2694

Tab. 7.3: Monatliche Verteilung des Wärmebedarfs für Raumheizung und Trinkwassererwärmung und Beitrag der verschiedenen Wärmequellen zu dessen Deckung

sachen zu nennen: Es findet bereits während der Heizperiode eine Teilregeneration des Sorptionsspeichers statt. Dadurch werden etwa 1,2 Adsorptionszyklen pro Jahr erreicht. Abbildung 7.18 zeigt den Wassergehalt der Eintrittsluft in den Sorptionsspeicher und den Wassergehalt der aus dem Sorptionsspeicher austretenden Luft. In den Zeiten, wo die Austrittsfeuchte unterhalb der Eintrittsfeuchte liegt, wird adsorbiert. Andernfalls, d.h. bei umgekehrten Kurvenverlauf, wird der Sorptionsspeicher desor-

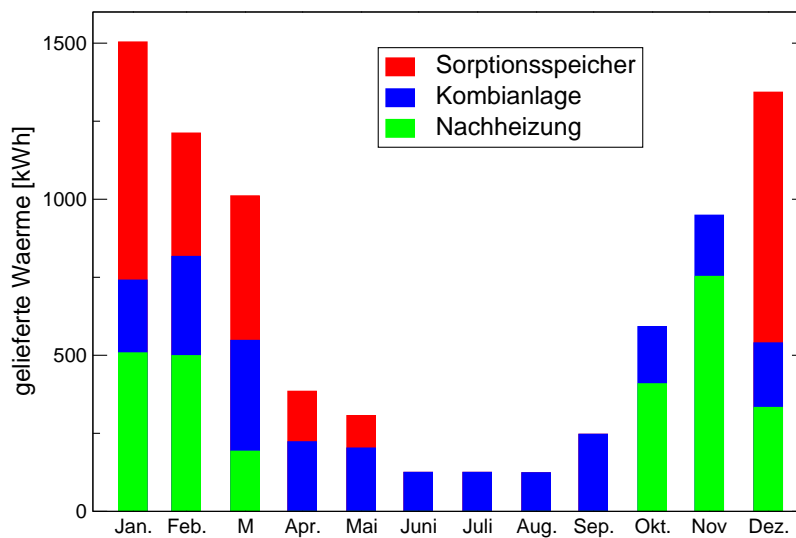


Abb. 7.17: Monatliche Verteilung des Wärmebedarfs aufgeteilt in die unterschiedlichen Wärmequellen

biert. Sehr schön ist zu erkennen, wie während der ersten 1500 Stunden die Feuchtigkeit vollständig adsorbiert wird. Danach schließt sich ein relativ steiler Durchbruch an bis zur vollständigen Sättigung des Sorptionsspeichers. Ende Februar und Anfang März führen die durch die Solaranlage zugeführten Temperaturerhöhungen zu einer Desorption des Sorptionsspeichers. Anschließend ist erneut eine Adsorptionsphase erkennbar. Im April kommt es erneut zur Desorption mit anschließender Adsorptionsphase. Die Hauptdesorption findet in den Monaten Juni und Juli statt und Ende August ist der Sorptionsspeicher dann vollständig desorbiert.

Die zweite Ursache für die hohe berechnete Speicherkapazität ist in Diagramm 7.17 zu erkennen: aus jedem Desorptionswärmeintrag resultiert eine Erhöhung der Austrittstemperatur aus dem Sorptionsspeicher. Diese fühlbare Wärme wird ebenfalls zur Raumheizung genutzt.

Abbildung 7.19 vergleicht die erzielbaren Energieeinsparungen des vorgestellten Konzepts (Kombianlage mit Sorptionsspeicher) und einer konventionellen Anlage (identische Kombianlage jedoch mit zusätzlichem Warmwasser-Pufferspeicher statt Sorptionsspeicher). Die Berechnung der konventionellen Anlage wurde für drei Pufferspeichergößen und unterschiedliche Kollektorflächen berechnet. Die Pufferspeicher sind sehr gut gedämmt und ideal geschichtet.

Es wird deutlich, dass eine konventionelle Solaranlage bei gleicher Kollektorfläche bei gleichem und auch größeren Speichervolumina deutlich geringere solare Deckungsanteile erreicht. Nur mit einer deutlich größeren Kollektorfläche sind ebenfalls gleiche Energieeinsparungen erzielbar wie mit dem vorgestellten Konzept.

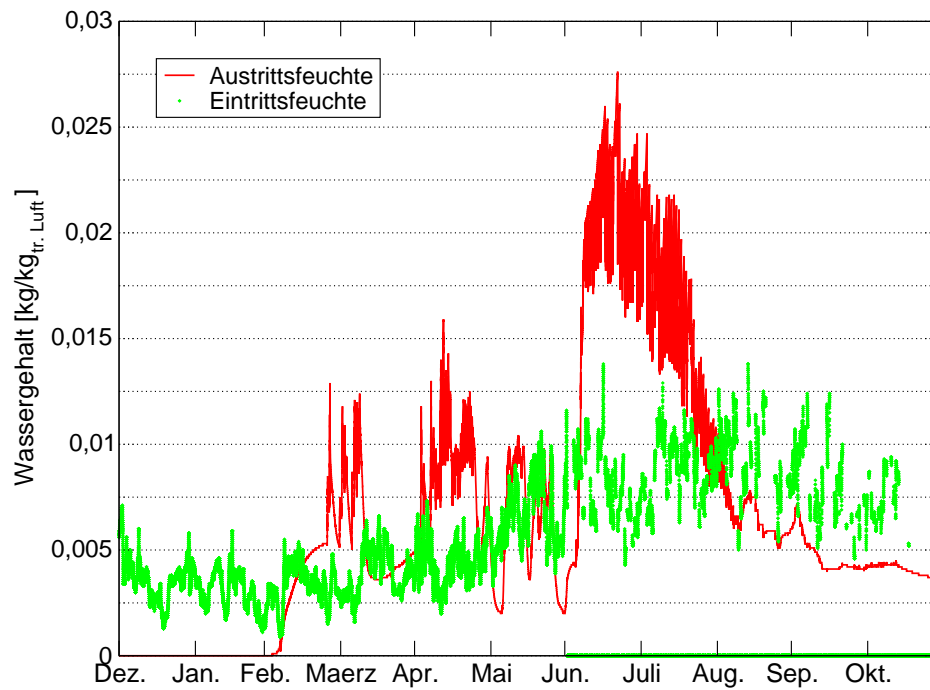


Abb. 7.18: Monatliche Verteilung des Wärmebedarfs aufgeteilt in die unterschiedlichen Wärmequellen

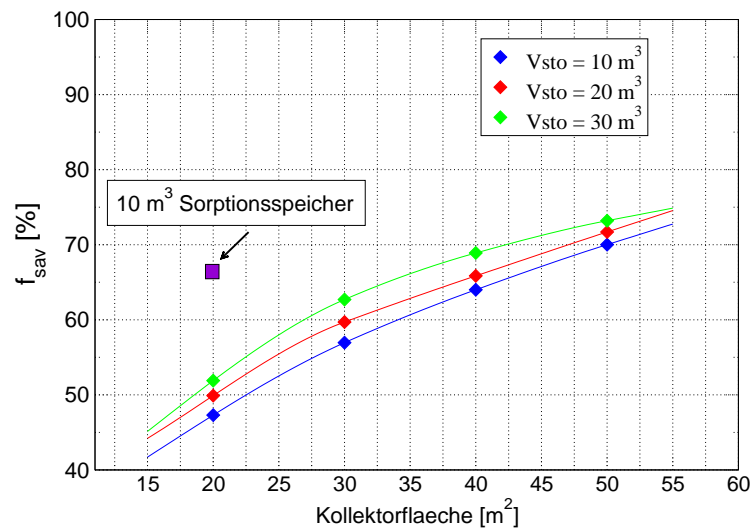


Abb. 7.19: Energieeinsparung in Abhängigkeit von Speicherart und Speichervolumen

Kapitel 8

Bewertung des Verfahrens

Die Bewertung des Verfahrens erfolgt unter verschiedenen Aspekten. Sie wird durch Fragen ergänzt, die bei der Vorstellung des Projekts zu verschiedenen Anlässen vom Fachpublikum gestellt wurden. Manche Punkte können zu diesem Zeitpunkt noch nicht definitiv beantwortet werden und bedürfen weiterer Forschungsarbeit.

8.1 Bewertung aus thermodynamischer Sicht

Für die Bewertung der Langzeitwärmespeicherung sind aus thermodynamischer Sicht zwei Kenngrößen von vornehmlichen Interesse: die erzielbare Wärmespeicherkapazität pro Volumen und die Wärmeverluste über einen längeren Speicherzeitraum.

8.1.1 Wie hoch ist die erzielbare Energiespeicherdichte des Speichermaterials?

In dem hier vorgestellten Verfahren wird die sorptive Wärmespeicherung mit dem Stoffpaar Zeolith - Wasser durchgeführt. Die auf das Speichervolumen bezogene Speicherkapazität errechnet sich aus der reversibel aufnehmbaren Wassermenge $m_{H_2O,ads}$ und der bei der Adsorption freiwerdenden Adsorptionsenthalpie Δh_{ads} :

$$Q_{sto} = m_{H_2O,ads} \cdot \Delta h_{ads} \quad (8.1)$$

Die maximal adsorbierbare Wassermenge ist stoffspezifisch und in geringem Maße abhängig von der Temperatur und dem Druck des zu adsorbierenden Stoffs (Adsorptiv) in der Gasphase. Für den hier verwendeten Zeolith 4A wurde bei Zuströmbedingungen (Raumabluft) eine tatsächliche Beladung von ca. 130 kg/m^3 gemessen.

Die mittlere Adsorptionsenthalpie $\Delta \bar{h}_{ads}$ wurde experimentell zu 3600 kJ/kg_{ads} bestimmt. Damit ergibt sich eine Speicherkapazität von 130 kWh/m^3 . Dies entspricht ca. dem zweifachen Wert eines Warmwasserspeichers bei einer Temperaturdifferenz von 50 K .

Einbeziehung der sensiblen Wärmekapazität des Speichermaterials

Nachteilig bei dem hier verwendeten Stoffpaar Zeolith/Wasser ist die relative hohe Desorptionstemperatur von ca. 180°C .

Würde das gesamte Speichermaterial für eine nahezu vollständige Desorption auf ca. 180°C aufgeheizt, dann beträgt die "gespeicherte" fühlbare Wärme mit ca. $0,25 \text{ kWh/kg}$ etwa 25% der gespeicherten Adsorptionsenthalpie. Am Ende einer vollständigen Desorptions beträgt somit die insgesamt gespeicherte Wärme ca. 160 kWh/m^3 .

8.1.2 Wie hoch sind die Wärmeverluste über einen längeren Speicherzeitraum?

Über einen langen Speicherzeitraum von mehreren Monaten würde der oben erwähnte Anteil der fühlbaren Wärme auf Grund von nicht idealer Wärmedämmung des Speichers verloren gehen. Dagegen bleibt die gespeicherten Adsorptionsenthalpie beliebig lange verlustfrei erhalten.

Das heißt, Wärmeverluste treten nur während der Beladungsphase (Desorption) und Entladungsphase (Adsorption) Wärmeverluste auf.

8.1.3 Wie hoch ist der Speicher-Nutzungsgrad?

Wird der Speichernutzungsgrad bestimmt als Quotient aus Nutzwärme, die dem Speicher entnommen wird und der dem Speicher zugeführten Wärme, kann diese Frage nicht allgemein beantwortet werden, sondern nur für die in der hier durchgeführten Simulationsstudie zugrunde gelegten Randbedingungen und anlagen Betriebsweise. Es ergibt sich:

$$\bar{\eta}_{sto} = \frac{Q_{nutz}}{Q_{zu}} = \frac{2660 \text{ kWh}}{6383 \text{ kWh}} = 41,7\% \quad (8.2)$$

8.2 Der Speicher als Teil der Gebäudesystemtechnik

Ziel des Forschungsvorhabens war es, ein Gesamtkonzept zur solaren Heizungsunterstützung zu entwickeln und untersuchen. Der Speicher wird als Teil des Heizungs- und Lüftungssystems eines Einfamilienhauses mit kontrollierter Lüftung und Wärmerückgewinnungsanlage betrachtet. Interessant sind hier die Integrierbarkeit des Speichers in die Gebäudetechnik und die Auswirkungen auf das Raumklima (Luftfeuchte, erreichbare Heizleistung usw.). Weiterhin ist der Systemnutzungsgrad von Interesse.

8.2.1 Wie groß ist der Aufwand für den Aufbau einer MonoSorp-Anlage?

Um die nötigen Regenerationstemperaturen zu erreichen, wird ein Mitteltemperatur-Solarkreis benötigt. Dieser unterscheidet sich von den üblichen Niedertemperatur-Solarkreisen durch den Betriebsdruck und die Betriebstemperatur (15 bar, max. 180 °C statt 3 bar, max. 110 °C). Daraus ergeben sich folgende Besonderheiten: statt des üblichen Weichlötens der Rohrverbindungen muss hartgelötet oder geschweisst werden. Viele Komponenten (Kupferrohr, -fittings, Edelstahlwellrohr, Verschraubungen sowie die Vakuumröhrenkollektoren) sind in ihrer Standardausführung für den hohen Druck- und Temperaturbereich geeignet. Bei anderen Bauteilen (Ausdehnungsgefäß, Dämmung, Ventile) sind ohne Aufwand geeignete, wenn auch teurere Produkte erhältlich. Ausnahme ist die Solarkreispumpe: hier ist wegen der hohen Mediumtemperaturen gekoppelt mit dem niedrigen Volumenstrom keine Standard-Umwälzpumpe einsetzbar.

Besondere Anforderungen auf der Luftseite der Anlage stellen die Temperaturen während der Desorption dar: der Speicher bzw. der Luft/Luft-Wärmeübertrager müssen eine Temperaturbeständigkeit von 180 °C bzw. 150 °C haben. Dies hat zur Folge, dass statt der üblicherweise verwendeten Kunststoffdichtungen temperaturfeste Dichtpasten oder -platten (meist Silikon) verwendet werden müssen. Auch hier waren ohne Aufwand für alle Komponenten (Wärmeübertrager, Rohrverbindungen, Wärmedämmung) geeignete, wenn auch teurere Produkte aus der Klima- und Lüftungstechnik erhältlich. Als einziges Nichtstandard-Teil wurde der Speicher von einem blechverarbeitendem Betrieb hergestellt. Die Fertigung des aus verzinktem Stahlblech bestehendem Speichers ist nicht aufwändig (hauptsächlich Biegen und Schweißen).

8.2.2 Wie hoch ist die erzielbare Heizleistung?

Da in diesem Verfahren als Feuchtequelle lediglich die Feuchtigkeit der Raumluft verwendet wird, ist die Heizleistung begrenzt durch:

- die Luftwechselrate des Gebäudes und
- die relative Feuchte der Raumluft

Wird für das zu Grunde gelegte Referenzgebäude (beheizte Wohnfläche 128 m^2) eine typische Luftwechselrate von $0,6 \text{ 1/h}$ angesetzt, wobei etwa 20 % durch Fugenlüftung erfolgt, werden ca. $150 \text{ m}^3/\text{h}$ Raumluft durch den Sorptionsspeicher geleitet. Der verwendete Zeolith 4A ist gekennzeichnet durch eine hohe Adsorptionsleistung auch bei sehr niedrigen Partialdrücken, so dass bei der Durchströmung des Sorptionsspeichers die Feuchtigkeit der Raumluft vollständig adsorbiert wird. Bei einer relativen Feuchte von 50 % und einer Temperatur von 20°C beträgt die pro Kubikmeter Raumluft enthaltene Wasserdampfmenge x ca. $7,36 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{tr.Luft}}$. Daraus resultiert eine Heizleistung von

$$\dot{Q}_{\text{heiz}} = x \cdot \dot{m}_{\text{tr.L}} \cdot \Delta \bar{h}_{\text{ads}} = 1,2 \text{ kW}. \quad (8.3)$$

Die beim Durchströmen des Speichers erreichbare adiabate Temperaturerhöhung der Luft ΔT_{ads} berechnet sich aus:

$$\Delta T_{\text{ads}} = \frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{m}_{\text{tr.L}} \cdot c_p} = \frac{\dot{m}_{\text{tr.L}} \cdot \Delta x \cdot \Delta h_{\text{ads}}}{\dot{m}_{\text{tr.L}} \cdot c_p} = \frac{\Delta x \cdot \Delta h_{\text{ads}}}{c_p} \quad (8.4)$$

Mit

$$x_{(\vartheta=20^\circ\text{C}, \varphi=0.5)} = 7.36 \frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{tr.L}}} \quad \text{und} \quad \Delta \bar{h}_{\text{ads}} = 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (8.5)$$

folgt:

$$\Delta T_{\text{ads}} = 23 \text{ K} \quad (8.6)$$

8.2.3 Ist die Raumluftfeuchte für Heizzwecke ausreichend?

Hier schließt sich nun die Frage an, ob der Wassergehalt der Raumluft während der Heizperiode ausreichend hoch ist. Abbildung 8.1 oben zeigt die jährliche Verteilung der relativen Feuchte bezogen auf 20°C . Die Daten der gestrichelten Kurve sind dem Wetterdatensatz des Testreferenzjahrs für Würzburg entnommen. Während der Heizperiode liegt die relative Feuchte (bezogen auf 20°C) aufgrund der niedrigen Außentemperaturen lediglich zwischen 20 und 40 %. Nur im Herbst, zu Beginn der Heizperiode, liegt sie darüber. In einem bewohnten Gebäude treten weitere Feuchtequellen (Bewohner, Pflanzen, etc.) auf. Die zusätzliche Feuchteproduktion wird in der Literatur mit ca. $3 \text{ g}/\text{m}^3$ angegeben, dies entspricht einer Zunahme der relativen Feuchte von 20%. Dieser zusätzliche Feuchteeintrag wird in Messungen, die das Passivhaus-Institut in Darmstadt durchgeführt hat, ersichtlich. In Abbildung 8.1 oben ist im Vergleich zur Außenluftfeuchte die in einem Gebäude gemessene tatsächliche Feuchte aufgetragen (durchgezogene Linie). Es zeigt sich, dass auch während der Heizperiode die Raumluftfeuchte zwischen 40 und 60 % liegt. Abbildung 8.1 unten zeigt die aus der Feuchte resultierende Heizleistung über das Jahr aufgetragen. Hier ist erkennbar, dass fast über die gesamte Heizperiode hinweg eine Heizleistung von mindestens 1 kW erreicht wird.

8.2.4 Wie hoch ist der Heizwärmebedarf des Gebäudes?

Das Konzept MonoSorp wurde entwickelt für ein modernes Einfamilienhaus, das den gültigen Vorschriften der Energieeinsparverordnung (EnEV) entspricht. Der Heizleistungsbedarf dieses Gebäudes ist in Abbildung 8.2 als rote Balken dargestellt. Hieraus wird deutlich, dass eine Heizleistung von 1 bis

1,5 kW zu über 50 % der Zeit ausreichend ist, um das Gebäude mit der benötigten Wärme zu versorgen. Für ein besser gedämmtes Gebäude (Niedrigenergiehaus) mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von 30 kWh/m^2 sind in 75 % der Zeit Heizleistungen von $\leq 1,5 \text{ kW}$ ausreichend. Die Verhältnisse sind ebenfalls in Abbildung 8.2 mit blauen Balken dargestellt.

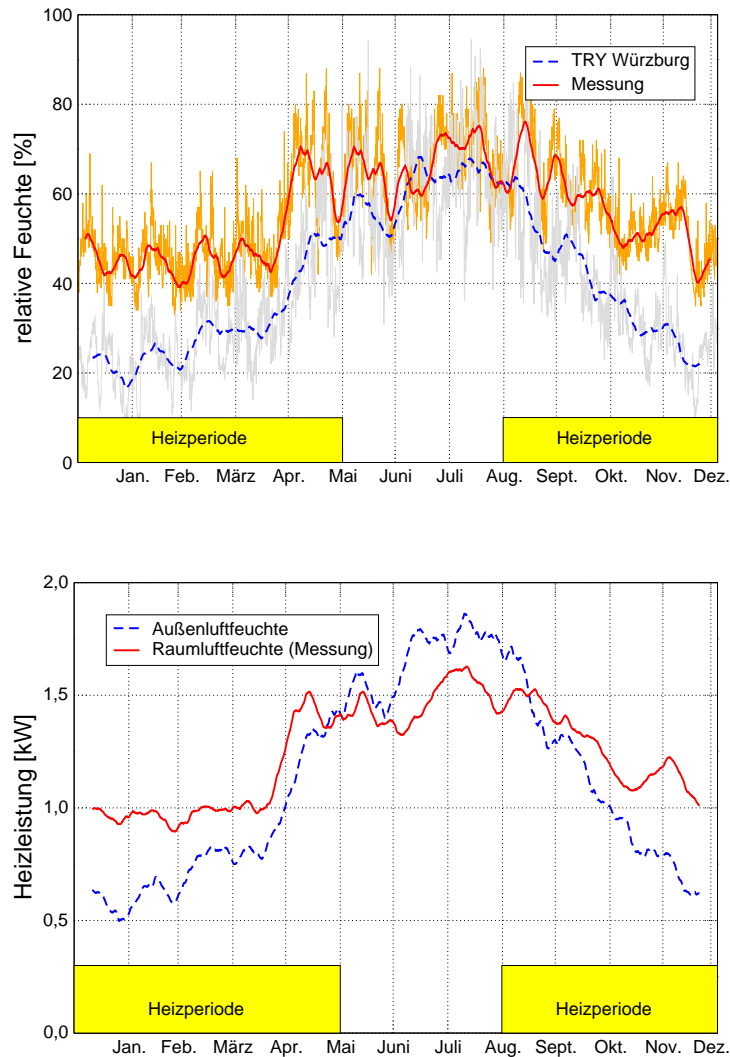


Abb. 8.1: (oben) relative Feuchte der Umgebungsluft und der im Gebäude gemessen jeweils bezogen auf 20°C
(unten) resultierende Heizleistung bei vollständiger Adsorption der Feuchte

8.2.5 Trocknet das Gebäude durch die Nutzung der Raumluftfeuchte aus?

Durch das angewendete Verfahren tritt keine Beeinflussung der Raumluftqualität auf.

Der Adsorptionsspeicher wird zwischen der Abluft des Raums und den Wärmeübertrager der Wärmerückgewinnung integriert. Dem Sorptionsspeicher wird lediglich die Feuchte des Luftstroms, der das Gebäude verläßt, zugeführt. Abbildung 8.3 macht dies deutlich. Die Darstellung im linken Bild zeigt die Verhältnisse in einem Gebäude mit einem konventionellen Lüftungskonzept. Dem Gebäude wird ein Luftstrom $\dot{V}_{tr, Luft}$ mit dem Feuchtegehalt x_{amb} zugeführt. In Inneren des Gebäudes nimmt die Luft

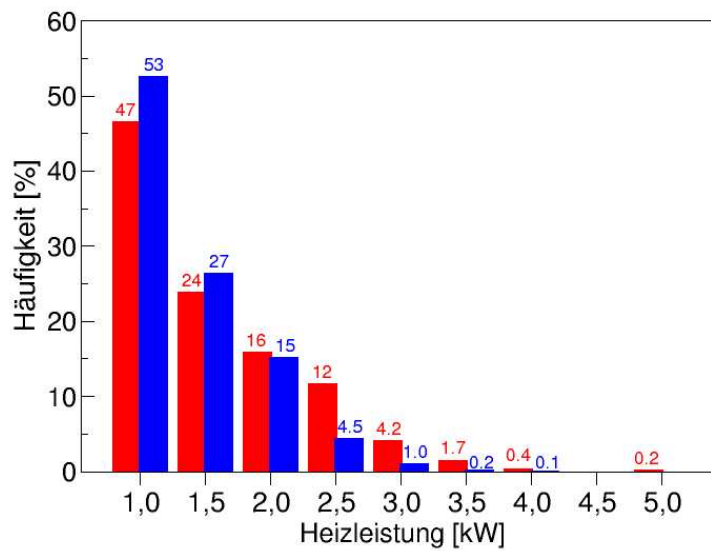


Abb. 8.2: Prozentuale zeitliche Verteilung der benötigten Heizleistung des Referenzgebäudes (rote Balken) und eines Niedrigenergiegebäudes (blaue Balken)

zusätzliche Feuchtigkeit auf und verlässt das Gebäude mit dem Feuchtegehalt x_{Raum} und der Temperatur ϑ_{Raum} . Das rechte Bild zeigt die Lüftungssituation mit dem MonoSorp-Konzept. Der Speicher und der Wärmeübertrager sind hier gedanklich außerhalb des Gebäudes angeordnet, was die Funktion des Verfahrens nicht beeinflusst. Deutlich wird, dass die Stoffströme, die in das Gebäude ein- und austreten, in beiden Fällen gleich sind und somit keine Beeinflussung des Raumklimas stattfindet.

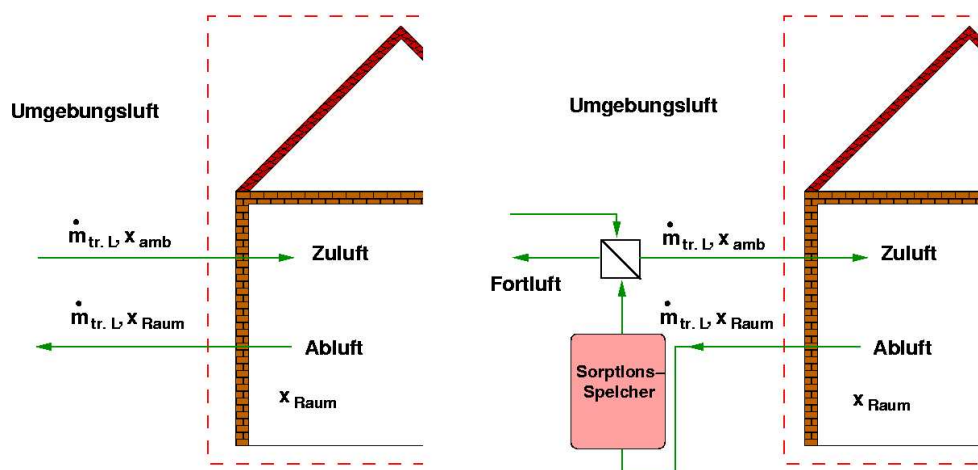


Abb. 8.3: Feuchtebilanz am Gebäude ohne (links) und mit Sorptionsspeicher (rechts)

8.2.6 Wie hoch ist der Systemwirkungsgrad?

Der Systemwirkungsgrad berechnet sich nach

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{Q_{\text{demand}} - Q_{\text{aux}}}{Q_{\text{IR}}} \quad (8.7)$$

Aus der Jahressimulation ergibt sich mit den Werten für den Heizwärmebedarf $Q_{\text{demand}} = 7924 \text{ kWh}$, für die Nachheizung $Q_{\text{aux}} = 2694 \text{ kWh}$ und einem Solarwärmeeintrag bei 20 m^2 Kollektorfläche von $Q_{\text{IR}} = 24600 \text{ kWh}$ der Systemwirkungsgrad η zu 21%. Soll ein saisonaler Warmwasserspeicher denselben solaren Deckungsanteil von 66% erreichen, so werden 50 m^2 Kollektorfläche benötigt (vgl. Abb. 7.19) und der Systemwirkungsgrad sinkt unter 10%.

Um den Systemwirkungsgrad aus den experimentellen Untersuchungen bestimmen zu können, werden Desorptions- und Adsorptionszyklus getrennt betrachtet:

Welcher Anteil der Solarenergie, die auf den Kollektor eintrifft, kommt der Regeneration des Speichers zugute? Hier müssen die Wärmeverluste des Kollektors, der Rohrleitungen, des Luft/Wasser-Wärmeübertragers und des Speichers betrachtet werden. Ausser dem Kollektorwirkungsgrad sind für diese Größen noch keine Werte bekannt, da nicht einfach die Verluste der Versuchsanlage auf eine Anlage in realer Größe extrapoliert werden können (anderes Oberflächen-Volumenverhältnis usw.). Während der Adsorptionsphase verlieren der Speicher, der Luft/Luft-Wärmeübertrager und die Rohrleitungen zwischen den beiden Komponenten Wärme. Auch hierüber kann zu diesem Zeitpunkt noch keine quantitative Aussage getroffen werden.

Generell ist aber Luft verglichen mit Wasser ein wenig geeignetes Arbeitsmedium: zum einen ist die Wärmekapazität von Luft gering ($c_{p,\text{Luft}} = 1,005 \text{ kJ/kgK}$, im Vergleich zu $c_{p,\text{Wasser}} = 4,18 \text{ kJ/kgK}$ bei 20°C), d.h. kleine Wärmeverluste gehen mit hohen Temperaturverlusten einher. Zum anderen beträgt der Wärmedurchgangskoeffizient eines Luft/Wasser- oder Luft/Luft- Wärmeübertragers nur ca. ein Zehntel des Wärmedurchgangskoeffizienten eines Wasser/Wasser-Wärmeübertragers.

8.2.7 Ist die Anlage zur Warmwasserbereitung geeignet?

Ein offener Sorptionsspeicher, wie er in diesem Konzept eingesetzt wird, ist nicht zur direkten Trinkwassererwärmung geeignet, da die Entladeleistung mit 1 bis 2 kW nicht ausreichend ist.

Ausserdem ist eine Trinkwassererwärmung mit dem Sorptionsspeicher energetisch nicht sinnvoll. Dies ist mit der eingesetzten Kombianlage energetisch effizienter.

Bei Gebäuden mit sehr geringem Heizwärmebedarf (z.B. Passivhäuser) kann die Raumheizung vollständig über eine Luftheizung, deren einzige Wärmequelle der Sorptionsspeicher ist, realisiert werden. In diesem Fall kann die Kombianlage durch eine einfache solare Trinkwasser-Erwärmungsanlage ersetzt werden. Für die Ermittlung des maximalen Wärmebedarfs für diesen Anwendungsfall sind durch weitere Simulationsstudien zu erstellen.

8.3 Bewertung des Speichermaterials

Ein nicht zu vernachlässigender Nachteile des in diesem Projekt erforschten Konzepts ist der hohe Produktionsaufwand der Monolithe. Deswegen sollte parallel zur Verbesserung des Konzepts MonoSorp über Alternativen nachgedacht werden.

Die Mindestanforderung an das Adsorbens, die sich aus dem verfahrenstechnischen Konzept von MonoSorp ergibt, ist die bei der Adsorption erhaltene Temperaturerhöhung der den Speicher durchströmenden Luft (min. 20 K). Kenngrößen wie Energiespeicherdichte und Druckverlust, sind aber gegen andere Kriterien wie dem Herstellungsaufwand abzuwägen.

8.3.1 Gute Adsorptionseigenschaften versus Materialkosten

So würde z.B. der Einsatz eines billigeren Zeoliths 4A ("Waschmittelzeolith") mit einer geringeren reversiblen Beladung die Energiespeicherdichte verkleinern. Hingegen würde ein höherwertiger Zeolith (z.B. dealuminiert) eine höhere Gleichgewichtsbeladung und damit Energiespeicherdichte erreichen. Eine quantitative Aussage über die Auswirkungen auf Kosten, Energieaufwand und Raumbedarf in diesen Fällen ist noch zu untersuchen.

8.3.2 Monolithe versus Kugelschüttung

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Zeolith in Form einer Kugelschüttung statt der Monolithe einzubringen. Die Vorteile der Monolithe bestehen hauptsächlich in den besseren Adsorptionseigenschaften und dem geringeren Druckverlust, d.h. dem geringeren Energieverbrauch des Gebläses. Demgegenüber haben Kugelschüttungen einen geringeren Energieaufwand bei der Herstellung und wesentlich geringere Materialkosten.

Für eine Kugelschüttung wäre der Einsatz eines sogenannten Radialstromadsorbers (siehe Abb. 8.4) vorstellbar. Hier strömt die Luft durch ein Rohr in die Mitte des Adsorbers und entweicht über Perforierungen im Rohr radial durch die Schüttung zum äußeren Rohr, wo sie abgeführt wird. Aus zwei Gründen muss das Volumen des Adsorbens dem Luftvolumenstrom angepasst sein: erstens muss sichergestellt werden, dass die frei werdende Adsorptionswärme der Temperaturerhöhung der Luft dient und nicht für die Erwärmung der Schüttung "verlorengeht". Zweitens haben die Experimente an der Versuchsanlage gezeigt, dass eine effiziente solarthermische Regeneration nur mit einem guten Wärmemanagement möglich ist, d.h. wenn die Desorptionswärme in die Speicherbereiche gebracht werden kann, wo sie tatsächlich zur Regeneration verwendet werden kann.

Die Luft darf also nur einen definierten Speicherbereich durchströmen. Denkbar ist hierzu z.B. eine Aufteilung des Adsorbers in "Scheiben", die nacheinander bis zur Sättigung durchströmt werden. Eine Lösung wäre eine teilweise, über die Adsorberhöhe verschiebbare Perforierung.

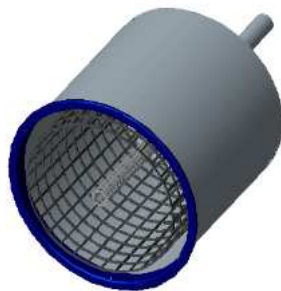


Abb. 8.4: CAD-Zeichnung eines Radialstromadsorbers

8.3.3 Wie hoch ist die Betriebsdauer des Speichermaterials?

Die eingesetzten Zeolithe sind großtechnisch hergestellte Produkte, die in einer Vielzahl technischer Prozesse und zahlreichen Produkten eingesetzt werden. Laut Herstellerangaben liegt die Betriebszeit von Zeolithen problemlos bei mehreren Tausend Be- und Entladezyklen. Bei Einsatz als saisonaler Speicher mit ein bis zwei Be- und Entladezyklen pro Jahr wird schnell ersichtlich, dass die zu erwartende Betriebszeit des Speichermaterials keine Probleme darstellt.

8.4 Vergleich mit einem saisonalen Warmwasserspeicher

Für einen vollständigen Vergleich von zwei Technologien zur saisonalen Wärmespeicherung reicht die alleinige Betrachtung der Energiespeicherdichte des Speichermaterials nicht aus. Vielmehr muss eine Betrachtung der gesamten Anlage (tatsächlicher Platzverbrauch inkl. Peripherie) über ein Jahr erfolgen.

8.4.1 Wie groß ist der Raumbedarf der MonoSorp-Anlage im Vergleich zu einem saisonalen Warmwasserspeicher?

Hier fließen folgende Parameter ein: die aus der Jahressimulation errechneten Speicherkapazitäten, der tatsächliche Platzverbrauch der Speicher und der Raumbedarf der jeweiligen Peripherie.

Aus der Jahressimulation ergibt sich unter Berücksichtigung der Speicherung fühlbarer Wärme und der Regenerationszeiten innerhalb der Heizperiode (vgl. Abschnitt 7.9) eine Speicherkapazität von ca. 280 kWh/m^3 . Auch ein Warmwasserspeicher wird in der Heizperiode immer wieder energetisch beladen, hier liegt jedoch kein Wert für die Speicherkapazität vor.

Wasserspeicher haben einen kreisförmigen Grundriss. Der tatsächliche Raumbedarf aber entspricht dem Quadrat, dessen Seitenlänge den Radius des Kreises beträgt. Dies vergrößert den Raumbedarf eines Speichers mit kreisförmigen Grundriss um den Faktor 1,23 bei gleichem Speichervolumen.

Zur Peripherie der MonoSorp-Anlage gehören ein zusätzlicher Luft/Wasser-Wärmeübertrager und der Ein- und Abströmtrichter. Diese Bauteile machen ca. 15 % des Speichervolumens aus. Zur Peripherie des Warmwasserspeichers gehört hauptsächlich ein Ausdehnungsgefäß (mit einem Volumen von ca. 1 m^3 bei 10 m^3 Wasserspeichervolumen). Die Dicke der Wärmedämmung wird für beide Anlagen gleich angenommen, da beim Sorptionsspeicher eine Dämmung bei hohen Temperaturen über kurze Zeiträume und bei dem Warmwasserspeicher die Dämmung bei mittleren Temperaturen über einen langen Zeitraum erfolgt.

Diese Überlegungen machen deutlich, dass ein einfacher Vergleich der Energiespeicherdichten der Speichermaterialien nicht zielführend ist. Es muss eine Betrachtung der *Gesamtanlagen* über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr erfolgen, um eine gültige Aussage treffen zu können.

8.4.2 Wie hoch sind die Kosten eines MonoSorp-Speichers im Vergleich mit einem saisonalen Warmwasserspeicher?

Die untenstehende Tabelle zeigt die Kosten pro kWh Wärme von Warmwasserspeichern und dem Adsorptionsspeicher. Die Berechnung der Speichervolumina und Kollektorflächen erfolgte so, dass eine anteilige jährliche Energieeinsparung f_{sav} von 70 % erreicht wird.

Art der Speicherung	Kollektorbauart	Kollektorfläche	Speichervolumen	f_{sav}	Wärmepreis Euro/ kWh
Warmwasser	Flachkollektoren	75 m^2	10 m^3	70 %	-,79
Warmwasser	Vakuurröhren	30 m^2	10 m^3	70 %	-,93
MonoSorp	Vakuurröhren	20 m^2	8 m^3	70 %	-,68 ¹⁾
MonoSorp	Vakuurröhren	20 m^2	8 m^3	70 %	-,57 ²⁾

Annahmen: Annuität 4%, 20 a

1) Kosten pro kg Monolith = 4 Euro

2) Kosten pro kg Monolith = 2 Euro

Kapitel 9

Einbindung der Arbeiten in die Task 32 der Internationalen Energieagentur (IEA)

Um der zunehmenden Relevanz von solaren Heizungssystemen mit Langzeitwärmespeichern Rechnung zu tragen, wurde vom EXCO (Executive Committee) der IEA die Task 32 ins Leben gerufen. Die Task läuft über vier Jahre (von 12.03 bis 12.07). In der Task 32 arbeiten ca. 20 Wissenschaftler aus 8 Nationen an der Entwicklung von innovativen Konzepten zur solarthermischen Wärmespeicherung zusammen.

Ziel der Task 32 ist es, verschiedene Konzepte für solar-aktive Systeme für die Heizung, Kühlung und saisonale Wärmespeicherung für Einfamilienhäuser zu entwickeln. In erster Linie sollen Lösungen für einen hohen (bis 100%) solaren Deckungsanteil für Häuser mit niedrigem Energieverbrauch gefunden werden.

9.1 Organisation und Struktur der Task

Das Arbeitsprogramm der Task ist in vier Schwerpunkte gegliedert. Ein übergeordneter Arbeitspunkt (Subtask A) nimmt eine Bewertung und Beurteilung der unterschiedlichen Speicherkonzepte vor. In detaillierten Simulationsstudien werden die thermische Leistungsfähigkeit der verschiedenen Systeme miteinander verglichen. Um hierfür geeignete Referenzbedingungen zu schaffen, wurden die bereits in der IEA Task 26 erarbeiteten Modelle erweitert. Insgesamt stehen nun vier Referenzgebäude mit einem Heizwärmebedarf zwischen $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ zur Verfügung. Die ebenfalls aus der Task 26 hervorgegangene FSC'-Methode (Fractional Solar Consumption) zur Charakterisierung der Systemeffizienz wurde für die Arbeit in der Task 32 um die Berücksichtigung von Langzeitwärmespeicherung und Kühllasten erweitert. Im Rahmen der Task 32 wird die Methode mit TRNSYS-Simulationsergebnissen aus den einzelnen Forschungsprojekten validiert werden.

Aufgabe der Subtask A ist weiterhin die Verbreitung der Ergebnisse der Task 32. Als erstes Ergebnis ist ein Buch erschienen, in dem ein detaillierter Überblick über den Stand der solarthermischen Wärmespeicherung gegeben wird [14].

9.2 Forschungsschwerpunkte

Drei weitere Arbeitsschwerpunkte gliedern sich nach der Art der Wärmespeicherung bzw. des verwendeten Speichermediums: physikalisch-chemische Speicher (Subtask B), Wärmespeicherung in Phasenwechselmaterialien (Subtask C) und verbesserte Warmwasserspeicher (Subtask D). Der Grad der Realisierung ist innerhalb der Forschungsschwerpunkte sehr unterschiedlich. Er reicht von ersten Ideen und prüfenden Laborversuchen (physikalisch-chemische Speicher) über die Realisierung von Prototypen (physikalisch-chemische Speicher, Phasenwechselmaterialien) bis hin zur Entwicklung seriennaher Produkte (Phasenwechselmaterialien, Warmwasserspeicher). Nachfolgend werden die drei Forschungsschwerpunkte genauer vorgestellt.

9.2.1 Physikalisch-chemische Wärmespeicher

Die physikalisch-chemische Wärmespeicherung bietet große Potenziale bezüglich einer auf das Speichervolumen bezogenen hohen Energiedichte. Sie ist derzeit jedoch von den untersuchten Speicherungsverfahren noch am weitesten von einer Marktreife entfernt. Generell können drei Mechanismen zur Energiespeicherung unterschieden werden: Adsorption, Absorption und chemische Reaktion. Allen gemeinsam ist die Wärmefreisetzung bei der Entladung des Speichers durch einen exothermen Reaktionsschritt. Durch Wärmezufuhr, in der Regel auf einem höheren Temperaturniveau als bei der Wärmefreisetzung, wird der Reaktionsschritt umgekehrt und so der Speicher beladen.

Am schwedischen „Solar Energy Research Center“ (SERC) in Borlänge wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Climate Well eine Absorptionswärmepumpe entwickelt, die unter Ausnutzung der drei Aggregatzustände eine hohe Speicherkapazität von ca. 330 kWh/m^3 bezogen auf das Arbeitsmittelvolumen erreicht[15]. Es wurden bereits zwanzig TCA-Anlagen („thermo-chemical accumulator“) installiert, vorwiegend in Spanien. Für das Jahr 2007 sind weitere 100 bis 200 geplant. Das System wird allerdings meist als chemische Wärmepumpe für Kühlzwecke eingesetzt, da die Kältespeicherung bedeutender als die Wärmespeicherung ist.

Ein in der Schweiz untersuchtes Verfahren verwendet NaOH als Speichermedium. Der Speicher arbeitet als Wärmepumpe wobei die Konzentrationsdifferenz der Laugen die treibende Kraft ist. Energetisch beladen wird der Speicher, indem NaOH mit Hilfe von Solarwärme aufkonzentriert wird. Heizwärme kann durch die Adsorption von Dampf an der NaOH-Lauge gewonnen werden.

Ausserdem sind in dieser Subtask der Sorptionsspeicher Modestore der österreichischen AEE-INTEC und die Untersuchungen an Zeolith 13X des SPF in Rapperswil (beide in Abschnitt 4 beschrieben) vertreten, sowie als einziger offener Sorptionsspeicher und einziger deutscher Beitrag zu dieser Subtask, das in diesem Bericht behandelte Projekt MonoSorp.

Die Technologien befinden sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien: der TCA ist bereits kommerzialisiert, der Modestore-Speicher wird als Pilotanlage betrieben, die drei anderen Anlagen werden als Laborversuchsanlagen untersucht.

9.2.2 Wärmespeicherung in Phasenwechselmaterialien (PCM)

Phasenwechselmaterialien zur Speicherung von latenter Wärme sind in den letzten Jahren verstärkt Gegenstand der Forschung. Einige Materialien haben Marktreife erlangt und werden für unterschiedliche Einsatzzwecke kommerziell angeboten.

In einem Latentwärmespeicher wird zusätzlich zur „fühlbaren“ Wärme die Umwandelungsenthalpie beim Phasenwechsel nutzbar gemacht. Beim Erstarren eines Stoffes steht neben der sensiblen Wärme auch die Enthalpie des Phasenwechsels zur Verfügung. Die Schmelzenthalpie ist in den hier betrachteten Anwendungen in der Regel deutlich größer als die sensible Wärme. Durch Wärmezufuhr kann der Prozess rückgängig gemacht, das heißt, das Phasenwechselmaterial wieder geschmolzen werden. Neben der großen Energiedichte, die die latente Wärmespeicherung bietet, ist das Temperaturniveau bei der sich der Phasenwechsel vollzieht, für technische Anwendungen interessant. Nachteilig gegenüber dem Speichermedium Wasser sind höhere Investitionskosten und die Schwierigkeit des Wärmetransports, hervorgerufen durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der Materialien. Fünf Forschungsvorhaben zur Wärmespeicherung in PCM werden im Rahmen der Task 32 bearbeitet.

Kommerziell stehen Paraffine mit Phasenwechseltemperaturen von etwa 30 bis ca. 80°C zur Verfügung und decken damit in Bezug auf den Einsatz in Wärmespeichern für die Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung den technisch interessanten Bereich ab. An der Hochschule in Yverdon les Bains (Schweiz) werden experimentelle Parameterstudien für den Einsatz von PCM in solaren Kombisystemen durchgeführt.

An der Universität in Lleida, Spanien [16] wird die Einbettung einer Grafitmatrix in das PCM zur Verbesserung des Wärmetransport untersucht, mit der Zielsetzung die verfügbare Leistung bei der Trinkwassererwärmung zu erhöhen.

Am ITW wird untersucht, welche Vorteile durch eine Kombination von Wasser und PCM-Speichermaterialien erzielbar sind. Hierzu ist vorgesehen einen modifizierten Warmwasserspeicher mit PCM gefüllten Kugeln zu beschicken. Zusätzlich soll ein numerisches Rechenmodell zur Beschreibung des thermischen Verhaltens eines derartigen Speichers entwickelt werden.

Die Auswirkungen durch die Erhöhung der Speicherkapazität in einem definierten Temperaturbereich auf das Betriebsverhalten von fossilbefeuerten Heizkesseln wurden am Institut für Wärmetechnik (IWT) der TU Graz (Österreich) [17] untersucht. Durch die Kapazitätsvergrößerung werden längere Brennerlaufzeiten und damit geringeres Takten der Heizkessel erreicht, was sich positiv auf den Schadstoffausstoß auswirkt. Verschiedene kunststoffumhüllte PCM-Materialien wurden für diesen Einsatzzweck in einem Warmwasserspeicher untersucht.

Eine weitere interessante Möglichkeit, die thermische Kapazität von Warmwasserspeichern zu erhöhen, ist der Einsatz sogenannter PCM-Slurries. Slurries sind pumpfähige Gemische aus mikroverkapselten PCM (gefüllte Polymerkugeln, Durchmesser 5 - 10 μm) und Wasser. Typische Konzentrationen enthalten 20 bis 50 Vol.-% Feststoffanteil. Bei den am IWT durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass mit einer 50%igen Mischung eine ca. 1,7-fach höhere Kapazität gegenüber reinem Wasser erreicht wird. Mit steigender PCM-Konzentration nimmt jedoch die Viskosität zu und es resultiert ein schlechterer Wärmeübergang.

Das Phänomen der Unterkühlung (super cooling) wird am Department of Civil Engineering der Technischen Universität Dänemarks (DTU) gezielt als Möglichkeit der Langzeitwärmespeicherung untersucht [18]. In Simulationsstudien konnte gezeigt werden, dass unter Verwendung von PCM, die eine stabile Unterkühlung bis nahe der Umgebungstemperatur ermöglichen, eine Langzeitwärmespeicherung mit sehr geringen Wärmeverlusten erreicht werden kann.

Begleitet werden die oben genannten experimentellen Untersuchungen durch Simulationsstudien mit neuentwickelten numerischen Modellen zur detaillierten Beschreibung des Phasenwechsels. Im Rahmen der Task 32 arbeiteten die beteiligten Arbeitsgruppen an der gemeinsamen Entwicklung eines Modells für das Simulationsprogramm TRNSYS.

9.2.3 Innovative Warmwasserspeicher

Obwohl der technische Entwicklungsstand der Warmwasserspeicher bereits relativ hoch ist, bietet diese Technik für die solare Heizungsunterstützung mit hohen Deckungsanteilen immer noch ein hohes Entwicklungspotenzial [19]. In der Subtask D beschäftigen sich vier Teams mit ausgewählten Themen zur weiteren Effizienzsteigerung von Warmwasserspeichern. Hierbei stehen Kostensenkung durch Verwendung günstiger Materialien, modulare Bauweise, Verbesserung der Be- und Entladeeinrichtungen, verbesserte regelungstechnische Einbindung in das Heizungssystem, sowie die Integration von Phasenwechselmaterialien in Warmwasserspeicher im Vordergrund.

Drucklose Kunststoffspeicher stellen eine Möglichkeit dar, große Warmwasserspeicher (mehrere Kubikmeter) kostengünstig in eine Kombianlage zu integrieren. Als ein weiteres Projekt im Rahmen dieser Subtask wird eine Pilotanlage mit einem drucklosen 2m^3 Kunststoffspeicher in einem Wohnhaus realisiert und vom ITW meßtechnisch untersucht werden. Darauf aufbauend sollen dann entsprechende Anlagen mit einem deutlich größeren Speichervolumen realisiert werden.

Die Universität Kassel bringt ein neues Forschungsvorhaben zur „Entwicklung kompakter Be- und Entladestationen in Modulbauweise für große Kombispeicher“ in die Arbeit der Task 32 ein.

Moderne Entwicklungswerkzeuge wie CFD (Computational Fluid Dynamics) und Particle Image Velocimetry (PIV) werden eingesetzt, um die Vorgänge im Speicher besser zu verstehen und bieten die Möglichkeit, die Wirkung einzelner Komponenten (z.B. Schichtbeladeeinrichtungen) genauer zu untersuchen und zu verbessern. Sowohl an der DTU [20] wie auch am ITW [21] wird auf diesem Gebiet intensiv geforscht.

Ein vielversprechender Ansatz ist die Kombination bzw. Integration von PCM-Materialien in Warmwasserspeichern. Hierzu werden bereits Arbeiten an der Universität in Lleida durchgeführt [22]. Ein neues Forschungsvorhaben am ITW in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner wird sich mit der Entwicklung und experimentellen Erprobung eines solchen Speichers beschäftigen.

9.3 Erste Ergebnisse

Voraussichtlich Anfang bis Mitte 2008 wird der Abschlussbericht der Task 32 erscheinen, in dem unter anderem die Ergebnisse aus den TRNSYS-Simulationen der verschiedenen Speichertechnologien enthalten sein werden.

Ein Ergebnis der Arbeiten der Subtask B ist Tabelle 9.1, die sich aus einem Vergleich der fünf beteiligten Speichertechnologien ergab [23].

Demnach erreichen der TCA-Speicher und der NaOH-Absorptionspeicher für die Energiespeicherdichte des Materials mehr als das Dreifache der Energiespeicherdichte von Wasser (bei $\Delta T = 60 \text{ K}$). Ein Wärmespeicher von 1000 kWh hat immerhin noch knapp die dreifache Kapazität von Wasser. Als Referenz wird hier allerdings das reine Medium Wasser verwendet, d.h. der Platzverbrauch eines "realen" Warmwasserspeichers wird nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitt 8.4). MonoSorp liegt hier im Mittelfeld. Problem aller Technologien sind die hohen Speichermaterialkosten. In diesem Entwicklungsstadium ist es noch nicht möglich, eine Bewertung der Technologien vorzunehmen. Viel Forschungsarbeit sowohl an Materialien als auch an Verfahren ist noch nötig.

Parameter	TCA 80 – 100 °C	NaOH 95 °C test 150 °C calculated	Modestore 88 °C	SPF 180 °C	MonoSorp 180 °C
Type of technology	Closed three phase absorption	Closed two phase absorption	Closed adsorption	Closed adsorption	Open adsorption
Cost of material	3600 €/m ³	250 €/m ³	4300 €/m ³	2-3000 €/m ³	350-1500 €/m ³
Storage materials weight	LiCl salt 54 kg Water 117 kg Steel 47 kg	NaOH 160 kg Water 160 kg	Silica gel 200 kg Water 30 kg Steel 100 kg Copper 200 kg	Zeolite 13X 7 kg	Zeolite 4A 70 kg Water 13 kg Steel 10 kg
Storage capacity for heat	35 kW/h	8.9 kW/h	13 kW/h	1 kW/h	13 kW/h
Floor space requirements for prototype	0.46 m ²	2 m ²	0.4 m ²	0.3x0.3 m ²	0.4 m ²
Energy density of the material (NRJ4.1) (ratio to water 25/85 °C)	253 kW/h/m ³ (3.6)	250 kW/h/m ³ (3.6)	50 kW/h/m ³ (0.71)	180 kW/h/m ³ (3)	160 kW/h/m ³ (2.3)
Energy density of prototype - heat (NRJ4.2)(ratio to water 25/85 °C)	85 kW/h/m ³ (1.2)	5 kW/h/m ³ (0.07)	33.3 kW/h/m ³ (0.48)	57.8 kW/h/m ³ (1)	120 kW/h/m ³ (1.7)
Energy density of prototype - cold (ratio to water 7/17 °C)	54 kW/h/m ³	-	-	-	-
Charge rate	15 kW	1 kW	1 – 1.5 kW	-	2 – 2.5 kW
Discharge rate	8 kW	1 kW	0.5 – 1 kW	0.8 – 1.8 kW	1 – 1.5 kW
Estimated size for 70 kW/h (ratio to water 25/85 °C)	0.64 m ³ (1.6)	1.3 m ³ (0.75)	1.7 m ³ (0.59)	1.2 m ³ (1)	0.54 m ³ (1.9)
Estimated size for 1000 kW/h (ratio to water 25/85 °C)	5.3 m ³ (2.7)	5 m ³ (2.9)	23 m ³ (0.62)	17 m ³ (1)	7.7 m ³ (1.9)

Tab. 9.1: Vergleich der verschiedenen Speichertechnologien von Subtask B der IEA SHC Task 32

Kapitel 10

Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die in diesem Forschungsvorhaben erreichten und bisher unerreichten technischen Einzelziele zusammengefasst.

10.1 Erreichte Ziele

In diesem Forschungsvorhaben wurden folgende Ziele erreicht:

- Aufbau einer Versuchsanlage zur Überprüfung der thermischen Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Verfahrens.
Es wurde eine Versuchsanlage geplant, konstruiert und aufgebaut, mit der die gestellten Anforderungen erfüllt werden:
 - Die Versuchsanlage beinhaltet alle Anlagenkomponenten, die zur Realisierung des Verfahrens in einem realen Gebäude benötigt werden.
 - Alle Anlagenkomponenten, mit Ausnahme des Sorptionspeichers selbst, sind kommerzielle Produkte.
 - Es wurde ein Speichergehäuse mit einem Volumen von $0,1 \text{ m}^3$ zur Aufnahme der Adsorbentien sowohl für monolithische Wabenkörper als auch für Kugelschüttungen gebaut und erprobt. Der Luft/Wasser-Wärmeübertrager wurde zur Minimierung der Wärmeverluste direkt in das Speichergehäuse integriert.
 - Es wurden optimierte Anströmtrichter entwickelt, die bei minimiertem Raumbedarf eine Gleichverteilung der Anströmung über den Speicherquerschnitt realisieren.
 - Die installierte Messtechnik erfasst alle für eine vollständige thermische Bilanzierung des System notwendigen Messgrößen. Die Feuchtemessung wird über hochgenaue Taupunktspiegel realisiert. Temperaturen werden im Kollektorkreis, in der Gasströmung sowie im Speichermaterial erfasst. Etwas problematisch ist die Messung des Gasmassenstroms. Sowohl am Speicher, als auch an den Rohrleitungen treten kleine Leckageströme auf, die nur schwer zu identifizieren sind.
 - Zur solarthermischen Regeneration wurde ein Hochtemperatur-Kollektorkreis aufgebaut. Als Wärmeträgermedium wird Wasser eingesetzt. Der Kollektorkreis wurde auf einen Betriebsdruck von 15 bar ausgelegt, so dass Temperaturen bis 200°C möglich sind.
 - Die Leistungsfähigkeit der Solarkollektoren, ebenso die der eingesetzten Wärmeübertrager, erwies sich als ausreichend.
 - Die Versuchsanlage wurde mit einem elektrischen Heizstab (Kollektor-Simulator) ausgerüstet um auch bei ungenügender Solarstrahlung Desorptions-Experimente durchführen zu können.

- Bezüglich der Gasdichtheit und der Wärmedämmung der luftführenden Rohrleitungen besteht noch Verbesserungspotential.

Insgesamt steht nun eine Versuchsanlage zur Verfügung, mit der die thermische Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Adsorbentien realitätsnah untersucht werden kann.

- Herstellung der Formkörper
In enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Kunststofftechnologie ist es gelungen, den weltweit ersten Prototypen eines Sorptionsspeichers auf Basis extrudierter Zeolith-Formkörper herzustellen.
- Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit
Die tatsächliche Speicherkapazität des Sorptionsspeichers konnte unter realen Randbedingungen experimentell bestimmt werden. Die erreichte Wasseradsorption betrug ca. 18 Gew.% bei einer vorhergehenden Desorption mit einer maximalen Speichertemperatur von 170°C. Daraus ergibt sich eine Speicherkapazität von ca. 130 kWh/m³, ohne Anteile fühlbarer Wärme.
- Thermische Regeneration des Sorptionsspeichers
 - Es konnte gezeigt werden, dass eine thermische Regeneration des Speichermaterial mit den eingesetzten Anlagenkomponenten gelingt. Bei einer maximalen wasserseitigen Vorlauf-temperatur (Kollektoraustrittstemperatur) von 180°C konnte das Speichermaterial auf eine mittlere Temperatur von 165°C aufgeheizt werden.
 - In den durchgeführten Experimenten wurden deutlich, dass eine gute Wärmedämmung des Speichers notwendig ist. Dies ist insbesondere bei einer zyklischen Regeneration des Speichers von großer Bedeutung, da sonst in den Zeiten ohne Wärmeeintrag (nachts oder an Tagen mit zu geringer Solarstrahlung) der Speicher zu stark auskühlt.
 - Weiter zeigten die Experimente mit zyklischer Regeneration des Sorptionsspeichers, dass für eine energetisch effiziente Regeneration ein Wärmemanagement zu erarbeiten ist, um zu vermeiden, dass bereits regenerierte Teilbereiche des Speichers mehrfach aufgeheizt werden.
- Numerische Simulation des Gesamtsystems
Es wurde ein Simulationsprozess erarbeitet, der die detaillierte numerische Simulation der Adsorptions- und Desorptionsprozesse innerhalb des Sorptionsspeichers mit einer dynamischen Gebäudesimulation inklusive solarer Kombianlage koppelt (s. Abschnitt 7) Auf diese Weise wird eine geschlossene Simulation des Gesamtprozesses erreicht, die eine genaue Berechnung der thermischen Leistungsfähigkeit und die erzielbare jährliche Energieeinsparung ermöglicht. Erste Parameterstudien wurden durchgeführt, in denen der Einfluss einiger wichtiger Regelgrößen auf die solarthermische Regeneration des Sorptionsspeichers untersucht wurden. In Übereinstimmung mit den experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine effiziente Regeneration erreicht wird, wenn das Speichermaterial beginnend mit niedrigen Temperaturen (120°C) schrittweise aufgeheizt wird. Für eine nahezu vollständige Desorption ist es ausreichend, die Aufheizung auf die maximale Desorptionstemperatur von 180°C am Ende der Desorptionsphase nur für einen kurzen Zeitraum zu realisieren.
- Aufbauend auf den experimentellen Ergebnissen (Bestimmung der Speicherkapazität, der mittleren Adsorptionenthalpie etc.) konnte schließlich durch eine detaillierte numerische Simulation des Gesamtsystems die thermische Leistungsfähigkeit des Verfahrens berechnet werden.

- Mitarbeit in der IEA Task 32

Die im Laufe der Forschungsvorhabens gewonnen Erkenntnisse wurden auf den halbjährlich stattfindenden Arbeitstreffen der Task 32 vorgestellt und im Expertenkreis diskutiert. Von denen im Rahmen der Task 32 untersuchten Speichersystemen wurde das MonoSorp-Konzept als eins der Verfahren mit den größten Zukunftschancen bewertet.

10.2 Nicht erreichte Ziele

- Darstellung einer vollständigen solarthermischen Regeneration

Im Verlauf des Forschungsvorhabens ist es aus zeitlichen Gründen leider nicht gelungen, eine vollständige solarthermische Regeneration darzustellen. Verantwortlich hierfür sind zwei Umstände. Ursprünglich war der 18-monatige Bearbeitungszeitraum des Vorhabens von April 2005 bis September 2006 beantragt, so dass das Projektende in der strahlungsreichen Jahreszeit gelegen hätte. Mit einer vollständig aufgebauten und erprobten Anlage hätten dann die entsprechenden Experimente durchgeführt werden können. Aufgrund des Genehmigungsverfahrens verschob sich der tatsächliche Bearbeitungszeitraum auf Oktober 2005 bis März 2007, so dass nur ein Sommer zur Mitte der Projektlaufzeit zur Verfügung stand. Zwar war bis Sommer 2006 die Versuchsanlage größtenteils aufgebaut, hinzu kamen jedoch zeitliche Verzögerungen bei der Herstellung der extrudierten Formkörper um mehrere Monate. Die Fertigstellung der Formkörper erfolgte im September 2006, so dass nur noch wenige strahlungsreiche Tage für Regenerations-Experimente mit den Solarkollektoren zur Verfügung standen (s. Abschnitt 6.2.4).

Dieser Ausfall konnte durch die zusätzliche Integration eines elektrischen Heizstabes in den Kollektorkreislauf, der als "Kollektor-Simulator" fungierte, zumindest soweit kompensiert werden, als dass gezeigt werden konnte, dass mit einer Kollektorvorlauftemperatur von $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine Desorptionstemperatur in Speicher von $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht wird (s. Abb. 6.6) und dass auch bei instationärer Betriebsweise eine vollständige Desorption des Speichers gelingt (s. Abb. 6.7).

Kapitel 11

Forschungsbedarf

Die in diesem Vorhaben durchgeführten Arbeiten stellen einen ersten Schritt dar, auf dem Weg zur solarthermischen Langwärmespeicherung ein offenes Adsorptionsverfahren einzusetzen. Es besteht noch großer Forschungsbedarf um zu einem optimierten System zu gelangen, das einen kommerziellen Einsatz dieser Technik ermöglicht. Hier sind in erster Linie folgende Forschungsschwerpunkte zu nennen:

1. Entwicklung eines Wärmemanagements zur Regeneration
2. Entwicklung einer anwendungstauglichen Systemregelung
3. Weiterentwicklung des Speichermaterials
4. Installation und Vermessung einer Demonstrationsanlage im Gebäude

11.1 Entwicklung eines Wärmemanagements zur Regeneration

Das hier vorgestellte Anlagenkonzept, bei dem die gesamte Sorptionsspeichermasse gleichzeitig durchströmt wird, stellt die apparativ einfachste Form dar. Die Simulationsrechnungen, wie auch die experimentellen Untersuchungen zeigten schnell, dass diese Art der Strömungsführung für die Regeneration eines realen Speichers denkbar ungünstig ist, da immer wieder bereits regenerierte Speicherbereiche aufgeheizt werden. Es besteht somit die Aufgabe, ein Wärmemanagement zu entwickeln, das eine effiziente Regeneration des Sorptionsspeichers ermöglicht. Dies bedeutet, dass die von den Kollektoren gelieferte Wärme in Abhängigkeit des Regenerationszustands des Speichers genau den Speicherbereichen zuzuführen ist, die bei dem momentan möglichen oder sinnvollen Temperaturniveau effizient regeneriert werden können. Dies könnte durch eine intelligente Aufteilung des Speichers in separate Regenerationszonen erreicht werden.

Ein für die einfache Durchströmung berechneter Speichernutzungsgrad von ca. 40% zeigt, welche Potenziale bezüglich der Ausnutzung der Kollektorfläche zur Regeneration des Sorptionsspeichers noch zu erwarten sind.

11.2 Entwicklung einer anwendungstauglichen Systemregelung

Neben der Entwicklung einer Regenerationsstrategie für große Sorptionsspeicher ist die Erarbeitung und Erprobung einer anwendungstauglichen Gesamtsystemregelung eine notwendige Voraussetzung um das Konzept Monosorp in einem realen Gebäude als Demonstrationsanlage erproben zu können. Durch die Gesamtsystemregelung muss gewährleistet werden, dass die drei Teilsysteme a) Lüftungsanlage des Gebäudes, b) die solare Kombianlage und c) der Sorptionsspeicher zu einem in sich stimmigen Gesamtsystem zusammen gefügt werden. Ziel der Regelung muss sein, dass das System energieeffizient arbeitet und gleichzeitig den Komfortbedürfnissen der Bewohner gerecht wird.

11.3 Speichermaterial

Bezüglich des einzusetzenden Speichermaterials gibt es in vielerlei Hinsicht Forschungsbedarf,

- Optimierung des Speichermaterials

Die Wahl des in diesem Forschungsvorhaben eingesetzten Adsorbens Zeolith 4A begründet sich auf die hohe Verfügbarkeit, die für synthetisch hergestellte Zeolithe relative geringen Preis (ca. 2 Euro/kg) und die guten Erfahrungen bezüglich seiner Extrudierbarkeit.

Der Typ 4A ist für die Lufttrocknung gut geeignet, stellt aber in keiner Weise ein auf den Anwendungszweck Energiespeicherung optimiertes Material dar. Nachteilig für die solarthermische Anwendung ist ausserdem die hohe Desorptionstemperatur.

Diesbezüglich zeigte Jänchen [24], dass durch die Dealuminierung der 4A Struktur eine deutliche Verminderung der Desorptionstemperatur erreicht wird. Damit wäre auch der Einsatz von Flachkollektoren möglich. Dieser Effekt geht jedoch mit einer Verminderung der Adsorptionsthalpie einher, was bei gleicher Speicherkapazität zu größeren Speichervolumina führen würde.

Derzeit werden von verschiedenen Institutionen zahlreiche Adsorbentien auf ihre Eignung zur thermischen Energiespeicherung hin untersucht. Darunter sind Materialien die deutlich günstigere physikalische Eigenschaften aufweisen als die hier verwendeten Zeolithe vom Typ 4A. In der Regel sind diese jedoch häufig sehr teuer oder nur in geringer Menge verfügbar. Auch kostengünstige Materialien, beispielsweise hydrophobisierte Aktivkohle und ähnliches, werden untersucht und sind insbesondere für Langzeitspeicherung interessante Kandidaten. In den nächsten Jahren ist mit interessanten Neuigkeiten zu rechnen.

Finanziell sehr interessant sind die technisch weniger hochwertigen Zeolithe, die bei der Waschmittelherstellung eingesetzt werden. Die Wasseraufnahme-Kapazität dieser Zeolithe ist vergleichsweise geringer, was durch ein größeres Speichervolumen kompensiert werden könnte. Die Preise dieser Zeolithe liegt mit ca. 500 Euro pro Tonne bei etwa 25% der hier untersuchten.

Mit Blick auf die energetische Amortisation eines saisonalen Sorptionsspeichers wäre die Verwendung von natürlichen Zeolithen sehr interessant, da hier die Energie für die Synthese der Zeolithe entfällt. Bezüglich der physikalischen Eigenschaften verhält es sich ähnlich wie mit den "Waschmittel-Zeolithen". Es ist von einer deutlich geringeren Energiespeicherdichte auszugehen. Der Preis dieser Zeolithe liegt mit ca. 350 Euro pro Tonne sehr günstig.

- Verbesserung der Monolith-Herstellung

Die Monolith-Herstellung ist derzeit noch zu arbeitsintensiv, um Mengen im Bereich mehrerer Kubikmeter herzustellen. Die notwendigen Verbesserungen liegen in der Trocknung des Material nach dem Austritt aus dem Extruder. Die Trocknung sollte am besten in einem direkt an die Extrusion anschließenden kontinuierlichen Verfahren statt finden (evtl. Mikrowellen-Straße). Die bisher durchgeführte Aktivierung der Monolithe (einmaliges Aufheizen auf ca. 180°C im Ofen) könnte entfallen, wenn nach der Installation des Sorptionsspeichers im Sommer des ersten Betriebsjahres eine solarthermische Desorption mit entsprechenden Temperaturen durchgeführt wird.

- Langzeitverhalten

Das Langzeitverhalten, die Zyklenstabilität und eine mögliche Deaktivierung durch unerwünschte Adsorption von anderen Luftbestandteilen sollte untersucht werden.

11.4 Vermessung einer Demonstrationsanlage

Nachdem die drei oben beschriebenen Forschungsschwerpunkte bearbeitet sind, sollte eine Erprobung des Verfahrens in einem realen Gebäude in Form einer Demonstrationsanlage erfolgen. Durch eine mehrjährige Insitu-Vermessung der Anlage können die notwendigen Erfahrungen gesammelt werden, die für eine Markteinführung der Technik erforderlich sind.

Kapitel 12

Zusammenfassung

Eineinhalb Jahre Forschung an dem Projekt MonoSorp haben es ermöglicht, aus der Idee für einen offenen Adsorptionsprozess als saisonalen Energiespeicher für die solarthermische Heizungsunterstützung eine funktionierende Versuchsanlage aufzubauen, mit der die Adsorption und die solarthermische Regeneration des Speichers unter realitätsnahen Bedingungen untersucht werden können.

Die Auslegung der Anlagen und der Komponenten war erfolgreich. Die Herstellung der zeolithischen Wabenkörper am Institut für Kunststofftechnologie war mit größeren personellen und maschinellen Schwierigkeiten verbunden, konnte aber letztlich zu einem guten Ende gebracht werden.

Die Beschaffung geeigneter Komponenten für den Betriebsdruck und die Betriebstemperatur war bis auf eine Ausnahme (Solarkreispumpe) mit keinerlei Schwierigkeiten verbunden. Beim Aufbau der Anlage traten Probleme bei der Abdichtung des Solarkreises und der Luftleitungen auf. Hier müssen eventuell zukünftig andere Techniken eingesetzt werden.

Der ursprünglich vorgesehene Zeitplan für die experimentellen Untersuchungen kam wegen der Verzögerung des Projektbeginns und den Lieferschwierigkeiten der Monolithe durcheinander. Experimente wurden daher erst an einer kommerzieller Kugelschüttung durchgeführt, später dann an den Monolithen. Für die Regeneration von letzteren musste allerdings wegen des beginnenden Winters ein elektrischer Kollektorsimulator eingebaut werden.

Die Versuchsergebnisse bestätigen die erwarteten Werte für die thermische Leistungsfähigkeit: mit Raumluftfeuchte kann eine für Heizzwecke ausreichende Temperaturerhöhung der Zuluft erfolgen.

Die stationäre Desorption mit elektrischem Heizstab zeigte, dass die Anlage richtig dimensioniert und die Anordnung der Komponenten zielführend ist: das Speichermaterial kann gleichmäßig auf die benötigte Temperatur gebracht werden. Aus den instationären Desorptionsexperimenten mit Heizstab bzw. Kollektoren konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden: erstens ist eine ausreichende Wärmedämmung des Speichers unabdingbar um einem zu großen Temperaturabfall zwischen den Aufheizphasen vorzubeugen. Zweitens zeigte sich die Wichtigkeit eines guten Wärmemanagements für eine effiziente Regeneration: die von der Solaranlage zur Verfügung gestellte Wärme muss je nach Temperatur den Speicherbereichen zur Verfügung gestellt werden, wo bei dieser Temperatur tatsächlich eine Regeneration stattfindet. Dies kann z.B. durch die Auteilung des Speichers in mehrere, voneinander unabhängig aufheizbare Bereiche, geschehen.

Die Darstellung einer vollständigen solarthermischen Regeneration der Monolithe steht noch aus.

Wie bei anderen Langzeitwärmespeichern ist ein Nachteil des hier vorgestellten Verfahrens die hohen Wärmegestehungskosten. Den größten Anteil daran hat das Speichermaterial. Zu diesem Zeitpunkt ist es noch nicht möglich, die Kosten für die Herstellung der extrudierten Wabenkörper in großtechnischem Maßstab zu beziffern. An zweiter Stelle steht das Kollektorfeld (20 m^2 Vakuumröhrenkollektoren); die Kosten aller anderen Komponenten (inkl. Speichergehäuse) sind vergleichsweise gering. Im

Gegensatz hierzu ist bei saisonalen Warmwasserspeichern das Speichermedium Wasser kein Kostenfaktor aber die Kosten für Behälter mit dem nötigen Volumen (ca. 10 m^3) sind nicht zu vernachlässigen.

Es wurde ein Simulationsprozess erarbeitet, mit der die Bestimmung der erzielbaren jährlichen Energieeinsparung und der thermischen Leistungsfähigkeit ermöglicht wird. Die thermische Leistungsfähigkeit konnte mit den Messergebnissen der Versuchsanlage validiert werden. Die wichtige Frage nach einer Regelstrategie für eine effiziente solarthermische Regeneration wurde in Parameterstudien in der Simulationsumgebung untersucht. Bestätigt wurden die Ergebnisse durch die experimentellen Untersuchungen.

Das Projekt Monosorp ist in der Subtask B "Thermo-Chemical and Sorption Storage Units" der IEA SHC Task 32 als einziger offener Sorptionsspeicher vertreten. Erste Ergebnisse dieser Subtask zeigen, dass für alle untersuchten Sorptionstechnologien noch ein großer Forschungsbedarf in Bezug auf Materialien mit höherer Energiespeicherdichte und verbesserte Anlagenkonzepte besteht. Im Jahr 2008 erscheint der Abschlussbericht der Task 32, in dem ein Vergleich der Ergebnisse der Simulationsstudien der beteiligten Technologien enthalten sein wird.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Entwicklung eines Wärmemanagements zur Regeneration, einer anwendungstauglichen Systemregelung und der Weiterentwicklung des Speichermaterials. Der nächste Schritt beinhaltet die Installation und Vermessung einer Demonstrationsanlage in einem Gebäude.

Kapitel 13

Ausblick

Erklärtes Ziel der Bundesregierung im Hinblick auf die Speicherung von Niedertemperaturwärme ist die "Entwicklung von langzeitstabilen Speichermedien mit hoher Energiedichte" als "mittelfristige Perspektive" bis 2015. Als "langfristige Perspektive" bis 2020-2025 werden "Energiespeicher (Latent- bzw. thermo-chemische Speicher) mit 4-8-facher Energiedichte im Vergleich zu heutigen Speichertechnologien" genannt [25].

Der hier vorgestellte thermo-chemische Speicher basierend auf einem offenen Adsorptionsverfahren ist ein vielversprechender Ansatz zur Realisierung dieser Ziele: mit kleiner Kollektorfläche, vergleichsweise geringem Speichervolumen sowie einfacher Verfahrenstechnik ist ca. die dreifache Energiespeicherdichte eines saisonalen Warmwasserspeichers erreichbar. Der aus den Simulationen berechnete solare Deckungsanteil beträgt mehr ca. 66% für die Wärmeversorgung eines Einfamilienhauses nach EnEV (7924 kWh Gesamtwärmebedarf, 20 m² Kollektorfläche, 10 m³ Speichervolumen).

Einige Punkte bedürfen jedoch noch weiterer Forschung. So weisen die hier untersuchten, aus Zeolith extrudierten Wabenkörper (Monolithe) zwar exzellente Adsorptionseigenschaften auf, haben aber im Vergleich zu einer Zeolith-Schüttung einen höheren Produktionsaufwand. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Kunststofftechnologie der Universität Stuttgart sollte eine Optimierung des Herstellungsprozesses erarbeitet werden. Darüber hinaus sind Regelstrategien und ein Speicherdesign für ein effizientes Wärmemanagement zur Speicherregeneration weiterzuentwickeln.

Wenn diese Arbeitspunkte erfüllt sind, kann im weiteren Verlauf ein Feldtest an einem Prototypen in einem Einfamilienhaus durchgeführt werden.

Parallel zu der Weiterentwicklung des Speichers aus extrudiertem Zeolith 4A, müssen andere Materialien im Hinblick auf ihre thermische Leistungsfähigkeit innerhalb eines Heizsystems und auf ihre solarthermische Regenerierbarkeit untersucht werden. Mit der Versuchsanlage, die im Laufe dieses Projekts am ITW aufgebaut wurde, ist der Grundstein für umfangreiche experimentelle Untersuchungen von offenen Adsorptions- und Desorptionsprozessen zur saisonalen solaren Heizungsunterstützung gelegt.

Literaturverzeichnis

- [1] AG Energiebilanzen. *Energiestatistik in Deutschland 2001*. Technischer Bericht, AG Energiebilanzen, VDEW-AA-Marketing, RWE Energie AG, IfE/TU München, 2002.
- [2] ARGE Solarwirtschaft. *Perspektiven der Solarwärme-Nutzung in Deutschland*. Parlamentarischer Abend der ARGE Solarwirtschaft, 2001.
- [3] J. Hammer und H.-G. Fritz. *Extrusion of zeolitic honeycomb structures using thermoplastic polymers as plasticising aid and binder*. Institut für Kunststofftechnologie der Universität Stuttgart, 2002.
- [4] S.Asenbeck. *Optimierung des Reflektordesigns eines Vakuumröhren-Kollektors*. Master's thesis, Diplomarbeit, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik Universität Stuttgart, 2002.
- [5] G. Gartler, D. Jähnig, G. Purkarthofer und W. Wagner. *Development of a High Energy Density Sorption Storage System*. Proceedings Eurosun, 2004. ISBN 3-9809656-0-0.
- [6] G. Eigenberger. *Regelmäßige Katalysatorformkörper für technische Synthesen*. VDI- Verlag Reihe 15, **Nr 12**, 1993.
- [7] V. Gnielinski. *Wärmeübergang bei der Strömung durch Rohre*, Kapitel VDI- Wärmeatlas, S. Gb1–Gb8. 1991.
- [8] G.J. Taylor. *Dispersion of Soluble Matter in Solvent Flowing Slowly through a Pipe*. Proc. Royal Soc. London, **219A**, 186–203, 1953.
- [9] H. Martin. *Wärmeübertragung*. Thieme Verlag Stuttgart/New York, 1988.
- [10] N. Nestle und R. Kimmich. *Über die Bedeutung von Diffusionsgrenzschichten bei Ionenaustauschvorgängen*. Heat and Mass Transfer, **32**, 9–15, 1996.
- [11] H. Kerskes. *NO_x-Speicherkatalysatoren und ihr Einsatz in Dieselfahrzeugen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 479, 2000.
- [12] L. Langer. *Numerische Simulation des thermischen Verhaltens von Solaranlagen zur kombinierten Brauchwassererwärmung und Raumheizung*. Master's thesis, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, 1996.
- [13] G. Stryi-Hipp, H. Kerskes, H. Drück und S. Bachmann. *Kombianlagen - Abschlussbericht des Projekts Solaranlagen zur kombinierten Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung*. 2001.
- [14] J.C. Hadorn (Hrsg.). *Thermal energy storage for solar and low energy buildings*. www.iea-shc.org Task 32, June 2005. ISBN 84-8409-877-X.
- [15] C. Bales, F. Setterwall und G. Bolin. *Development of the Thermo Chemical Accumulator*. Proceedings Eurosun, 2004. ISBN 3-9809656-0-0.

- [16] L.F. Cabeza, B. Zalba, J.M. Marín und H Mehling. *PCM-graphite matrix in flat plate encapsulates for low temperature applications*. 9th International Congress on Thermal Energy Storage (Futurestock), 2003.
- [17] <http://www.iwt.tugraz.at>.
- [18] J. Schultz. *Heat of fusion storage systems for combined solar systems in low energy buildings*. Proceedings Eurosun, S. 638–646, 2004. ISBN: 3-9809656-1-9.
- [19] H. Drück und H. Müller-Steinhagen. *Advanced Storage Concepts for Solar Combisystems*. Proceedings Eurosun, 2004. ISBN 3-9809656-0-0.
- [20] Andersen. *Investigations of solar combi systems*. ISES Solar world congress, Orlando, Florida, USA, 2005. ISBN: 0-89553-177-1.
- [21] M. Hampel, H. Drück und H. Müller-Steinhagen. *Solar-thermal goes CFD - An introduction of CFD and PIV into solar-thermal R&D*. Proceedings estec, Freiburg, Germany, 2005.
- [22] H. Mehling, L.F. Cabeza, S. Hippeli und S. Hiebler. *PCM-module to improve hot water heat stores with stratification*. Renewable Energy, **28**, 699–711, 2003.
- [23] *Laboratory Prototypes of Thermo-Chemical and Sorption Storage Units, A report of IEA SHC Task 32*. June 2007.
- [24] J. et al. Jänchen. *Studies of the water adsorption on Zeolites and modified mesoporous materials for seasonal storage of solar heat*. Solar Energy, S. 339 – 344, 2004.
- [25] *AG3-Bericht - Zusammenfassung*. Juni 2007.