

Thermochemischer Speicher mit Zeolith zum Heizen und Kühlen

Andreas Hauer

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung

Abteilung 4: Solarthermie und Biomasse

1. Einleitung

Ein offenes Adsorptionssystem, das in Verbindung mit der Umgebung steht, kann zur Speicherung thermischer Energie eingesetzt werden. In dieser Anwendung wird der Speicher während der Desorption geladen und während der Adsorption entladen. In offenen Systemen können nur Adsorptive benutzt werden, die in der Atmosphäre vorkommen. Wasserdampf ist hier am geeignetsten.

Hohe Energiespeicherdichten sind zu erwarten, da das Adsorptiv nach der Desorption (Ladung) in der Umgebung „gespeichert“ wird. Das System muss mit der Umgebung verbunden sein, um den entlassenen Wasserdampf wieder aufnehmen zu können. Diese Technik thermischer Energiespeicherung wird auch thermochemische Speicherung genannt.

Der zweifache Einsatz eines thermochemischen Speichers (TCS) zum Heizen im Winter und zur Klimatisierung im Sommer führt zu einer Erhöhung der Betriebsstunden des Systems und damit zu wirtschaftlichen Vorteilen. Ein TCS wurde in München zwischen dem Fernwärmenetz und einem Schulgebäude zum Beheizen und einem Jazz Club zum Kühlen installiert. Fernwärmenetze arbeiten oft an ihrer Kapazitätsgrenze. Adsorptionsspeicher sind in der Lage durch Lastausgleich das Netz besser zu nutzen und neue Verbraucher ohne Netzerweiterung anzuschließen. Die Demonstrationsanlage kann den Heizbedarf für einen Tag im Auslegungsfall (bei -16 °C Außentemperatur in München) für das Schulgebäude speichern.

Der Kühlbedarf von Gebäuden lässt sich in latente und die sensible Kühllast aufteilen. Der latente Kühlbedarf muss durch Luftentfeuchtung gedeckt werden, die sensible Kühlung wird durch Temperaturabsenkung der Gebäudeinnenflächen bzw. der Raumluft erreicht. Die üblichen Kühlsysteme mit geschlossenem Arbeitsmittelkreislauf entfeuchten Luft durch Taupunktunterschreitung. Dazu wird die Luft zunächst zur Entfeuchtung auf 6 °C abgekühlt und muss nach der Kondensation aus Komfortgründen wieder auf 18-20°C erwärmt werden. Mit offenen Sorptionssystemen dagegen, die den Wasserdampf direkt aus der Luft adsorbieren, lässt sich die Luftentfeuchtung auch bei Temperaturen um 18 °C bewerkstelligen. Für die sensible Kühlung der Luft sind Temperaturen von 16-18 °C optimal. .

2. Adsorptionsprozess

In Abbildung 1 sind schematisch De- und Adsorption in einem offenen System dargestellt. Bei einem offenen Sorptionssystem transportiert der Luftstrom die Wärme und den Wasserdampf in und aus der Adsorbenschüttung. Somit werden die Lufttemperatur und gleichzeitig der Wasserdampfpartialdruck des Luftstroms durch den Sorptionsprozess beeinflusst. Die umgesetzten Stoff- und Wärmemengen sind in Abbildung 1 angedeutet.

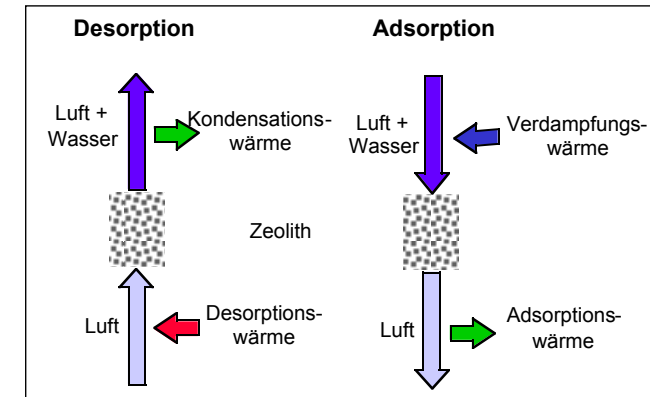


Abbildung 1: Offenes Adsorptionssystem

Bei der Desorption wird der Luftstrom durch eine von aussen eingebrachte Desorptionswärme erhitzt. Diese Wärme löst das gebundene Adsorbat (Wasser) im Adsorbens und verdampft es. Der Wasserdampf wird mit der nun abgekühlten Luft aus der Schüttung gebracht. Bei der Adsorption befördert der Luftstrom gasförmiges Adsorptiv (Wasserdampf) in die Adsorbenschüttung. Dort wird es adsorbiert und die Adsorptionswärme wird freigesetzt und an die Luft abgegeben. Die Luft verlässt die Schüttung nun trocken und heiß.

Für die Heizanwendung kann während der Adsorption die Adsorptionswärme und während der Desorption u.U. die Kondensationswärme genutzt werden. Die Verdampfungswärme muss während der Adsorption auf einem niedrigen Temperaturniveau zur Verfügung stehen. Für die Raumklimatisierung, die auf der Luftentfeuchtung beruht, kann nur während der Adsorption Nutzkälte bereitgestellt werden.

Wärmespeicherung wird realisiert, in dem der Desorptionsschritt von der Adsorption zeitlich (und/oder räumlich) getrennt wird. Das desorbierte Zeolith bleibt „geladen“ bis der Adsorptionsprozess gestartet wird.

2.1 Heizen

Um ein hohes Wärmeverhältnis für den Speicherbetrieb zu erreichen, muss die Kondensationswärme während der Desorption genutzt werden können und eine „kostenlose“ Niedertemperaturquelle für die Befeuchtung während der Adsorption muss zur Verfügung stehen.

Das thermochemische Speichersystem wird mit Fernwärme (Dampfnetz auf 130 °C in München) in Schwachlastzeiten geladen. Zu den Peak-Zeiten wird die Rücklaufleitung des Fernwärmenetzes (Kondensatleitung) zur Befeuchtung als Niedertemperaturquelle genutzt. So wird durch eine weitere Temperaturabsenkung des Kondensats die übertragene Leistung erhöht und die Netzverluste werden reduziert.

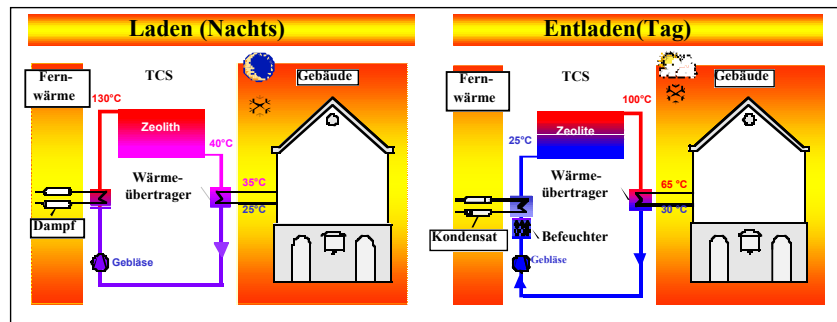


Abbildung 2: Thermochemischer Speicher zur Gebäudeheizung

Abbildung 2 zeigt schematisch De- und Adsorption des Speichers. Nachts wird der Speicher mit 130 °C aus dem Fernwärmenetz geladen. Damit wird eine Restbelastung von ca. 8 % Wasser im Zeolith erreicht. Die feuchte Luft verlässt den Speicher mit ca. 40 °C, wird in einem Wärmetauscher zu Kondensation gebracht und kann durch diese Nutzung der Kondensationswärme ein zu starkes Auskühlen der Schule über Nacht verhindert werden.

Der Speicher wird dann zu den Spitzenlastzeiten entladen. Die Luft wird in einem Befeuchter auf ca. 25 °C mit Wasserdampf gesättigt. Die hierzu benötigte Verdampfungswärme wird von der Kondensatleitung des Fernwärmenetzes geliefert. Diese Luft wird dann durch die desorbierte Zeolithschüttung geblasen. Dabei wird die Luft getrocknet und durch die frei werdende Adsorptionswärme auf ca. 100 °C erhitzt. Die heiße Luft gibt ihre thermische Energie über einen Wärmeübertrager an das Heizungssystem der Schule ab.

2.2 Kühlen

Um einen Zeolithspeicher als Klimagerät einsetzen zu können, mussten zwei zusätzliche Komponenten installiert werden. Abbildung 3 zeigt das komplette System schematisch. Ein solcher Aufbau wird im allgemein als „desiccant cooling system“ bezeichnet.

Abbildung 3 zeigt neben dem TCS eine „Kälterückgewinnungseinheit“ und einen Zuluftbefeuchter. Der heiße und trockene Luftstrom aus dem TCS muss zunächst abgekühlt werden, bevor er im Zuluftbefeuchter adiabat auf die gewünschte Zulufttemperatur und Feuchte gebracht werden kann.

Die Kälterückgewinnung besteht aus einem Abluftbefeuchter mit einem integrierten Wärmeübertrager, der mit dem Zuluftwärmeübertrager über ein Kreislaufverbundsystem verbunden ist. Diese Komponente kann als indirekter Verdunstungskühler beschrieben werden. Durch die hohen Temperaturen nach der Adsorption wird der kühlende Verdampfungsprozess in die Abluft sehr effektiv unterstützt. Es können 83 % der maximal möglichen Enthalpiedifferenz von der Ab- an die Zuluft übertragen werden.

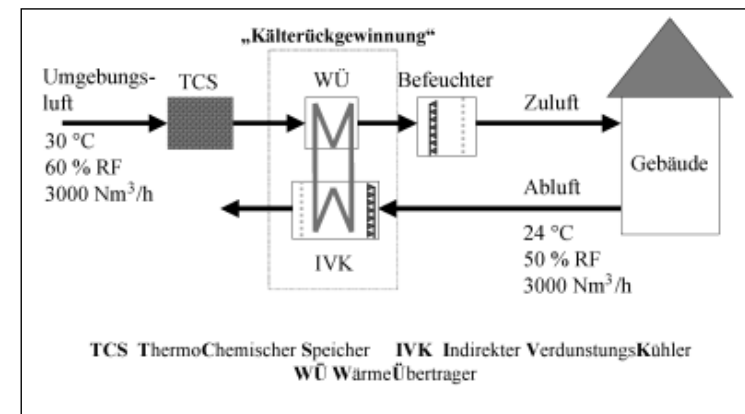


Abbildung 3: Thermochemischer Speicher zur Klimatisierung

3. Adsorptionssystem

3.1 Thermochemischer Speicher

Der thermochemische Speicher ist auf eine Heizleistung von 95 kW über 14 Stunden pro Tag ausgelegt. Dafür wurden 7000 kg Zeolith im Speicherbehälter untergebracht. Der Tank besteht aus drei zylindrischen Modulen (siehe Hintergrund in Abbildung 4).

Der Speicher ist mit einem kombinierten Radiator-/Fußboden-Heizungssystem verbunden. Die maximale thermische Leistung beträgt 130 kW bei einem Luftvolumenstrom von 6000 m³/h durch die Zeolithschüttung und die Speicherkapazität 1300-1400 kWh bei einer Desorptionstemperatur von 130 °C [A. Hauer and W. Schölkopf, (2000)].

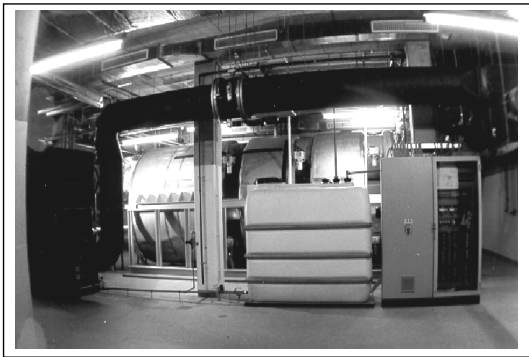


Abbildung 4: Thermochemisches Speichersystem

3.2 Gebäude

Der TCS wurde in einem Schulgebäude in München 1996 installiert. Die Schule hat mit einer Fläche von 1625 m² einen spezifischen Heizwärmebedarf von 65 kWh/m² a. Sie ist an das Fernwärmenetz angeschlossen. Der Speicher liegt in den Kellerräumen unter der Schule. Die Schule befindet sich in einer ehemaligen Brauerei. In den ehemaligen Lagerkellern für das Bier befindet sich heute ein Jazzclub, der über einen erheblichen Kühlbedarf verfügt. Der Club hat eine Fläche von 160 m² und ein Rauminhalt von 800 m³. Maximal befinden sich ca. 200 Menschen in diesem Raum. Eine maximale Kühlleistung von 30 kW wurde berechnet. Sie setzt sich, aufgrund der hohen Personenzahl, aus 73 % latenter und 27 % sensibler Kühllast zusammen.

4. Ergebnisse der Demonstrationsanlage

4.1 Heizen

Anfang 1997 wurde mit dem vollautomatischen Betrieb der Heizanwendung begonnen. Seitdem können die geforderten Raumtemperaturen und Heizleistung von dem Zeolithspeicher bereitgestellt werden. Die Regelungstechnik wurde kontinuierlich verbessert.

Das Wärmeverhältnis des TCS ist als das Verhältnis der Nutzwärme zu der aufgewandten Desorptionswärme. Als Nutzwärme wurde die tatsächlich an das Heizungssystem abgegebene Wärmemenge gemessen, die alle bis dahin auftretenden Verluste berücksichtigt. Die experimentell erreichte Energiespeicherdichte ist diese Nutzwärme bezogen auf das Volumen der Zeolithschüttung. Tabelle 1 zeigt die experimentell erreichten Ergebnisse im Vergleich mit den theoretisch erreichbaren Werten [Hauer, A. (2000)].

Wärmeverhältnis (COP _{Heiz})	
Theoretischer COP _{Heiz}	1,07
Experimenteller COP _{Heiz}	0,92
Energiespeicherdichte (ρ _O)	
Theoretische ρ _O	153 kWh/m ³
Experimentelle ρ _O	124 kWh/m ³

Tabelle 1: Wärmeverhältnis und Energiespeicherdichte beim Heizen

Tabelle 1 zeigt, dass 86 % des theoretischen Maximums für das Wärmeverhältnis und 81 % für die Energiespeicherdichte experimentell erreicht werden konnten.

4.2 Klimatisieren

Simulationen des Sorptionsprozesses haben ergeben, dass Desorptionstemperaturen unterhalb der möglichen 130°C aus dem Fernwärmenetz zu höheren Wärmeverhältnissen für die Klimatisierung (COP_{Kühl}) führen können. Versuche mit 130 °C, 100 °C und 80 °C wurden durchgeführt. Es wurden zwei verschiedene Wärmeverhältnisse für die Entfeuchtung und die Klimatisierung definiert.

$$\text{COP}_{\text{Entfeucht}} = \frac{Q_{\text{Entfeucht}}}{Q_{\text{Des}}} \quad \text{and} \quad \text{COP}_{\text{Kühl}} = \frac{Q_{\text{Kühl}}}{Q_{\text{Des}}}$$

mit Q_{Des} als Desorptionswärme, wobei $Q_{Entfeucht}$ und $Q_{Kühl}$ wie folgt definiert sind:

$$Q_{Entfeucht} = \int_{t_i}^{t_f} \Delta H_{Entfeucht} \cdot \dot{m}_{Luft} \cdot dt \quad Q_{Kühl} = \int_{t_i}^{t_f} \Delta H_{Kühl} \cdot \dot{m}_{Luft} \cdot dt$$

$\Delta H_{Entfeucht}$ ist die Enthalpiedifferenz des Luftstroms, die durch die Adsorption in der Zeolithschüttung alleine verursacht wurde. $\Delta H_{Kühl}$ bezieht den Kühleffekt durch den indirekten Verdunstungskühler mit ein (siehe Abbildung 3). Die Energiespeicherdichte ρ_Q ist die nutzbare Kühlenergie pro Volumen Zeolith. Die Ergebnisse für $COP_{Kühl}$, $COP_{Entfeucht}$ und ρ_Q sind für die verschiedenen Desorptionstemperaturen in Tabelle 2 aufgeführt [Hauer, A. (2001)].

Desorptionstemperatur	130 °C	100 °C	80 °C
$COP_{Entfeucht}$	0,45	0,48	0,5
$COP_{Kühl}$	0,67	0,80	0,87
ρ_Q	168 kWh/m ₃	105 kWh/m ₃	100 kWh/m ₃

Tabelle 2: Wärmeverhältnis und Energiespeicherdichte beim Klimatisieren

Das höchste Wärmeverhältnis konnte bei einer Desorptionstemperatur von 80 °C erreicht werden. Bei tieferen Temperaturen konnte fast keine Entfeuchtung mehr während der Adsorption beobachtet werden.

Zwischen den Werten für $COP_{Entfeucht}$ und $COP_{Kühl}$, ist ein deutlicher Unterschied zu verzeichnen, der durch die „Kälterückgewinnung“ zustande kommt. Die hohen Austrittstemperaturen aus dem TCS während der Adsorption unterstützen den Verdampfungsprozess im indirekten Verdunstungskühler sehr effektiv. Bei einer Desorptionstemperatur von 80 °C können 87 % der eingespeicherten Fernwärme als Kühlenergie an den Jazz Club abgegeben werden.

Abbildung 5 zeigt den gemessenen Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf im Jazz Club während ausverkaufter Konzerte mit und ohne Kühlung durch den TCS. Im ungekühlten Fall steigen Temperatur und Feuchtigkeit über das gesamte Konzert kontinuierlich an (nach ca. 1,5 h gab es eine kurze Pause, in der die Feuchtigkeit leicht abfiel). Die bestehende Lüftungsanlage war nicht in der Lage den Kühlbedarf zu decken. Die Höchstwerte der Temperatur von fast 20 °C und 74 % relativer Feuchte sind weit außerhalb der Behaglichkeitsbereichs (26 °C / 50%). Mit Einsatz des TCS zur Klimatisierung konnten die Werte über das ganze Konzert im Behaglichkeitsbereich gehalten werden.

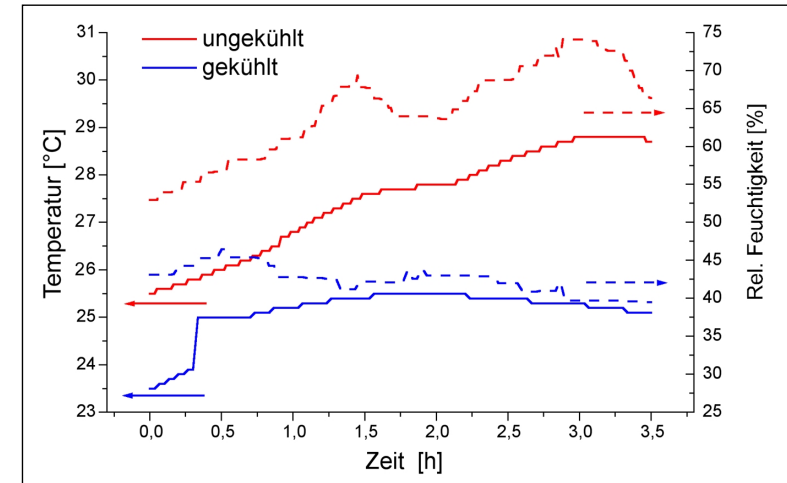


Abbildung 5: Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Jazz Club

5. Wirtschaftliche Betrachtung

Entscheidend für die ökonomische Beurteilung eines thermischen Speichers ist der Preis pro gespeicherte Nutzwärme, d.h. der Energieumsatz pro Jahr in kWh. Es ist leicht zu sehen, dass die Zahl der Zyklen – Laden und Entladen – pro Jahr sich linear auf dieses Verhältnis auswirkt. Durch die zusätzliche Anwendung „Klimatisierung“ konnte die Zahl der Speicherzyklen, die bisher nur mit der Heizanwendung erreicht werden konnten, deutlich erhöht werden. Bei einer Verkleinerung des Speichers, die nach heutigem Kenntnisstand sinnvoll erscheint, sind Zyklenzahlen von ca. 150 pro Jahr für die Heizung zu erreichen. Eine Abschätzung der Zyklenzahl für die Raumklimatisierung hängt stark von dem konkreten Objekt ab. Im vorliegenden Fall des Jazzclubs „Unterfahrt“ in München hängt der Kühlbedarf in erster Linie von den Besucherzahlen ab. Unter Umständen ist auch im Winter bei gut besuchten Konzerten eine Kühlung der Räume notwendig. Es kann hier mit einer Zyklenzahl von ca. 100 gerechnet werden.

Die Lebensdauer der Anlage wird bestimmt durch die hydrothermale Stabilität des Zeoliths, die Korrosionsfestigkeit des Speicherbehälters und der konventionellen Komponenten aus der Heizungs- und Lüftungstechnik. Die hydrothermale Stabilität des Zeolith 13X wurde über 400 Lade-/Entladezyklen unter wesentlich schärferen Adsorptions- und Desorptionsbedingungen als im bestehenden System untersucht. Es zeigte sich, dass die Adsorptionsfähigkeit von Zeo-

lith 13X bezüglich Wasserdampf nach ungefähr 100 Lade-/Entladezyklen um 15 % gegenüber dem Ausgangswert gefallen ist. Die folgenden 300 Zyklen führen zu keinen signifikanten Veränderungen [Spehr, J. (1992) / Hauer A. and Engelhardt M. (1999)]. Im Dauerbetrieb ist eine Probenentnahme des Zeoliths aus dem Speicherbehälter im Abstand von 4-5 Jahren ausreichend, um die Veränderung des Materials zu überprüfen. Der Speicherbehälter zeigt keinerlei Korrosionsspuren; aufgrund des gewählten Edelstahls kann hier, ebenso wie bei bekannten heizungs- und lüftungstechnischen Komponenten, sicher von einer Lebensdauer von 20 Jahren und mehr ausgegangen werden.

Wirtschaftlich kann ein thermischer Speicher nur arbeiten, wenn durch ihn thermische Energie zum Ladezeitpunkt oder -ort günstiger zur Verfügung steht, als zum Zeitpunkt oder Ort der Nutzung. Im vorliegenden Projekt geht es um eine Reduzierung der Spitzenlast im Fernwärmenetz der Stadt München und damit um eine zeitliche Verschiebung zwischen Lade- und Entladevorgang. Mit den Stadtwerken München wurde für die Heizanwendung vereinbart Fernwärme für den Ladeprozess nur zu festgelegten Schwachlastzeiten zu entnehmen. Dafür wird lediglich der Arbeitspreis berechnet und auf den Anteil für die Leistungsbereitstellung verzichtet. Damit ergibt sich in München ein Preisnachlass für die Fernwärme in der Heizperiode von ca. 50 €/MWh auf 30 €/MWh durch den Einsatz des Speichers.

Für die Nutzung der Fernwärme zur Raumklimatisierung kann von höheren Preisnachlässen ausgegangen werden. Im Sommer ist im allgemeinen der Fernwärmeverbrauch stark reduziert. Die Stromproduktion durch Kraft-Wärme-Kopplung ist gesetzlich subventioniert, was dazu führt, dass eine Fernwärmeabnahme im Sommer für die Kraftwerksbetreiber sehr interessant ist.

Auf der Grundlage der Kosten für die bestehende Zeolithspeicheranlage für Heizzwecke alleine können spezifische Investitionskosten für einzeln angefertigte Speicher abgeschätzt werden. Bezogen auf die installierte Speicherkapazität lassen sich Werte von 42.500 €/MWh (Behälter 20.000 €/MWh, 7 t Zeolith 7.500 €/MWh, hydraulische und lüftungstechnische Komponenten 15.000 €/MWh) sowie Festkosten von 7.500 €/Anlage für die Regelung ermitteln. Dies bedeutet je nach Anlagengröße (ab 0,5 MWh Speicherkapazität) Investitionskosten von 42.500 – 57.500 €/MWh. Ein weiteres Potential zur Kostenreduktion (ca. Faktor 0,5) ergibt sich bei einer Fertigung in kleinen Serien. Der angestrebte Rahmen von 22.500 – 42.500 €/MWh erscheint damit erreichbar. In der Abschätzung wird für die 1,2 MWh-Anlage ein Preis von € 40.000.- angesetzt.

Der thermochemische Speicher zur ausschließlichen Heizanwendung hatte einen Amortisierungszeitraum von 12,7 Jahren. In diesem Fall wurde von reduzierten Investitionskosten von € 40.000.- ausgegangen. Durch die Hybridnutzung – Heizen und Kühlen – konnte das Gesamtsystem in wirtschaftlicher Hinsicht deutlich verbessert werden.

Die Kosten für die zusätzlichen Komponenten der Klimatisierung können nach dem durchgeführten Vorhaben abgeschätzt werden. Für die Kälterückgewinnung und die Zuluftbefeuchtung werden Kosten von ca. 20.000 € pro MWh Speicherkapazität der Klimatisierungsanwendung angesetzt. Dabei trägt die Kälterückgewinnung (im vorliegenden Fall als Kreislaufverbundsystem mit Abluft-Verdunstungskühler und Zuluft-Kühler) 2/3 der Kosten bei. Die Kälterückgewinnung kann günstiger ausfallen, wenn Zu- und Abluft in einem Luft-Luft-Wärmeübertrager mit integriertem Verdunstungskühler in der Abluft zusammengeführt werden können. Der Zuluftkühler muss den hygienischen Anforderungen an die Raumluft genügen und ist kommerziell erhältlich.

Abbildung 6 zeigt schematisch eine Abschätzung der Gesamtkosten für ein thermo-chemisches Speichersystem über einen Zeitraum von 5 Jahren. In dieser Darstellung soll nicht so sehr auf die Genauigkeit der abgeschätzten Beträge abgehoben, als vielmehr auf den Einfluss der einzelnen Faktoren auf das Gesamtergebnis dargestellt werden.

Als Ausgangsgröße werden Fernwärmepreise für die Heizanwendung (linke Seite der Darstellung) und die Raumklimatisierung (rechte Seite der Darstellung) angegeben. Der Preis für die Heizanwendung (30 €/MWh) ist bereits mit den Stadtwerken München ausgehandelt, der für die Klimatisierung (15 €/MWh) ist eine Annahme.

Der angegebene Preis der Antriebwärme wird nun durch das zu erwartende Wärmeverhältnis für den Heizbetrieb ($COP_{th}=0,92$) und die Klimatisierung ($COP_{th}=0,86$) geteilt. Damit errechnet sich der Preis der Nutzenergie zu 33 €/MWh bzw. 18 €/MWh.

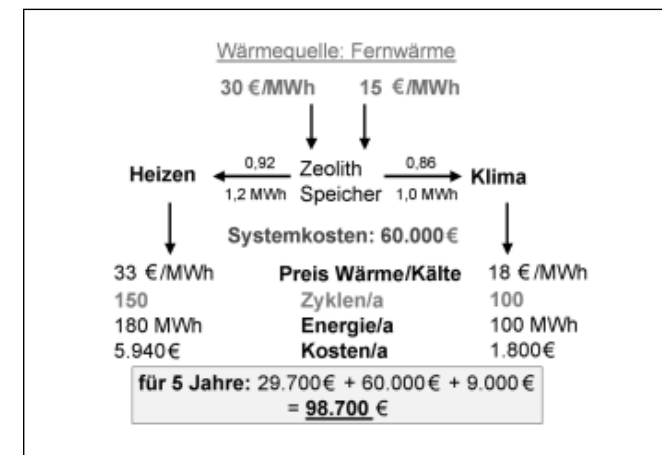


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Kostenabschätzung der Anschaffungs- und Betriebskosten über 5 Jahre für ein thermochemisches Speichersystem

Mit der experimentell ermittelten Speicherkapazität von 1,2 MWh zum Heizen und 1,0 MWh zum Kühlen und den angenommenen Zyklenzahlen (150 Zyk./a bzw. 100 Zyk/a) lassen sich die pro Jahr bereit gestellten Nutzenergien und damit die jährlichen Energiekosten berechnen. Diese liegen bei € 5.940.- für das Heizen und € 1.800.- für die Klimatisierung pro Jahr und damit bei € 29.700.- und € 9.000.- über einen Zeitraum von 5 Jahren. Addiert man dazu die geschätzten Investitionskosten von insgesamt € 60.000.-, ergeben sich Gesamtkosten, die Investition plus 5 Jahre Betrieb des Speichers, von € 98.700.-.

Die in Abbildung 6 grau gedruckten Kosten sind für die Berechnung der Gesamtkosten ausschlaggebend. D.h. das Potenzial für den Einsatz eines thermochemischen Speichersystems muss nach diesen Kriterien abgeschätzt und optimiert werden. Die Anwendung sollte möglichst große Preisvorteile durch die Speicherung an sich bieten, d.h. die Kosten für die Antriebsenergie sollten aufgrund der Speichermöglichkeiten stark reduziert sein. Die Investitionskosten sollten durch kompakte Konstruktion und optimierte Auslegung minimiert werden. Die Anwendung sollte eine hohe Zyklenzahl im Heiz- und Kühlbetrieb benötigen. Falls, wie im vorgestellten Beispiel, die Klimatisierung günstigere Preise für die Antriebsenergie verspricht, sollte auf eine hohe Zyklenzahl beim Klimatisieren geachtet werden.

Um die Wirtschaftlichkeit eines thermochemischen Speichersystems mit einem konventionellen System zum Heizen und Kühlen vergleichen zu können, wurde eine analoge Abschätzung wie in Abbildung 6 auch für ein Vergleichssystem durchgeführt (siehe Abbildung 7). Das Vergleichssystem stellt eine wirtschaftlich sehr günstige Variante für das gleiche Verbrauchsprofil dar.

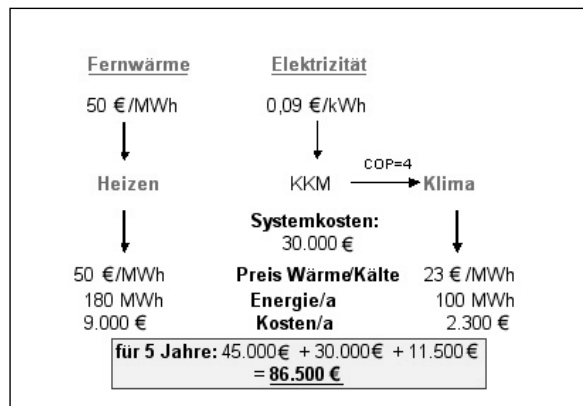


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Kostenabschätzung der Anschaffungs- und Betriebskosten über 5 Jahre für ein thermochemisches Speichersystem

Für die Gebäudeheizung wird in Abbildung 7 direkt Fernwärme eingesetzt. Damit sind für das System keine Investitionskosten verbunden (der Wärmeübertrager von der Fernwärme zum Heizsystem wurde in beiden Fällen nicht mitgerechnet). Es muss allerdings der volle Leistungs- und Arbeitspreis von derzeit ca. 100 €/MWh gezahlt werden. Auch in Abbildung 7 ist links die Heizung und rechts die Klimatisierung dargestellt.

Für die Kühlung wird eine elektrisch angetriebene Kompressionkältemaschine genutzt. Als Investitionskosten werden, bei gleicher Auslegung wie für das Sorptionssystem, Investitionskosten von 30.000 € in Ansatz gebracht. Die Kältemaschine arbeitet mit einem COP von 4. Als Preis für die elektrische Antriebsenergie werden 0,09 €/kWh angenommen. Damit ergibt sich ein Preis für die bereit gestellte Klimatisierungsenergie von 23 €/MWh.

Unter der Annahme der Zyklenzahlen für den Heiz- und Kühlbetrieb wie in Abbildung 7 für das Sorptionssystem ergeben sich die Kosten für den fünfjährigen Betrieb von € 45.000.- für das Heizen und € 11.500.- für die Klimatisierung. Zusammen mit den Investitionen für die Kältemaschine ergeben sich Gesamtkosten von € 86.500.-.

Das thermochemische Speichersystem zum Heizen und Klimatisieren liegt beim Vergleich mit einem konventionellen System mit den gleichen Spezifikationen bzgl. der Anschaffungs- und Betriebskosten über 5 Jahre in der gleichen Größenordnung. Das Zeolithspeichersystem würde bei längerer Laufzeit gegenüber dem konventionellen System weiter aufholen. Bei einer Laufzeit von mehr als 8 Jahren bietet das Sorptionssystem bei den hier zugrunde gelegten Randbedingungen wirtschaftliche Vorteile gegenüber konventionellen Lösungen. Unter der Berücksichtigung der Einsparpotenziale der in Abbildung 6 farblich gekennzeichneten Größen, kann mit einem sorptiven Speichersystem durchaus ein wirtschaftlich konkurrenzfähiges Produkt entwickelt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Demonstrationsanlage des thermochemischen Speichers lieferte Ergebnisse, die in guter Übereinstimmung mit den theoretisch berechneten Werten liegen. Die Regelungsstrategien wurden kontinuierlich verbessert. Sie müssen aber auch weiterhin angepasst und vor allem vereinfacht werden.

Eine grobe Betrachtung der Wirtschaftlichkeit zeigt, dass die Amortisationszeit stark von der zu erzielenden Preisreduktion für die thermische Energie zu Schwachlastzeiten, von den Investitionskosten und von der Zyklenzahl des Speichers abhängt. Unter der Annahme, dass der Preis pro MWh Fernwärme in Lasttälern im Winter 40 % und im Sommer 60 % günstiger ist, die Investitionskosten für das beschriebene System 60.000 € betragen und 150 Speicherzyklen in Heiz- und 100 im Kühlbetrieb gefahren werden, ergibt sich eine Amortisationszeit von 7-8

Jahren. Dies zeigt, dass thermochemische Wärmespeicher in naher Zukunft aufgrund ihres Entwicklungspotentials konkurrenzfähig werden können.

Literatur

A. Hauer and W. Schölkopf, (2000)

Thermochemical Energy Storage for Heating and Cooling –
First Results of a Demonstration Project,
8th International Conference on Thermal Energy Storage TERRASTOCK 2000,
August, 2000, Stuttgart, Germany

Hauer, A. (2000)

Heating, Cooling and Heat Storage in Open Sorption Systems for Residential Use
Proceedings of the Second Pacific Basin Conference on Adsorption Science and Technology,
May 14-18, 2000, Brisbane, Australia.

Hauer, A. (2001)

Thermal Energy Storage with Zeolite for Heating and Cooling Applications
Proceedings of the 2nd International Heat Powered Cycles Conference,
Paris, France, 5.-7. September 2001.

Hauer A. and Engelhardt M. (1999)

Stability of Zeolites in Open Cycle Sorption Processes,
Proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference (ISHPC),
March 24-26, 1999, Munich, Germany.

Spehr, J. (1992)

Energiespeicherung im Adsorptionssystem Zeolith / Wasserdampf –
Untersuchung zur Zyklusstabilität
Diplomarbeit,
Ludwig-Maximilians-Universität, Sektion Physik, München 1992.

