

Mobile Wärmespeicher zur Effizienzsteigerung bei Biogasanlagen

Projekt im Rahmen der Förderung aus dem Innovationsfond
Klima- und Wasserschutz der badenova AG & Co. KG

Abschlussbericht

Projektleitung:

Prof. Alfred Isele

Prof. Elmar Bollin

Offenburg, Dez. 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines	3
2	Stand der Technik Technologien zur Wärmespeicherung und Wärmeträgern.....	4
3	Wärmetransportsysteme	13
3.1	Logistikkonzept.....	13
3.2	Wärmequellen	15
3.2.1	Niedertemperatur	15
3.2.2	Mitteltemperatur	16
3.2.3	Hochtemperatur	16
3.3	Wärmesenken	16
3.3.1	Geringer Leistungsbedarf	17
3.3.2	Mittlerer Leistungsbedarf	17
3.3.3	Hoher Leistungsbedarf.....	18
3.3.4	Ausgewählte Abnehmer.....	18
4	Bewertung der Systeme Wärmeträger – Transportsystem	20
5	Untersuchungen zum Zeolithspeicher.....	22
5.1	Zeolithe.....	22
5.2	Experimentelle Voruntersuchungen.....	23
5.3	Pilotanlage.....	26
5.4	Vorarbeiten.....	28
6	Wirtschaftlichkeitsberechnung	29
6.1	Zeolithwärmespeicher	29
6.2	Latentwärmespeicher	29
6.3	Wärmequelle (BHKW Neuried).....	29
6.4	Wärmelogistik.....	31
6.5	Wärmeabnehmer.....	31
6.6	Kalkulationsgrundlagen	32
6.6.1	Kapitalgebundene Kosten.....	32
6.6.2	Bedarfsgebundene Kosten.....	32
6.6.3	Betriebsgebundene Kosten.....	33
6.6.4	Sonstige Kosten.....	33
6.7	Wirtschaftlichkeitsberechnung Mobile Wärme.....	33
7	Zusammenfassung.....	36
8	Literaturverzeichnis	37

1 Allgemeines

Das Ziel des Forschungsprojekts liegt in der Untersuchung des wirtschaftlich sinnvollen Einsatzes mobiler Wärmespeicher unter Verwendung und Weiterentwicklung heute verfügbarer Technologien.

In der Industrie entstehen bei unterschiedlichen Prozessen Wärmepotentiale, die nur geringfügig für eigene Zwecke genutzt werden. Das Potential ist jedoch so hoch, dass eine weitergehende Nutzung sinnvoll ist. Besonders interessant sind dabei Biogasanlagen (85 °C) und Stahlwerke (bis 1000 °C).

Als Modellansatz ist laut Projektantrag die Abwärme der Biogasanlage Neuried zur Verwendung wie folgt vorgesehen:

- Ganzjährig zur Versorgung eines Schwimmbades der Klosterschulen Offenburg
- Von Oktober bis April zur Versorgung von Gewächshäusern ebenfalls in Anlagennähe

Hierzu sollen vier Speicher eingesetzt werden, die wechselseitig beladen werden. Der Transport ist entweder über einen externen Spediteur oder durch die Wärmeabnehmer selbst durchzuführen.

Latentwärmespeicher sind inzwischen ausgereift und funktionieren zuverlässig. Die Anwendung ist relativ einfach und inzwischen ausgereift. Es wurde auch dargelegt, dass mit einem mobilen Speicher auf Basis von Zeolithen die transportierte Energiemenge von 2,5 MWh auf 3,5 MWh oder mehr erhöht werden kann. Für die Beladung von Zeolithen werden höhere Temperaturen der Wärmequelle benötigt. Diese höheren Temperaturen kann das BHKW Neuried ebenfalls zur Verfügung stellen. Aus diesem Grund wird untersucht, wie ein mobiler thermochemischer Speicher zu realisieren ist.

Wärme kann auch in sogenannten thermochemischen Speichern, die auf dem System Zeolith – Wasser basieren. Anfallende Abwärme wird genutzt, um das adsorbierte Wasser aus den Zeolithen zu desorbieren (Trocknen der Zeolithe). Die unbeladenen Zeolithe können dann durch Zugabe von Wasser die Adsorptionswärme wieder frei setzen. Auch diese Systeme sollen in dieser Studie erläutert und bewertet werden.

2 Stand der Technik Technologien zur Wärmespeicherung und Wärmeträgern

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik in Bezug auf mobile thermische Speichertechnologien zur Abwärmenutzung dargelegt. Alle bisher verfügbaren thermischen Speicher können dazu in drei unterschiedliche Kategorien unterteilt werden. Diese sind die sensiblen, latenten und thermochemischen Wärmespeicher. Diese Kategorien entstehen durch das unterschiedliche thermodynamische Prinzip der Speicherung. Bei der Auswahl der Speicher gibt es zudem unterschiedliche Kriterien, die nachfolgend kurz skizziert werden:

Anforderungen an das Speichermaterial

- hohe Energie- und Wärmekapazität
- hohe Wärmeleitfähigkeit: um einen effizienten Speicherprozess zu ermöglichen
- geringe Druck- und Volumenänderung, um aufwendige Ausgleichsbehälter und –systeme zu vermeiden
- hohe Zyklenstabilität
- Toxikologie: ungiftige Stoffe in der Herstellung und Anwendung, die keine Umweltgefährdung darstellen
- nicht korrosiv

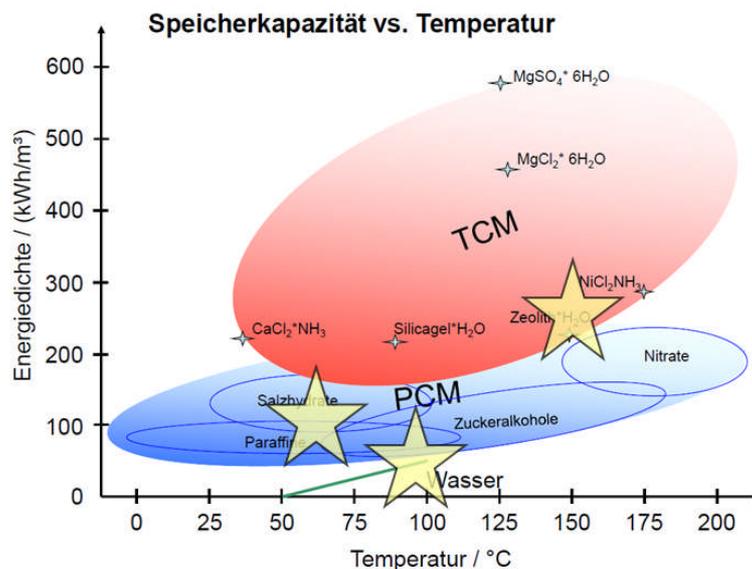


Abbildung 1: Speicherkapazität vs. Mutz-Temperatur von sensiblen, latenten und thermochemischen Speichern [1, 12]

Kapazität und Energiedichte: Anstreben einer möglichst hohen Kapazität, um so bei minimalem Platzbedarf eine maximale Energiemenge speichern zu können. **Abbildung 1** zeigt die Energiedichte verschiedener sensibler (Wasser), latenter (latente Speicher in Verbindung mit PCM) und thermochemischer Speicher auf. Die in diesem Bericht näher untersuchten Speichermaterialien sind in Abb. 1 durch Sterne gekennzeichnet.

Lade- und Entladeleistung: Sinnvoll ist eine möglichst hohe Be- und Entladeleistung. Die Be- und Entladezeit des Speichers hängt somit von dieser Größe ab.

Platzbedarf und Abmessungen: Ein Transport mit standardisierten Containern wäre am einfachsten. Es ist auch zu bedenken, dass Rangierflächen für den Transport einzukalkulieren sind.

Umweltverträglichkeit: Sowohl bei der Herstellung der Behälter als auch bei den Speichermedien ist auf Umweltverträglichkeit zu achten. Ebenso muss auf die Recyclingfähigkeit der Speicher und deren Inhalt geachtet werden, damit keine hohen Kosten für die Entsorgung nach deren Lebensdauer entstehen.

Vorkehrungen für die Aufstellung: Verschiedene Vorkehrungen, wie bspw. Fundamente, Platz für die Aufstellung, befestigte Flächen und Überdachungen müssen mit geplant werden.

Wärmeverluste: Durch die große Differenz von gespeicherter Wärme zur Umgebungstemperatur können bei schlechter Isolierung erhebliche Wärmeverluste entstehen. Es sollte darauf geachtet werden, dass der Speichercontainer ausreichend isoliert ist, um so die Wärmeverluste möglichst gering zu halten.

Wartungsintensität und Wartungskosten: Je nach Speicherart und Hersteller werden unterschiedliche Wartungsintervalle und damit verbundenen Wartungskosten für ein Speichersystem fällig.

Wirkungsgrad: Das Verhältnis eingespeicherte Energie zu entnommener Energie sollte so hoch wie möglich sein.

Zyklen Anzahl pro Jahr: Die Anzahl der Zyklen pro Jahr wird durch die Zyklen Dauer wesentlich bestimmt. Am wirtschaftlichsten ist eine hohe Zyklen Anzahl.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Parameter der verschiedenen in Frage kommenden Speichertechnologien. Die Ladetemperatur von 85°C bzw. 250°C wird bestimmt durch die Wärmequelle des BHKW Neuried. Das Speichervolumen ist begrenzt durch das Gesamtgewicht eines LKW's.

Tabelle 1: Übersicht verschiedener Speichertechnologien mit ihren charakteristischen Parametern

Speicherprinzip	Sensibel	PCM	Sorption
Speichermedium	Wasser	Sodium Acetat Trihydrat	Zeolith 13X
Ladetemperatur	85 °C	85 °C	150 - 250°C
Entladetemperatur	50 °C	50 °C	20 – 250 °C
Unteres Temperaturlimit	35 °C	35 °C	20 °C über Umgebungstemperatur
Kapazität/20“Container	1,0 MWh	2,5 MWh	3,5 MWh
Speichervolumen	25 m ³	17 m ³	19 m ³
Lade-/Entladezeit	1,5 h	10 h / 20 h	3 h

Sensible Wärmespeicher

Sensible Wärmespeicher verändern beim Be- und Entladevorgang ihre fühlbare Temperatur, d.h. je mehr Energie dem Medium zugeführt wird, desto höher steigt die messbare Temperatur.

Thermoöl

Thermoöle werden auf Mineral- und synthetischer Basis angeboten. Einige Sorten haben eine starke Volumenausdehnung bei Temperaturerhöhungen, somit ist auf eine ausreichende Speicher- und Transportkapazität zu achten.

Bei Thermoölen liegt die Obergrenze der Wärmespeicherung bei 320 °C (sortenabhängig) und bei einer Untergrenze von 60 °C. Die Wärmekapazität beträgt (auch sortenabhängig) 2,69 kJ/kg K. Die Thermoöle haben eine Speicherdichte von ca. 200 kWh_{th}/t.

Thermoöle müssen unter Sauerstoffausschluss gelagert und transportiert werden. Der Transport erfolgt in Spezialtankbehältern auf LKW-Sattelzug oder in Kesselwagen der Bahn, max. 25 t bzw. 4,85 MWh_{th} pro Fahrt bzw. Kessel.

Der Vorteil des Thermoöls liegt in der Möglichkeit, Prozesswärmeanwendungen im Hochtemperaturbereich (bspw. zur Dampferzeugung) versorgen zu können. Es ergibt sich daher ein breites Nutzungsspektrum und eine hohe Speicherkapazität.

Der Nachteil besteht in dem hohen Aufwand zur Wärmedämmung der Speicherbehälter sowie den Sicherheitsmaßnahmen beim Transport und beim Umpumpen zwischen den Behältern, da Thermoöle nicht mit Sauerstoff in Berührung kommen dürfen. Eine hohe Leistung und eine hohe Quellentemperatur auf der Abwärmeseite sind notwendig.

Technische Ausstattung an der Auskopplungsstelle: Abgasbypass, Wärmetauscher mit Isolierung und Sicherheitseinrichtungen, Zwischenspeicher, Verladeeinrichtung, Thermoölleitungen, Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen (MSR), Inertgasversorgung und Betriebssteuerung.

Technische Ausstattung beim Nutzer: Wärmetauscher mit Schnittstelle zum Nutzerwärmeversorgungssystem, Zwischenspeicher, Leitungen, Inertgasversorgung, Verladeeinrichtungen, MSR und Betriebssteuerung [2].

Fazit: Thermoöl ist für hohe (Abwärme-)Temperaturen gut geeignet. Wegen den hohen Auskopplungs- und Transportkosten kommt dieses Speichermedium jedoch nicht für einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz im Bereich der mobilen Wärme in Frage. Im Folgenden wird daher nicht näher auf Thermoöl eingegangen.

Warmwasserspeicher

Wasser wird sehr häufig als Speichermedium eingesetzt. Es hat eine Wärmeleitfähigkeit von 0,5984 W/mK (bei 20 °C und einem Druck von 0,1 MPa) [3]. Sofern das Wasser in einen Temperaturbereich von 0 °C – 100 °C arbeitet, gibt es nahezu keine Druck- und Volumenänderungen. Wasser ist außerdem ein ungiftiger Stoff. Der Energieinhalt von Wasser bei unter 100 °C liegt bei 60 kWh/m³ (bei einer Temperaturspreizung von 50 K), was im Vergleich zu moderneren Speichertechnologien, wie PCM oder Zeolithe, sehr gering ist.

Der Vorteil der guten Wärmeleitfähigkeit zeigt sich in der Be- sowie in der Entladezeit des Speichers. Theoretisch ist dies in 1,5 Stunden realisierbar. Praktisch wird diese Zeit sich verlängern, da durch den hohen Volumenstrom die schichtweise Be- und Entladung nicht stattfinden kann.

Durch den geringen Energieinhalt wird der maximale Speicherinhalt durch das maximal zulässige Gesamtgewicht von LKW, Chassi und Speichercontainer limitiert. Unter der Annahme, dass der Wasserspeichercontainer ohne Chassi ein Gewicht von 25 t, d.h. ein Volumen von 25 m³, als Maximum haben darf, könnte der Wasserspeicher einen Energieinhalt von 1 MWh beinhalten.

Einen mobilen Wärmespeicher mit dem Speichermedium Wasser zu befüllen, hat vor allem den Vorteil der geringen Investitionskosten in den Speichercontainer. Außerdem kann dieser heutzutage innerhalb von ungefähr 4 Stunden be- und entladen werden. Durch den geringen Energieinhalt pro Container (1 MWh) lohnt sich diese Speichertechnologie jedoch nur bei Verbrauchern, die sich in unmittelbarer Nähe zur Wärmequelle befinden. Begründet ist dies in den vergleichsweise hohen Transportkosten, die durch den geringen Energieinhalt entstehen. Verbesserungspotenzial gibt es vor allem in den Be- und Entladezeiten. Theoretisch ist eine Be- und Entladung innerhalb von 1,5 h möglich.

Fazit: Der Einsatz von Wasser als Speichermedium für die mobile Wärme kommt aufgrund der geringen Speicherkapazität hauptsächlich für Wärmesenken in Frage, die in unmittelbarer Nachbarschaft zur Wärmequelle liegen. Außerdem ist Wasser ausschließlich für Niedertemperaturanwendungen geeignet.

Latentwärme - PCM

Im Gegensatz zu den sensiblen Wärmespeichern, bei denen die Temperaturveränderung messbar ist, wird die Energie in einem Latentwärmespeicher hauptsächlich im Phasenübergang gespeichert. Beim Latentwärmespeicher werden meistens Salzhydrate als PCM (phase change materials) verwendet, die einen niedrigen Schmelzpunkt von 50 °C – 100 °C haben. Das PCM wird durch die Abwärme zum Schmelzen gebracht, durch die Entnahme der Wärme erstarren die PCM wieder. Das dabei maximal erreichbare Temperaturniveau liegt bei 180 °C (mit Nitraten als PCM). Es wird eine Energiedichte von ca. 140 kWh_{th}/m³ erreicht [1].

Es gibt auf dem Markt Speichermaterialien mit verschiedensten Schmelztemperaturen. Die PCMs werden in einem handelsüblichen Container mit einer Gesamtmasse von 30 t untergebracht und können in diesem auch problemlos transportiert werden. [9 - 11]

Der Vorteil dieser Wärmespeichertechnik besteht darin, dass in einem durch das Speichermaterial festgelegten Temperaturbereich viel Wärmeenergie in relativ wenig Masse gespeichert wird. Als weiterer Vorteil ist die Abgabe der Wärme auf einem konstanten Temperaturniveau zu nennen. Dies ist vor allem für den effizienten Einsatz in der Haustechnik nötig. Zusätzlich können durch den Einsatz dieser Technik Wärmeverluste minimiert werden, da Latentwärmespeicher nur geringe Verluste aufweisen. Ebenfalls ein Vorteil ist der geringe apparative Aufwand und die geringe Quelltemperatur.

Ein Nachteil ist die große Differenz zwischen thermischer Lade- und Entladeleistung der Systeme. Daher entstehen auf Nutzerseite entsprechend überdimensionierte Systeme. Dementsprechend ergibt sich auch eine doppelte Entladezeit gegenüber der Ladezeit. Allerdings ist auch der Anwendungsbereich bei der Erzeugung von Prozesswärme geringer. Ein weiterer Nachteil sind die hohen Kosten für die Speichermaterialien und für die aufwendige Technik (z.B. Wärmetauscher, etc.). Ebenso die geringe Speicherdichte und die geringe Maximaltemperatur.

Das grundlegende Problem bei Latentwärmespeichern mit Phasenwechselmaterialien (PCM) ist die geringe Wärmeleitfähigkeit [$\ll 1 \text{ W}/(\text{m K})$] und das zu kleine Oberflächen-zu-Volumen Verhältnis des PCM. Dadurch ist die Be- und Entladeleistung vergleichsweise sehr langwierig, was deutliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit hat.

Ein bereits erforschter Ansatz, aus PCM und Graphit ein Verbundmaterial herzustellen, das die Wärmeleitfähigkeit erhöhen soll, brachte bisher zwar eine Verbesserung in der Be- und Entladezeit (siehe Abb. 2), jedoch ging die Wärmekapazität dadurch stark zurück. Weitere Forschungen für ein tiefgehendes Verständnis der Wechselwirkungen von Graphit und Natriumacetat sind derzeit im Gange.

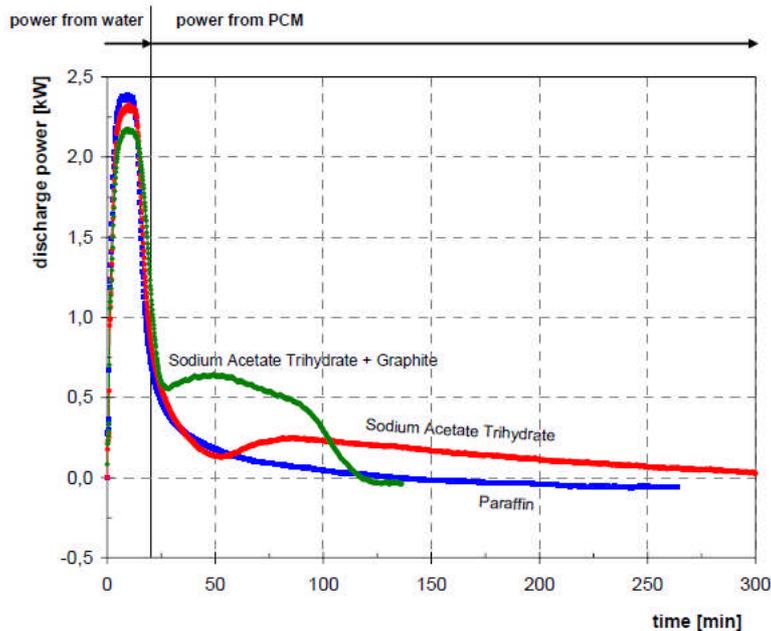


Abbildung 2: Entladeleistung für verschiedene PCM-Materialien für ein Kälteexperiment, Massenstrom von 100 Kg/h, Durchflusstemperatur 50 °C, Starttemperatur des Tanks 70 °C [4]

Ein weiterer Ansatz, der zur Erhöhung des Oberflächen-Volumenverhältnisses führen soll, ist die Mikroverkapselung von Salzen und Salzhydraten mittels Sole-Gel- und Plasma-Technologie. Bisherige Verkapselungen basieren auf organischen Materialien. Das Ziel von Forschungsarbeiten ist eine anorganische Verkapselung herzustellen, um so den Einsatzbereich des PCM zu höheren Temperaturen auszubauen. Bisherige Probleme bereiten bei diesen Mikroverkapselungen vor allem die Korrosions-, Temperatur- und Zyklenbeständigkeit.

Auch die Verwendung von anderen Materialien könnten Verbesserungen in der Energiedichte und der Be- und Entladezeit mit sich bringen, haben aber meist andere Nachteile wie Kosten, Toxizität oder Korrosionsverhalten.

Mehrere Forschungsgruppen beschäftigen sich mit dieser Problematik, bisher gibt es jedoch nur wenige Fortschritte. Da Latentwärmespeicher seit Jahrzehnten weiterentwickelt werden, sind in naher Zukunft kaum Verbesserungen zu erwarten.

Eine weitere Möglichkeit mehr Energie in den bereits vorhandenen Latentwärmespeicher zu laden bzw. die Beladedauer zu verringern, ist eine Beladung mit einer höheren Temperatur, als es im BHKW Neuried (85 °C) zurzeit möglich ist (siehe Abb. 3). Ebenfalls kann durch eine größere Temperaturdifferenz von Wärmespeicherinhalt und dem Rücklauf der Wärmesenke, die Entladedauer verringert bzw. die übertragene Wärme erhöht werden.

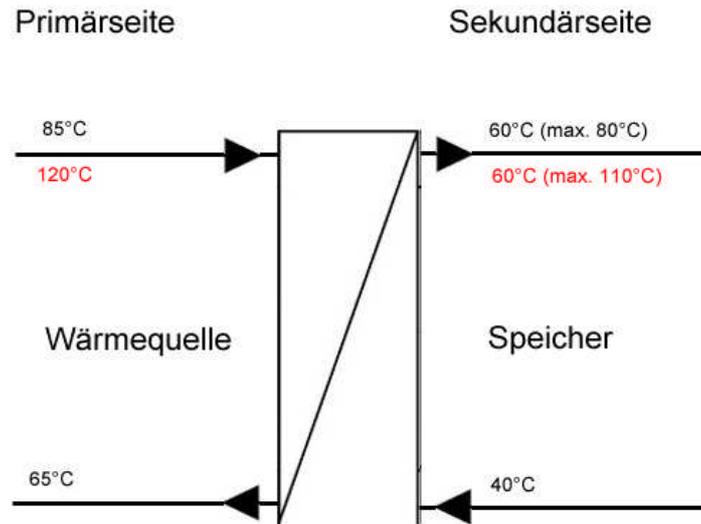


Abbildung 3: Verbesserungspotenzial durch Erhöhung der Beladetemperatur

Der Energieinhalt eines LaTherm Speichercontainers würde sich somit auf ungefähr 2,8 MWh erhöhen. Der erforderliche Umbau der bereits installierten Wärmetauscher würde jedoch weitere Investitionskosten verursachen. Da die Beladungszeit eines Containers nicht ausschlaggebend für die Dimensionierung ist (die Beladung erfolgt doppelt so schnell wie die Entladung), werden auf kurzfristige Sicht die Investitionskosten im Vergleich zum Nutzen als nicht sinnvoll erachtet. Langfristig gesehen, könnte sich dieser Umbau rechnen. Dazu ist eine Abschätzung der Investitionskosten für den Umbau zu tätigen, die den Rahmen dieser Machbarkeitsstudie überschreitet.

Fazit: Die Latentwärmespeicher sind sehr gut für Niedertemperaturabwärme geeignet. Der Einsatz für einen mobilen Wärmetransport kommt mit dieser Technologie in Frage und wurde im Bericht vom 24.10.2011 der Hochschule Offenburg bereits näher untersucht. Einige wenige kommerzielle Latentwärmespeicher sind bereits auf dem Markt durch das Unternehmen LaTherm erhältlich und es gibt einige wenige Messergebnisse aus dem Feldbetrieb.

Thermochemische Speicher - Zeolithe

Im Zeolithwärmespeicher erfolgt die Wärmespeicherung meistens mittels Silicate. Zeolithe sind Sorptionsspeicher, d.h. sie enthalten Wasser, das bei Zufuhr heißer Luft oder Gas (Abwärme) abgegeben wird (Desorption). Bei normalen Umweltbedingungen kommen die Zeolithe in Kontakt mit wasserdampfhaltiger Außenluft, dies wiederum führt zur Adsorption, also entsteht wieder Energie (Abb. 4).

Das maximal erreichbare Temperaturniveau liegt auf der Nutzerseite bei 200 °C, was bedeutet, dass die Abwärme ein Niveau von 225 °C bis 250 °C haben sollte. Die Energiedichte liegt bei ungefähr 200 kWh_{th}/m³(temperaturabhängig). Über den gesamten Temperaturbereich ergibt sich ein theoretischer Durchschnittswert von 160 kWh_{th}/t.

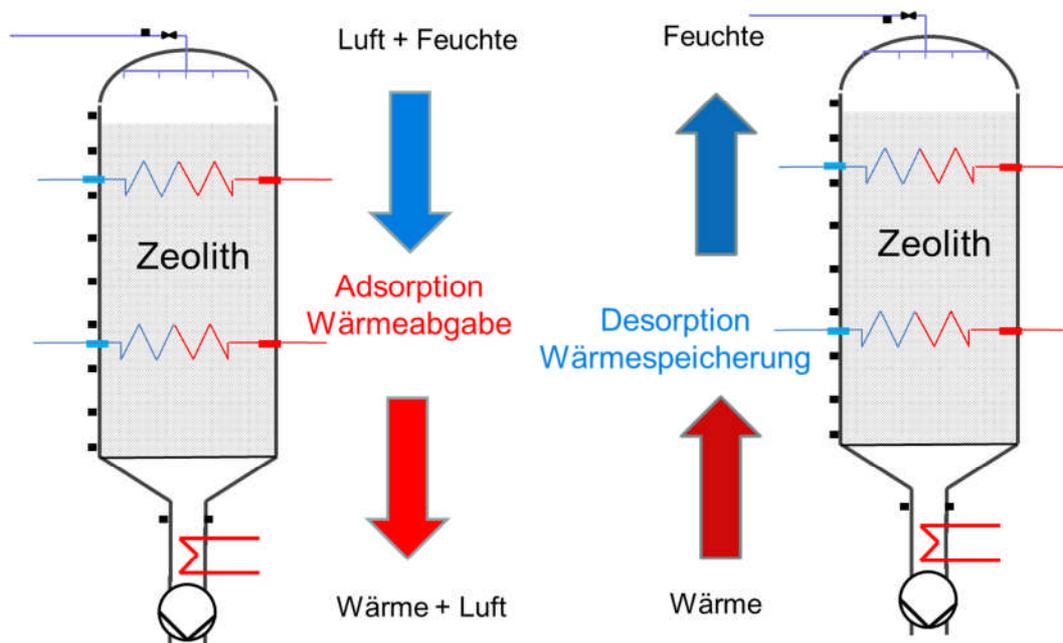


Abbildung 4 : Prinzip des Zeolith-Wärmespeichers.

Der Transport der Speicher erfolgt in handelsüblichen Containern mit einer Wärmekapazität von bis zu 3,5 MWh. Vorteil der Zeolithwärmespeicher ist die hohe Speicherdichte. Überdies ist die Energiespeicherung fast verlustfrei. Ein geringer apparativer Aufwand und eine geringe Quellenleistung kommen noch dazu.

Nachteil der Zeolithwärmespeicherung ist, dass eine Prozessdampferzeugung wegen des gering erreichbaren Temperaturniveaus und des daraus resultierenden hohen Verlustwärmeanteils ungeeignet ist. D.h. es ergibt sich ein eingeschränktes Anwendungsspektrum. Außerdem ist die Forschung bei Sorptionsspeichern noch nicht weit fortgeschritten. Mobile Sorptionsspeicher sind noch nicht am Markt verfügbar. Bei einer Pilotanlage betragen die Kosten für den Speicher 120.000 €. Die Lade-/Entladestation kostete 178.000 € [5].

Damit in einem handelsüblichen Speichercontainer mit Zeolith eine Speicherenergie von bis zu 3,5 MWh erreicht wird, muss das Temperaturniveau der Abwärme bei ca. 180 °C liegen.

Im Abgasstrom des BHKW's Neuried steht eine Leistung von ca. 800 kW bei einer Abkühlung von 450 °C auf 180 °C zur Verfügung. Durch den Einbau eines derzeit nicht vorhandenen Luft-Luft-Wärmeübertragers könnte die Wärme des Abgases bei einem höheren Temperaturniveau, als es mit einem Latentspeicher möglich wäre, entnommen werden und einem Zeolith-Speichersystem zur Verfügung gestellt werden. Durch eine Anhebung der Beladetemperatur auf 250 °C könnte sogar eine Speicherkapazität von 4,5 MWh erreicht werden.

Zeolithspeicher erreichen die theoretisch höchsten Energiedichten (bis zu 200 kWh/m³) der hier vorgestellten Speichertechnologien. Messergebnisse von ZAE-Bayern haben bei einem offenen System mit dem Zeolith 13X eine Energiedichte von 120 kWh/m³ – 130 kWh/m³ feststellen können. Durch weitere Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet sind höhere Energiedichten zu erwarten. Andere Speichermedien wie beispielsweise Silicagel und Metallhydride besitzen theoretische Energiedichten von bis zu 500 kWh/m³.

Die Verwendung von Zeolith als Speichermedium bietet ein erhebliches Verbesserungspotenzial. Mobile Systeme sind allerdings noch nicht kommerziell verfügbar. Stationäre Anwendungen sind jedoch bereits auf dem Markt vorhanden.

Fazit: Eine Anwendung der Zeolithwärmespeicher ist sowohl im Bereich der Niedertemperaturprozesswärmebereitstellung als auch im Bereich der Raumwärmeversorgung möglich. Eine Prozessdampfversorgung ist derzeit nicht möglich. Idealerweise hat ein Nutzersystem eine Größe ab 250 kW_{th}. Da die Forschung hinsichtlich dieser Technik noch an Anfang steht, sind Verbesserungen in naher Zukunft zu erwarten. Für den mobilen Wärmetransport scheint diese Technologie ebenfalls geeignet zu sein. In diesem Bericht wird Zeolith als Wärmespeicher genauer untersucht um darauf aufbauend Versuche in Richtung eines mobilen Systems durchführen zu können.

3 Wärmetransportsysteme

Um Abwärme ohne Nah- oder Fernleitungssysteme transportieren zu können, bedarf es eines technischen Umsetzungskonzeptes, in dem potenzielle Wärmequellen und Wärmesenken unter Berücksichtigung eines Logistikkonzeptes bewertet und schlussendlich ausgewählt werden (Vgl. Abb. 5).

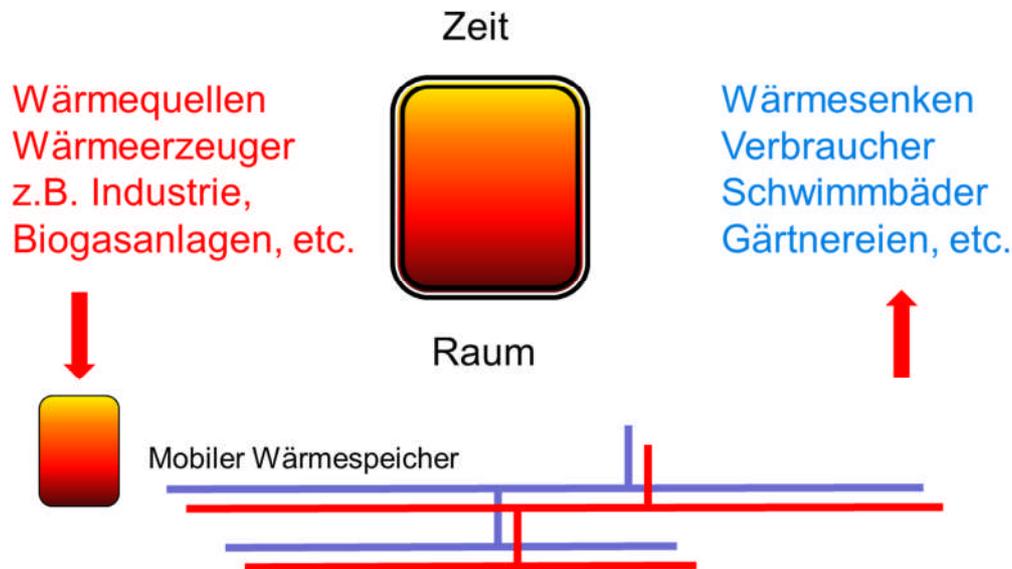


Abbildung 5: Prinzip der Wärmeverteilung, Umsetzungskonzept.

3.1 Logistikkonzept

In diesem Unterkapitel wird der technische und organisatorische Ablauf des mobilen Wärmetransports, von der Ankopplung an die Ladestation bis zur Abkopplung beim Wärmekunden, betrachtet.

Generell gilt, je kürzer die Distanz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, desto ökologischer und wirtschaftlicher ist der Betrieb eines mobilen Speichersystems. LaTherm gibt für einen wirtschaftlichen Betrieb eine maximale Distanz von 20 km an. Letztendlich muss für jeden Wärmeabnehmer diese Distanz separat bestimmt werden. Abb. 6 zeigt den Versorgungsradius um das BHKW Neuried mit einem 10 km und einem 20 km Radius an. Weitere Wärmeabnehmer sind bevorzugt im 10 km Radius zu suchen. Folgende Gemeinden kommen laut Abb. 6 dafür in Frage: Eschau, Plobsheim (beide Frankreich), Kehl, Neuried, Meißenheim, Schutterwald, Hohberg, Offenburg, Ortenberg und Willstätt.

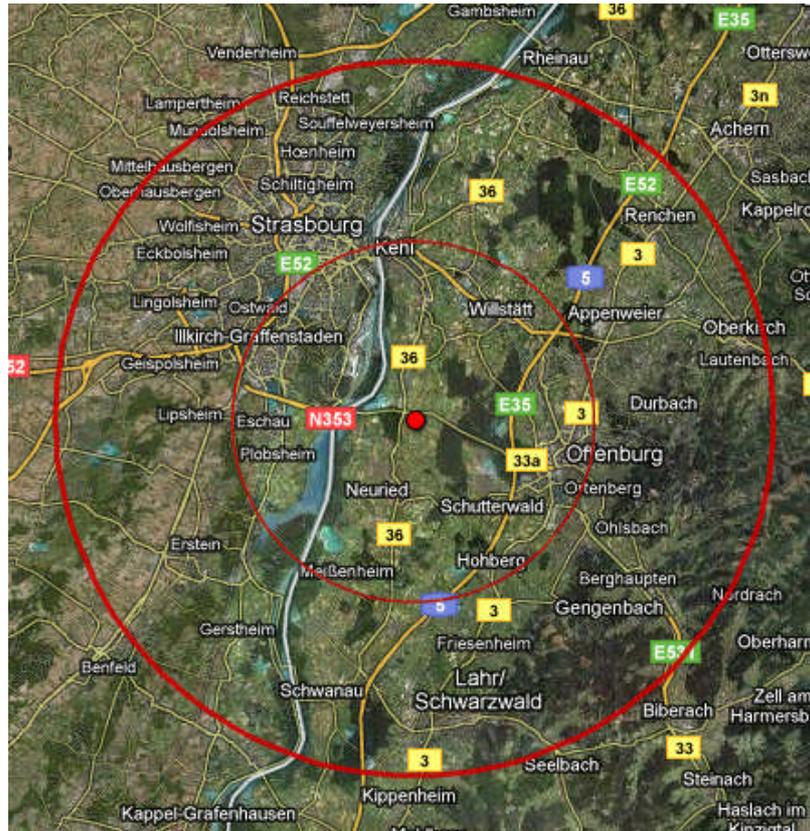


Abbildung 6: 10km und 20km Radius um die Wärmequelle BHKW Neuried zur Identifizierung potenzieller Wärmesenken [6]

Der Transport der Speichercontainer ist entweder über einen externen Spediteur oder durch die Wärmeabnehmer selbst durchzuführen. Ein externer Spediteur verlangt derzeit 100 €/h inklusive Treibstoff, LKW und Personalkosten.

Um eine kosten- und zeitintensive Auf- und Abladung des Speichercontainers zu vermeiden, wird jedem Container ein auf dem Markt für 15.000 € verfügbares Chassi zugeordnet. Somit kann der Container am Be- und Entladeort ohne größeren Aufwand abgestellt werden. Die Zugmaschine ist dadurch frei verfügbar und es werden keine Hubgeräte oder dergleichen benötigt.

Das Gesamtgewicht des LKW's inklusive Container und Chassi darf 40 t nicht überschreiten. Werden 40 t überschritten, muss eine Sondergenehmigung beantragt werden. An der Be- und Entladestelle müssen ein flexibler Schlauchanschluss sowie eine geeignete Zufahrt und eine betonierte Abstellfläche vorhanden sein.

3.2 Wärmequellen

Als Wärmequellen werden Anlagen bezeichnet, die neben ihrem eigentlichen Zweck (beispielsweise die Erzeugung von Strom durch ein Blockheizkraftwerk), zusätzliche Abwärme zur Verfügung stellen, die im Normalfall an die Umwelt abgegeben wird oder energieaufwendig durch Kühlsysteme abgeführt werden muss.

Für die Wärmequellen ergeben sich Rahmenbedingungen zur Abwärmenutzung mit den folgenden Punkten:

- Erhebung der Abwärmepotentiale
- Qualität des Abwärmemediums
- Einbindung in das Gesamtenergiekonzept
- Produktsicherheit
- Liefersicherheit für die Abnehmer

3.2.1 Niedertemperatur

Biogasanlage Neuried

Im Jahre 2007 wurde die Anlage von der Gemeinde Neuried geplant und gebaut. Hintergrund war die Einbindung und Versorgung des im gleichen Areal geplanten Industriegebiets, das allerdings bis heute noch nicht verwirklicht wurde. Seit Herbst 2009 betreibt Badenova die Biogasanlage. Sie besteht aus zwei baugleichen Blöcken mit je einem Gasmotor-Blockheizkraftwerk (Jenbacher J316GS). Die beiden Anlagen nutzen täglich 17.000 Kubikmeter Biogas aus regionaler Maissilage, die von einem Lohnunternehmer aus der Umgebung aufgekauft, gehäckselt und in den insgesamt 7 Silos der Anlage gelagert wird.

Technische Daten zum BHKW Neuried

- je BHKW: 704 kW elektrische Leistung, 1.735 kW thermische Leistung
- Silo: 30.000 Tonnen Lagerkapazität
- Gärrestelager: 5 – 6 Tonnen Lagerkapazität
- Gasspeicher: 3000 m³ Lagerkapazität
- Substratverbrauch: 25.000 Tonnen pro Jahr
- Substratherkunft: Mais aus der Umgebung, angebaut auf einer Fläche von ca. 500 ha
- Erzeugte Biogasmenge: 28 Mio. kWh pro Jahr
- Erzeugte Strommenge: ca. 12 Mio. kWh pro Jahr, davon wird 1 Mio. kWh in der Anlage selbst gebraucht
- Abwärme 1,4 MW

Das BHKW Neuried wandelt von den 100 % der Energiezufuhr ca. 40 % in elektrische Leistung, 50 % in thermische Leistung und 10 % in Verluste um (siehe Abb. 7).

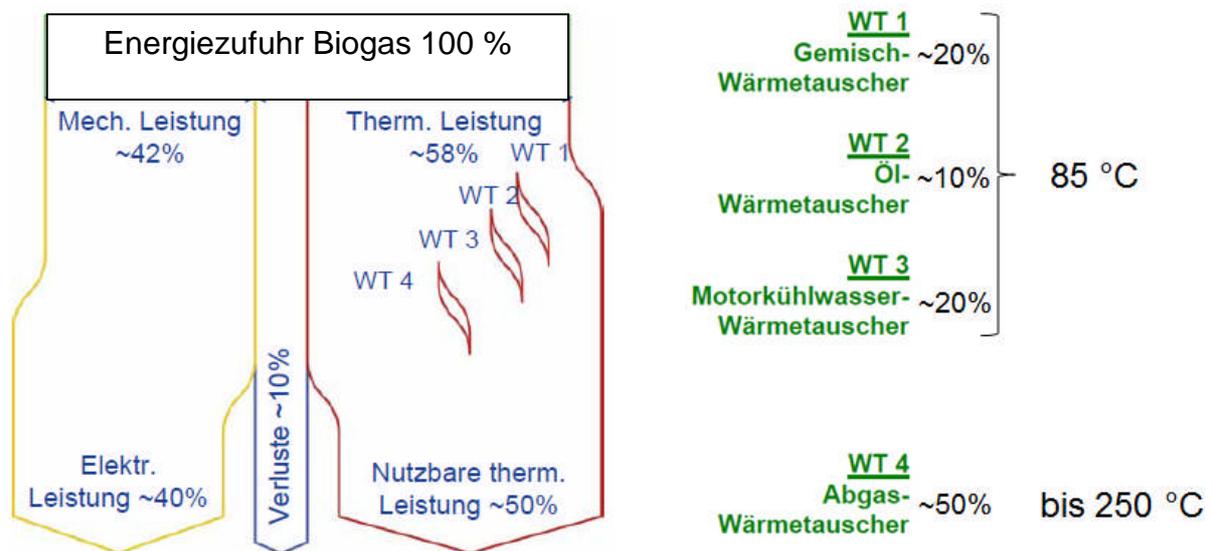


Abbildung 7: Energiebilanz des Gasmotor-BHKW's am Standort Neuried [7]

Die Wärmetauscher WT1 bis WT3 stellen ungefähr 50 % der thermischen Leistung mit einer Wassertemperatur von 85 °C zur Verfügung. Der Abgaswärmetauscher WT4 stellt weitere 50 % an nutzbarer thermischer Leistung bei 250 °C bereit.

3.2.2 Mitteltemperatur

Im Mitteltemperaturbereich kommt als Wärmequelle ein Aluminiumhersteller in Betracht, der Temperaturen von ca. 230 °C im Mittel mit Heißluft erreicht. Die thermische Auskopplungsleistung beträgt 1,7 MW_{th}.

3.2.3 Hochtemperatur

Ein Stahlwerk liefert Wärme im Hochtemperaturbereich, das heißt im Stahlwerk selbst entsteht eine Abwärmeleistung von 5 MW bis 6 MW. Am Stoßofen ist eine Abluft von > 25.000 m³/h und einer Temperatur von > 350 °C im Jahresmittel zu erreichen.

3.3 Wärmesenken

Als Wärmesenken werden technische Vorrichtungen bezeichnet, die anfallende überschüssige thermische Energie von einer Wärmequelle abführen können. Typische Abwärmesenken sind z.B. Anlagen zur Raumheizung und Warmwassererzeugung, für Prozesswärme, im Einzelfall auch zur Kälte- oder Stromerzeugung. Um abschätzen zu können, welche Abwärmesenke zu welcher Abwärmequelle passt, sind zur Charakterisierung der Abwärmesenken folgende Kenngrößen zu erheben:

- Medium der Abwärmesenke, spezifische Wärmekapazität
- Temperaturen (°C)
- Betriebszeiten (h/a)
- Bedarfsprofil/Energiemenge (kW/h), idealerweise Gebäude mit einer Fläche von mehr als 10.000 m² Fläche bzw. 2.500 MWh/a
- Leistung (kW)

Weitere Voraussetzungen sind:

- Das Gelände des Gebäudes oder der Anlage braucht eine ausreichende Stellfläche für den Container. Ebenso muss eine Zufahrt und Rangierfläche für einen 40 t LKW vorhanden sein.
- Zwischen Containerstellplatz und Heizungseinbindung ist eine maximale Leitungslänge von 40 m sinnvoll.
- Die Entfernung Wärmequelle zu Wärmeabnehmer sollte laut einer Studie der Universität Bayreuth nicht mehr als 30 km betragen [8].

Die erhobenen Kenngrößen ermöglichen die Abschätzung der Wärmeleistungen der Wärmesenken (kW). Die benötigten Wärmemengen der Wärmesenken werden über Brennstoff- bzw. Stromabrechnungen der letzten Perioden oder über die jährlichen Betriebsstunden (h/a) und die jeweiligen Bedarfsprofile ermittelt.

3.3.1 Geringer Leistungsbedarf

Ein Einfamilienhaus aus den 70er Jahren benötigt ungefähr 25 l Heizöl/m² beheizter Fläche im Jahr. Bei den in den vergangenen Jahren gebauten Niedrigenergiehäusern liegt der Verbrauch bei 7 l Heizöl/m² beheizter Fläche/Jahr. Noch etwas weniger Heizölverbrauch (6 l/m² beheizter Fläche = 60 kWh/m²-a) legt die neueste Energiesparverordnung (EnEV 2012) für neu zu bauende Häuser fest. Einfamilienhäuser kommen daher für die Belieferung mit mobiler Wärme nicht in Frage.

3.3.2 Mittlerer Leistungsbedarf

Ein durchschnittliches Gewächshaus mit einer Größe von ca. 2.000 m² wird im Winter frostfrei gehalten und im Frühjahr auf 15 °C bis 18 °C erwärmt. Dabei entsteht der Energiebedarf in der Zeit von Oktober – April, wobei in der Spitzenzeit Dezember/Januar 300 kW – 400 kW gebraucht wird. Der Heizölbedarf liegt bei 30.000 l pro Jahr für ein durchschnittliches Gewächshaus.

3.3.3 Hoher Leistungsbedarf

Eine Brauerei hat einen ganzjährigen Energiebedarf von 120 °C (Dampf). Derzeit wird hierfür 330.000 l – 340.000 l Heizöl pro Jahr benötigt.

In einem Schwimmbad normaler Größe besteht eine Jahreswärmemenge von ca. 900 MWh/a für Heizung, Brauch- und Badewassererwärmung, das entspricht ca. 100.000 l Heizöl/a.

Bei der Tabaktrocknung liegt der Wärmebedarf von Juli bis September bei 60.000 l Heizöl und 120.000 l Flüssiggas (hier im speziellen Fall wird beides verwendet).

3.3.4 Ausgewählte Abnehmer

Der unterschiedliche Wärmebedarf der Betriebe mit ihren verschiedenen Zeiträumen sowie die zeitliche Verteilung der Wärmebereitstellung werden in Abb. 8 dargestellt.

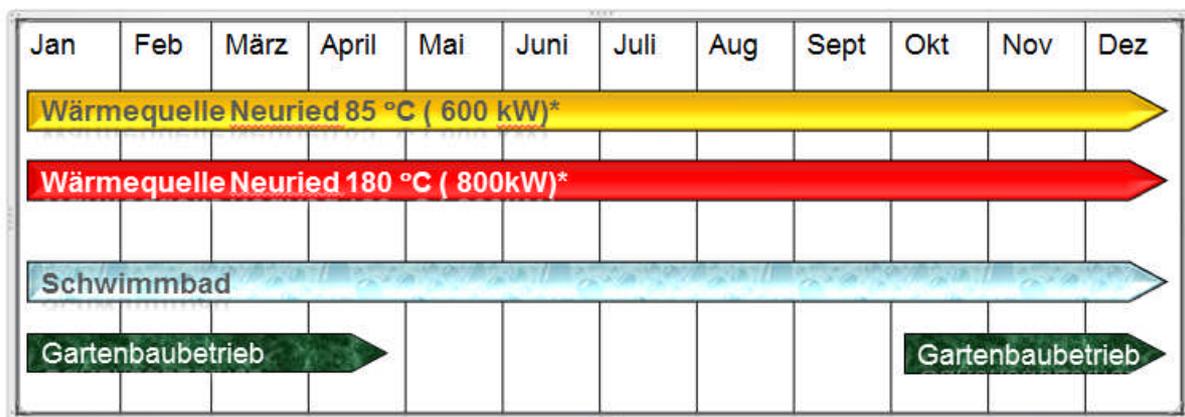


Abbildung 8: Zeitliche Verteilung der Wärmequelle und Wärmesenken

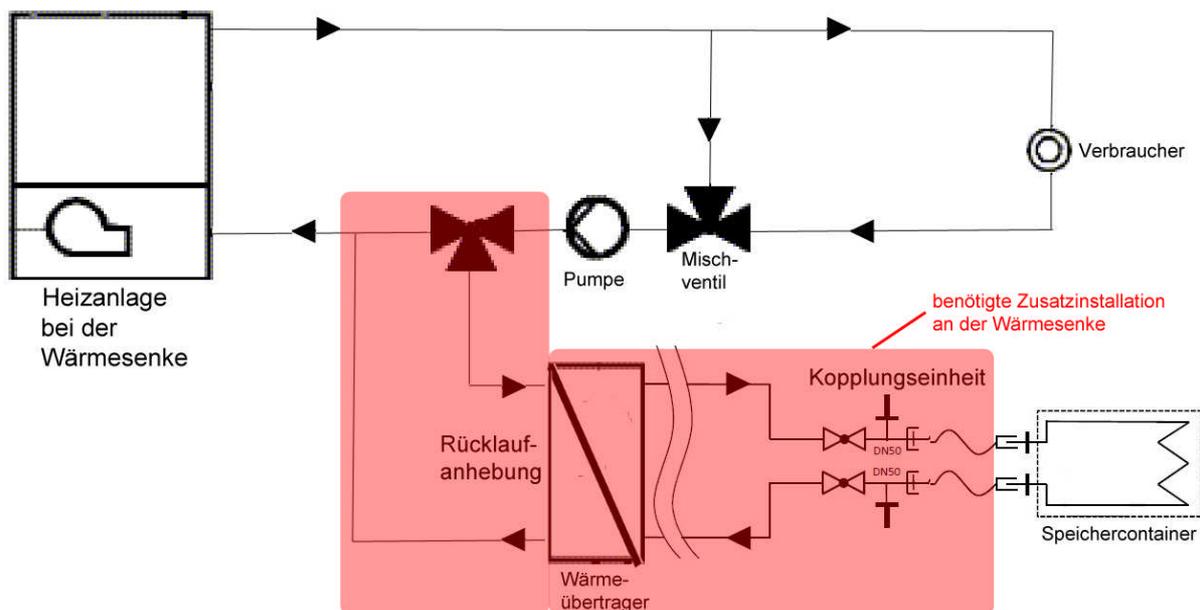


Abbildung 9: Hydraulikschema der Wärmeintegration an der Wärmesenke durch eine Rücklaufanhebung

Die Wärmequelle steht mit 8000 von 8760 Stunden im Jahr zur Verfügung. Die Einbindung in das Wärmenetz der beiden Abnehmer erfolgt über eine Rücklaufanhebung. Dazu wird der Rücklauf des Heizsystems durch einen Wärmeübertrager geführt und dabei erwärmt. Ist die Erwärmung ausreichend, wird keine zusätzliche Heizenergie mehr benötigt. Das Hydraulikschema der Einbindung der Wärme wird in Abb. 9 dargestellt. Der rot markierte Bereich entspricht der benötigten Zusatzinstallation an der Wärmesenke.

3.3.4.1 Schwimmbad der Klosterschulen Offenburg

Das Schwimmbad der Klosterschulen Offenburg befindet sich ungefähr in 15 km Entfernung zum BHKW Neuried.

Die gesamte Schule hat einen jährlichen Verbrauch von ungefähr 100.000 l an Heizöl. Das entspricht ca. einem Jahresenergiebedarf von 900 MWh/a (der Wirkungsgrad der Heizanlage wird mit 85% angenommen). Spezielle Messeinrichtungen um den Bedarf des Schwimmbades separat zu ermitteln, sind nicht vorhanden. Das benötigte Temperaturniveau liegt bei 60 °C. Der Rücklauf der Heizanlage wird auf 23 °C geschätzt. Genaue Temperaturen sind beim Betreiber nicht verfügbar. Das Schwimmbad wird ganzjährig beheizt. Ausgenommen sind die schulfreien Tage.

3.3.4.2 Gartenbaubetrieb Schweiger Offenburg

Der Gartenbaubetrieb der Familie Schweiger befindet sich ebenfalls in ungefähr 15 km Entfernung zum BHKW.

Von Oktober bis April braucht der Gartenbaubetrieb für seine 13 Gewächshäuser mit 3000 m² 70.000 l Heizöl, was einem Jahresenergiebedarf von 630 MWh/a (der Wirkungsgrad der Heizanlage wird mit 85 % angenommen) entspricht. Im Dezember und Januar ist der Energieverbrauch des Gartenbaubetriebes mit bis zu 400 kW am höchsten. Das benötigte Temperaturniveau liegt hier ebenfalls bei 60 °C. Im Gewächshaus sollten die Temperaturen zwischen 15 °C bis maximal 20 °C liegen. Hier gibt es ebenfalls keine verlässlichen Messwerte der Rücklauftemperatur der Heizanlage. Es wird ebenfalls eine Rücklauftemperatur von 23 °C angenommen.

4 Bewertung der Systeme Wärmeträger – Transportsystem

Im Folgenden sollen die oben vorgestellten Systeme zur mobilen Wärmespeicherung abschließend bewertet werden. In der Abb. 10 sind die wesentlichen Unterschiede in einem Nutz-Temperatur – Zeit – Diagramm dargestellt.

Aus einem Warmwasserspeicher kann die Wärme nur bei der Maximal-Temperatur des Wassers T_{Start} im Speicher entnommen werden (Vgl. blaue Linie). Diese sinkt sobald Warmwasser entnommen wird und dieses durch kaltes Wasser ersetzt wird. Am Ende des Entladevorganges liegt das Temperaturniveau der entnommenen Wärme bei T_{Ende} . Die Abkühlung kann durch Verwendung eines Schichtspeichers minimiert werden.

Im Falle des PCM-Speichers kann die Wärme bei einem konstanten Temperaturniveau $T_{\text{Übergang}}$ entnommen werden, die der Temperatur des Phasenüberganges entspricht (grüne Linie). Das Temperaturniveau bleibt so lange konstant bis der Phasenübergang des PCM-Materials vollständig abgeschlossen ist. Dann sinkt die Temperatur entsprechend der Wärmekapazität des PCM-Materials.

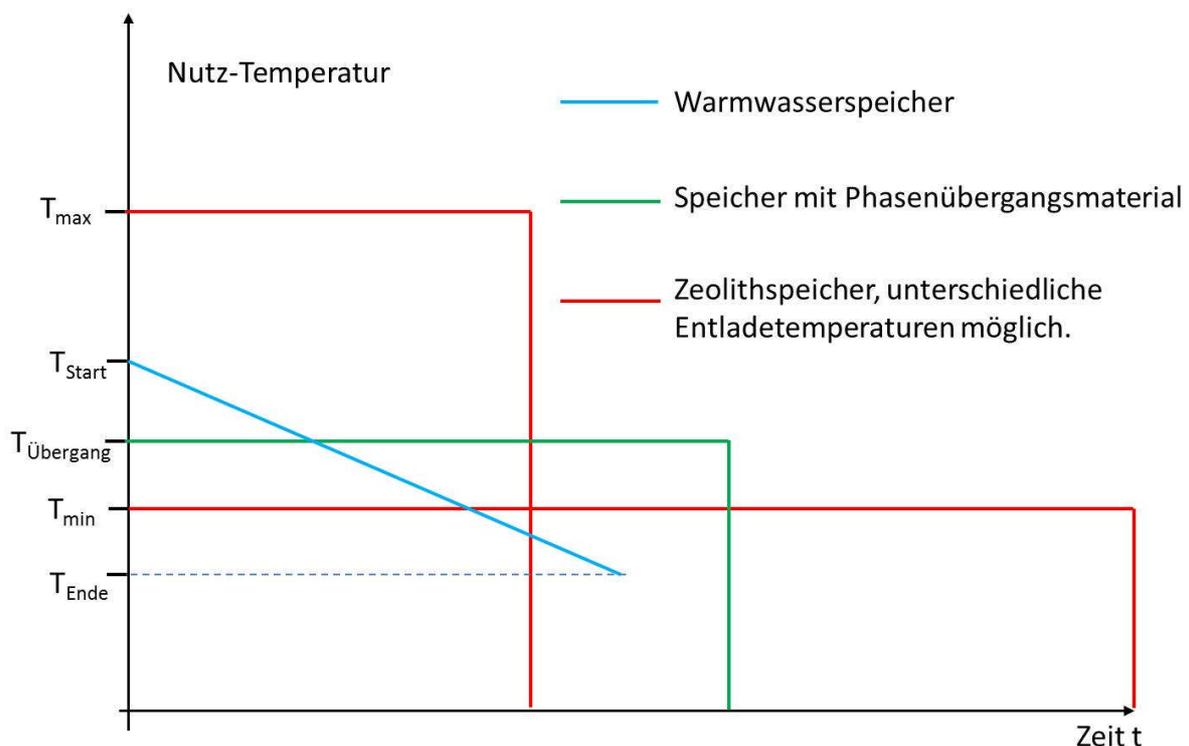


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Nutz-Temperatur bei den verschiedenen Wärmespeichersystemen.

Bei einem Zeolithspeicher kann die Entlade-Temperatur beliebig eingestellt werden. Sie hängt ab von der Menge an Wasser, die pro Zeiteinheit dem Zeolithspeicher zugeführt wird. In der Abb. 10 wird dies durch die beiden roten Linien dargestellt. Wird in kurzer Zeit viel Wasser zugeführt, so kann die Wärme auf einem Temperaturniveau entnommen werden, das höher sein kann als die Ladetemperatur. Wird wenig Wasser zugegeben (z.B. feuchte Luft) so kann die Wärme auf einem

entsprechend geringeren Temperaturniveau allerdings über einen längeren Zeitraum entnommen werden. Die Menge der gespeicherten Wärme ist in allen Fällen jedoch gleich.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Entnahmetemperatur sowohl beim Warmwasserspeicher als auch beim PCM-Speicher durch die Bauart und das verwendete Speichermedium festgelegt sind. Nur im Falle des Zeolithspeichers kann die Entnahmetemperatur beliebig eingestellt werden. Ein weiterer Vorteil des Zeolithspeichers liegt in der pro Volumeneinheit speicherbaren Energiemenge. Diese liegt beim Zeolithspeicher ca. 220 kWh/m^3 . Im Gegensatz dazu kann in einem PCM-Speicher ca. 100 kWh/m^3 und im Warmwasserspeicher ca. 60 kWh/m^3 gespeichert werden. Die Lade- als auch die Entladezeiten sprechen auch für den Zeolithspeicher. Abschätzungen haben ergeben, dass diese wesentlich kürzer ist als bei den beiden anderen Speichersystemen. Ebenso kann eine Wärmeübergabestation im Falle des Zeolithspeichers einfacher ausgeführt werden als bei den anderen Systemen.

Im Folgenden werden deshalb Ergebnisse zu Untersuchungen an einem System Wasser-Zeolith zur Planung und Auslegung eines Zeolith-Wärmespeichers vorgestellt.

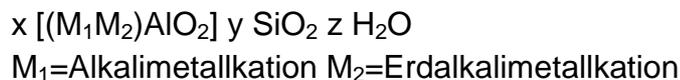
5 Untersuchungen zum Zeolithspeicher

5.1 Zeolithe

Die griechische Bezeichnung Zeolith (deutsch: Siedestein) wurde im Jahr 1756 das erste Mal von dem schwedischen Mineralogen A.F. von Cronstedt für eine Gruppe von Silikatmineralien verwendet. Seit 1998 wird dieser durch die International Mineralogical Association wie folgt definiert:

„Ein Zeolith ist eine kristalline Substanz, deren Struktur durch ein Kristallgitter aus miteinander verbundenen Tetraedern, jeder bestehend aus einem Kation und vier Sauerstoff-Atomen, charakterisiert wird. Dieses Kristallgitter enthält offene Hohlräume in Form von Käfigen und Kanälen. Diese sind gewöhnlich durch Wassermoleküle und zusätzlichen Kationen, welche austauschbar sind, besetzt. Die Kanäle sind groß genug um Gastmoleküle passieren zu lassen. Wasserreiche Phasen können dehydrieren; die Entwässerung erfolgt meist bei Temperaturen unter etwa 400 °C und ist größtenteils umkehrbar. Das Kristallgitter kann durch (OH-, F-)Gruppen, unterbrochen sein; diese besetzen eine Tetraederspitze, die nicht mit einem benachbarten Tetraeder verbunden ist.“

Durch diese Definition lassen sich über 140 verschiedene Metall-Alumosilikate der Gruppe der Zeolithe zuordnen, davon kommen ca. 60 Arten in der Natur vor. Die allgemeine Summenformel lautet:



Sie besitzen eine große innere Oberfläche (teilweise über 1000 m²/g) und starke elektrostatische Felder im Kristallgitter. Zeolithe haben ein spezifisches Schüttgewicht, sind ungiftig und nicht brennbar.

Aufgrund von unterschiedlichen Anwendungsgebieten können bei der Adsorption verschiedene Materialien verwendet werden, die je nach ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften besser für eine Anwendung geeignet sind.

Im Folgenden sind die bei diesen Versuchsreihen verwendeten Adsorbentien aufgelistet.

- Aktivkohle: Adsorptionsmittel mit hohem Kohlenstoffgehalt
- Molekularsieb: kugelförmige Metall-Alumosilikate.. Hydrophob
- Wessalith DAY: Dealuminiertes Na-Y-Zeolith
- KC-Trockenperlen: Aluminiumoxid-Silikat-Gele in kugelförmiger Perlenform
- Kieselgel: Siliziumoxid
- Köstrolith: hochselektive „Molekülsiebung“

5.2 Experimentelle Voruntersuchungen

Die Abb.11 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau für die Versuche zur Wasseradsorption. Die Druckluft gelangt über ein Absperrventil (1) und einen Durchflussmesser (3) zum Luftbefeuchter (5), wo sie in feinen Blasen mit Wasser beladen wird. Danach tritt die befeuchtete Luft in die mit Zeolith (respektiv Silicagel, Aktivkohle, etc.) gefüllte Kolonne (6) ein, in welcher die Feuchtigkeit mit dem Füllmaterial reagiert.

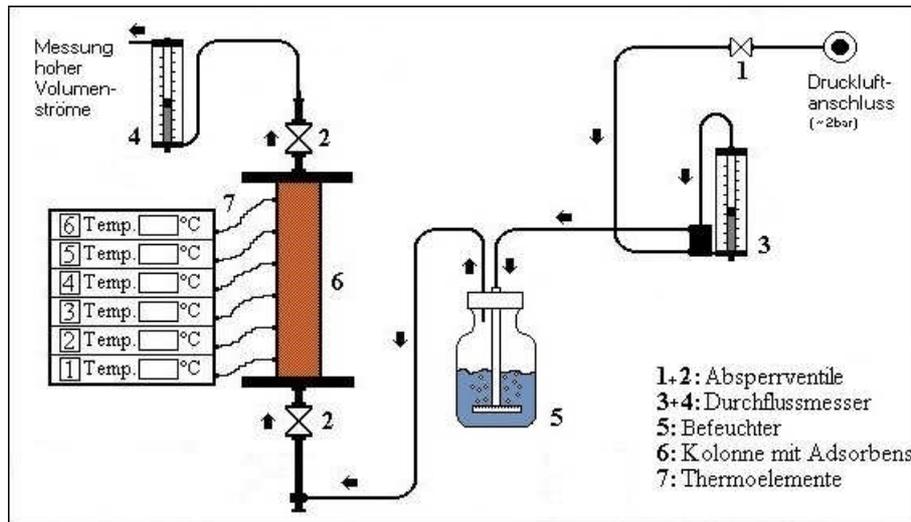


Abbildung 11: Vereinfachter Versuchsaufbau

Für die Durchführung des Versuchs wird zunächst die Kolonne mit dem entsprechenden getrockneten Material befüllt. Der Luftbefeuchter wird mit Wasser gefüllt und dessen Masse wird ebenfalls bestimmt. Die Datenerfassung und -aufzeichnung erfolgt mit Hilfe der Software ProfiLab Expert 4.0.

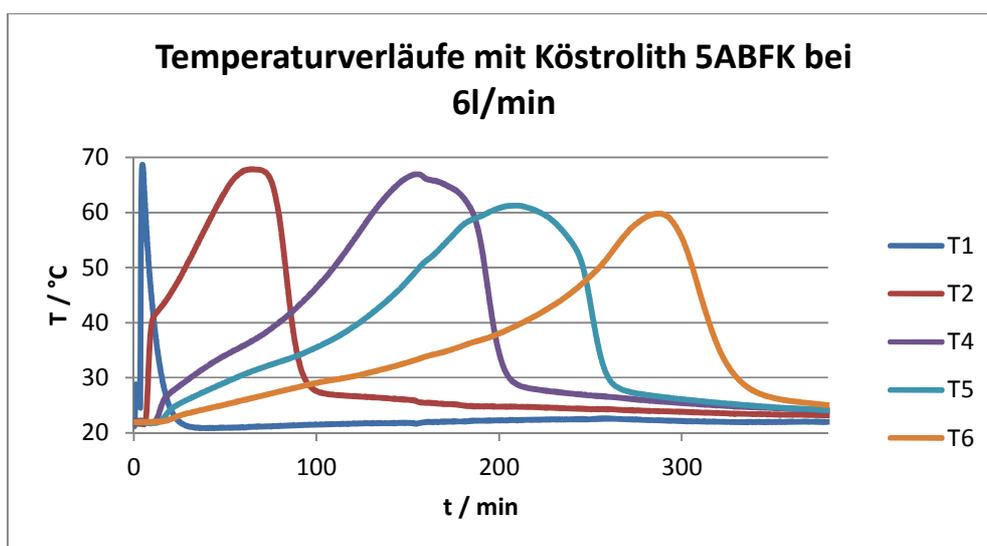


Abbildung 12: Temperaturmesswerte der verschiedenen Thermoelemente (5ABFK 6 l/min) grafisch über der Zeit aufgetragen

Beispielhaft sind in Abb. 12 die Temperaturkurven eines Versuchsdurchlaufs als Funktion der Messzeit dargestellt. An T1, dem ersten Temperatursensor, läuft die Front sehr schnell durch; an den nachfolgenden Sensoren wird die Kurve immer langgestreckter. Dabei ist die Temperatur bei T1 am höchsten, da hier die Wärme in einem kleineren Zeitraum frei wird als in den nachfolgenden.

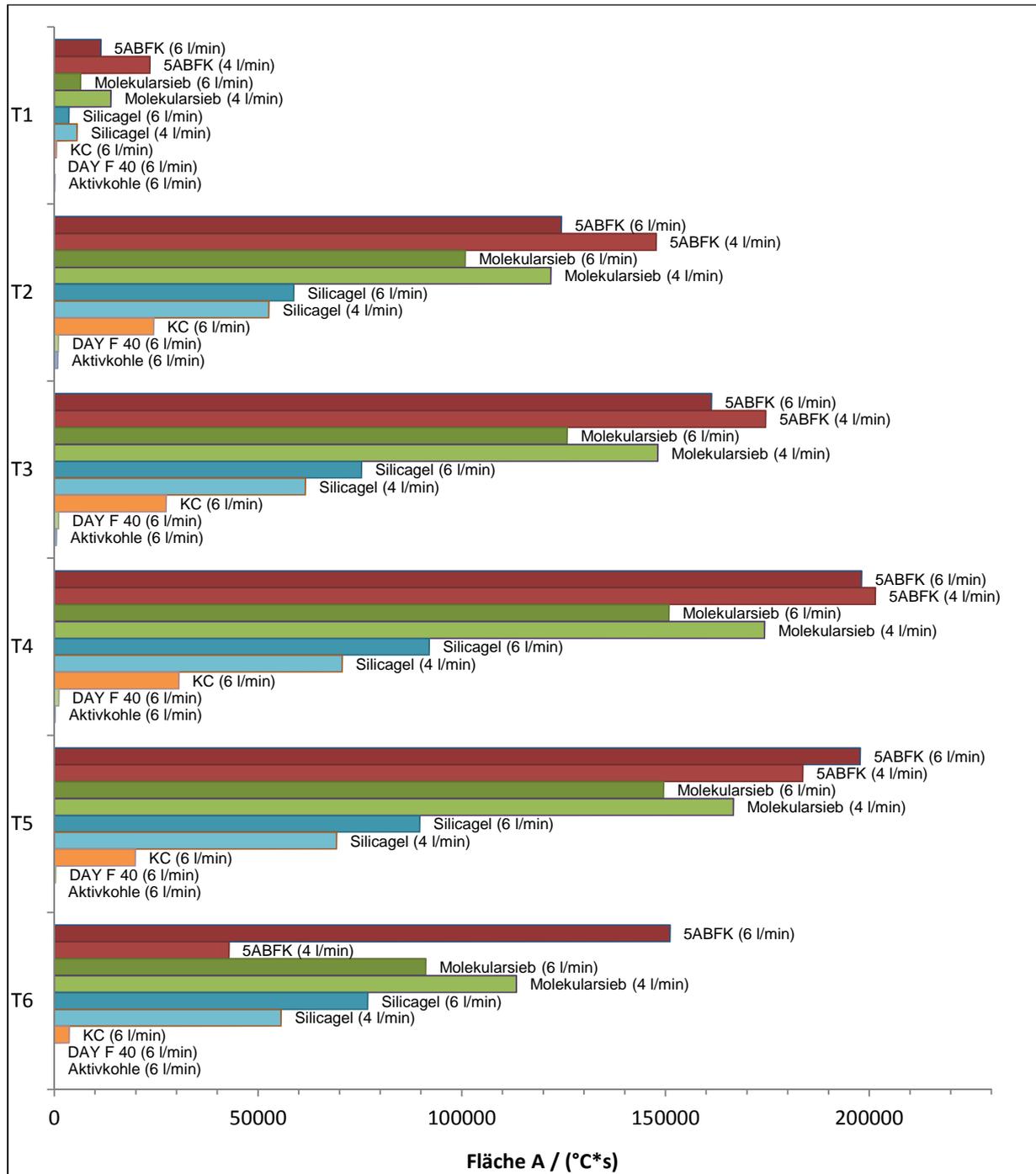


Abbildung 13: Wärmeentwicklung bei verschiedenen Materialien dargestellt durch die Flächen unter der Temperatur-Zeit-Kurve für jedes Thermoelement

Gemessen wurden sechs verschiedene Stoffe bei einem Volumenstrom von 4 l/min und 6 l/min. Zu erkennen ist, dass bei einem höheren Volumenstrom die trockene Luft einiges an Wärme mit sich trägt (vgl. Abb. 13). Je größer diese ist, desto größer ist die ausgetragene Wärme. Deshalb ist die Fläche bei kleineren Volumenströmen in der Regel etwas größer. Einen qualitativen Vergleich liefert folgendes Ergebnis, wenn man das Adsorbens 5ABFK als Referenz wählt:

Die Stoffe DAY F 40 und Aktivkohle weisen keine signifikante Wasseradsorption aufgrund ihrer hydrophoben Eigenschaften auf, und wurden deshalb nicht in den Vergleich aufgenommen. Es ist zu erkennen, dass es deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Adsorbentien gibt. 5ABFK liefert am meisten Wärme, Molekularsieb liefert ca. 33% weniger und Silicagel sogar 62% weniger Wärme als 5ABFK.

Bei der Rücktrocknung (oder auch Desorption) der verwendeten Zeolithe, Silicagele und Aktivkohle wird das bei der Adsorption gespeicherte Wasser nahezu vollständig aus den Proben entfernt.

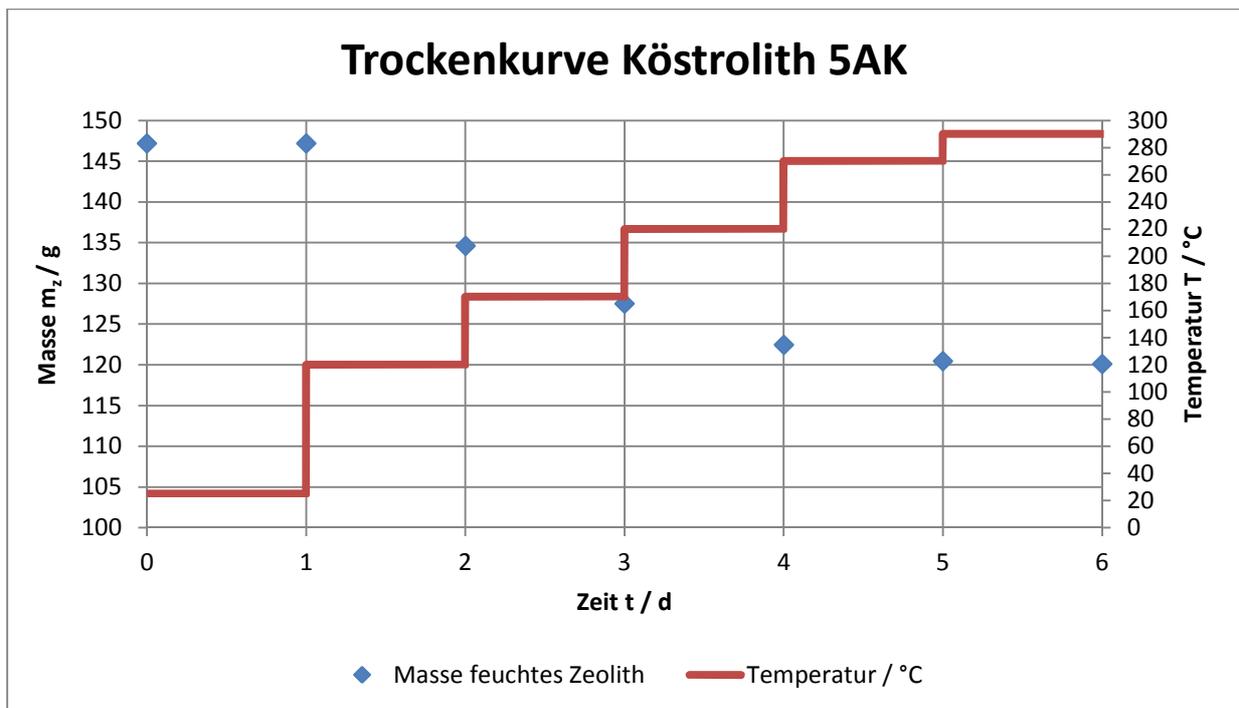


Abbildung 14: Trockenkurve Köstrolith 5AK

Wie aus dem obigen Diagramm (Abb. 14) ersichtlich ist, hängt die Desorption stark von der Temperatur ab. Es ist im ersten Abschnitt gut zu erkennen, dass schon bei einer Temperatur von 120 °C bis 170 °C ein Großteil des gebundenen Wassers wieder abgeschieden werden kann und so eine Regeneration des Zeoliths bei einer relativ geringen Wärmemenge durchgeführt werden kann.

5.3 Pilotanlage

Auf der Basis der oben beschriebenen Untersuchungen und der verfügbaren Informationen aus der Literatur wurde eine Pilotanlage geplant.

Der Versuchsbehälter soll so konstruiert werden, dass er dem späteren Aufbau eines mobilen Speichers sehr nahe ist. Die Anforderungen an den Behälter sind:

- Aufnahme einer ausreichend großen Menge an Zeolithen
- Luftdichter Abschluss bei Nichtbenutzung und Transport
- Vorrichtung zur Entnahme der gespeicherten Energie (Zuführung von Feuchtigkeit, Nutzung der Wärme)
- Vorrichtung zur Regeneration des Speichers
- Ausstattung mit entsprechender Messtechnik (Druck, Temperatur, Volumenströme)
- Wärmeisolierung

Für die Konstruktion wurde die Firma Möschle Behälterbau in Ortenberg herangezogen. Diese hat umfangreiche Erfahrung beim Bau von Druckbehältern und liegt nahe der Hochschule, so dass eine gute Zusammenarbeit zu erwarten ist. Nach Berücksichtigung aller Kriterien ist der in Abb. 15 dargestellte Versuchsbehälter entstanden. Dieser Entwurf musste immer wieder angepasst werden, da sich im Laufe der Projektentwicklung immer wieder neue Erkenntnisse ergaben, die eine Anpassung des Versuchsaufbaus mit sich zogen. Der Behälter wurde von Möschle bereits geliefert und ist einsatzbereit.



Abbildung 15: Versuchsbehälter für Zeolithspeicher

Das Kernelement des Speichers ist das Zeolith. Es gibt sehr viele verschiedene Arten von Zeolithen, die jedoch prinzipiell gleiche Eigenschaften aufweisen. Je nach Anwendung sind diese Eigenschaften nützlich oder störend. So werden bei der Herstellung der Zeolithe die gewünschten Eigenschaften speziell verstärkt oder abgeschwächt. Für dieses Projekt wird ein Zeolith benötigt, das eine besonders gute Adsorption von Wasser ermöglicht und eine hohe Energiedichte erreicht. Das bedeutet besonders viel Adsorptionswärme wird frei gesetzt wird. Gleichzeitig sollte die mechanische Festigkeit relativ hoch sein. Bei dem stationären Versuch spielt das noch keine Rolle. Später soll aber ein mobiler Einsatz erprobt werden. Durch die Erschütterungen während des Transports kommt es zu Reibung zwischen den Partikeln. Der dadurch entstehende Abrieb soll möglichst klein gehalten werden.

Für die Auswahl und Beschaffung eines geeigneten Zeoliths wurde die Firma Chemiewerke Bad Köstritz (CWK) in Thüringen herangezogen. Bei früheren Projekten wurde mit dieser Firma schon gut zusammen gearbeitet. Viele Firmen haben die Herstellung von Zeolith ins Ausland verlagert, so dass die Auswahl an Herstellern aus Deutschland sehr begrenzt ist.

Bezüglich der gewünschten Eigenschaften, hat uns CWK das Zeolith Köstrolith 4ABF (Abb. 16) empfohlen. Zeolithe vom Typ A werden weltweit am häufigsten produziert und sind entsprechend günstig. Die Zeolithe vom Typ A sind zudem sehr hydrophil. Die Partikel im Granulat sind kugelförmig und weisen einen Durchmesser von 1,6 mm – 2,5 mm auf. Das führt zu einer Schüttdichte von ca. 700 kg/m³ und damit zu einer hohen Energiedichte des Speichers.



Abbildung 16: CWK Köstrolith 4ABF

Die Wärmeerzeugung erfolgt durch Zugabe von Wasser. Da die Luftfeuchtigkeit nicht genügend Wasser bereitstellt, um die Wärme in einer akzeptablen Zeit zu entnehmen, wird eine Berieselung für das Zeolith am Deckel des Behälters installiert. Dafür werden Düsen verwendet, die besonders kleine Tröpfchen generieren, zum Teil kleiner 50 µm, um die Adsorption zu erleichtern.

Die Adsorption erfolgt immer nur in einer schmalen Schicht im Zeolithbett. Sind die Partikel in einer Schicht mit Wasser gefüllt, erfolgt keine Adsorption mehr und das Wasser muss die nächste Schicht erreichen. Damit das passiert, muss das Wasser mit einem Luftstrom durch das Bett befördert werden. Dazu wird ein Ventilator installiert, der stark genug ist den Strömungswiderstand des Bettes zu überwinden und das Wasser durch das Bett zu leiten. Gleichzeitig kann mit diesem Luftstrom auch die erzeugte Wärme aus dem Behälter befördert werden.

Dieser Ventilator wird auch zur Regeneration des Behälters genutzt. Dazu wird die Drehrichtung umgekehrt und eine Wärmequelle im Luftstrom installiert. Zur Regeneration soll Abwärme genutzt werden, jedoch gibt es an der Hochschule keine geeignete Wärmequelle um den Behälter mit den entsprechend hohen Temperaturen zu versorgen. Deshalb wird für den Versuchsstand eine elektrisch betriebene Heizquelle genutzt. Das widerspricht zwar dem angestrebten Ziel der Energieersparnis, aber in dieser Phase des Projektes geht es darum das Lade- und Entladeverhalten des Zeoliths zu ermitteln.

5.4 Vorarbeiten

Die bisher an der Versuchsanlage „Zeolithwärmespeicher“ an der Hochschule Offenburg gewonnenen Ergebnisse lassen es sinnvoll erscheinen, nach dem ortsgebundenen System jetzt auch eine mobile Versuchsanlage aufzubauen und diese in der praktischen Anwendung zu testen. Der besondere Vorteil dieser Technik liegt darin, dass je nach Prozessführung die Entladetemperatur definiert werden kann, sie kann sogar höher liegen als die Beladetemperatur. Somit können auch Anwendungsfälle bedient werden, die mit konventionellen Speichern nicht umzusetzen sind.

6 Wirtschaftlichkeitsberechnung

6.1 Zeolithwärmespeicher

Zur Zeit können über die Wirtschaftlichkeit eines Zeolithwärmespeichers nur eingeschränkte Aussagen gemacht werden. Es sind hier noch weitere Studien und experimentelle Untersuchungen notwendig. Offene Fragen gibt es z.B. noch bei der Konstruktion und Dimensionierung des Zeolithbehälters, bei der Bestimmung und Optimierung des Strömungsprofils im Adsorber und der Wärmeprofile bei der Adsorption und Desorption von Feuchtigkeit.

Folgende Punkte lassen jedoch auf eine verbesserte Wirtschaftlichkeit des Zeolithwärmespeichers gegenüber dem Latentwärmespeicher schließen. Der Zeolithwärmespeicher zeigt eine höhere Wärmespeicherkapazität (Faktor 2 – 2,5) pro Volumeneinheit auf. Es kann also die doppelte Wärmemenge transportiert werden. Die Belade- bzw. Entladezeit des Zeolithwärmespeichers sind wesentlich kürzer als die des Latentwärmespeichers. Dies erlaubt mehr Zyklen und somit einen höheren Wärmedurchsatz für den Zeolithwärmespeicher.

6.2 Latentwärmespeicher

Es folgt die Wirtschaftlichkeitsberechnung für den Latentwärmespeicher auf Basis der Daten der Firma LaTherm. Entgegen des ursprünglichen Antrags werden 4 statt 2 Container zugrunde gelegt, um eine bessere Auslastung und eine gewisse Flexibilität zu gewährleisten. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung basiert auf der VDI-Richtlinie 2067 (Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen). Den KWK-Bonus gibt es derzeit ab dem Entstehen der Voraussetzungen unbegrenzt.

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit eines Latentwärmespeichers für die Umgebung Neuried werden die Kennzahlen in drei Teilbereiche unterteilt, die jeweils separat betrachtet und analysiert werden. Jeder Teilbereich wird wiederum, in Anlehnung an die VDI 2067, unterteilt in vier weitere Unterbereiche. Die folgenden Kostenstellen dienen als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsberechnung (siehe Tabellen 2 – 13).

6.3 Wärmequelle (BHKW Neuried)

Tabelle 2: Kenndaten der Wärmequelle

Investitionskosten	
Adaption Wärmeauskopplung	€ / Invest
Übergabestation	€ / Invest
Instandhaltungsfaktor f_k	%/a d. Invest.kosten
Betriebskosten	
Bedienungskosten	€ / Zyklus
Wartungskosten	%/a d. Invest.kosten
Gutschrift KWK-Bonus	€/MWh

Bedarfskosten	
Hilfsenergie (Strom)	€ / MWh _{th}
Sonstige Kosten	
Versicherung	%/a d. Invest.kosten

6.4 Wärmelogistik

Tabelle 3: Kenndaten der Wärmelogistik

Investitionskosten	
LWS Container	€ / Invest
Chassi, gebraucht	€ / Invest
Instandhaltungsfaktor f_k	%/a d. Invest.kosten
Betriebskosten	
Wartungskosten	
Container	€ / MWh
Chassi	€ / Zyklus
Transportkosten(Wartungs-, Personalkosten)	€
Sonstige Kosten	
- Versicherung Container, Chassi	%/a d. Invest.kosten

6.5 Wärmeabnehmer

Tabelle 4: Kenndaten der Wärmeabnehmer

Investitionskosten	
Adaption Wärmeeinbindung	€ / Invest
Übernahmestation	€ / Invest
Instandhaltungsfaktor f_k	%/a d. Invest.kosten
Betriebskosten	
Bedienungskosten	€ / Zyklus
Wartungskosten	%/a d. Invest.kosten
Bedarfskosten	
Hilfsenergie (Strom)	€ / MWh _{th}
Sonstige Kosten	
Versicherung	%/a d. Invest.kosten

6.6 Kalkulationsgrundlagen

Es wird angenommen, dass die Nutzungsdauer der Anlagenkomponenten dem Betrachtungszeitraum ($T = T_N$) entspricht, d.h. nach Ablauf des Betrachtungszeitraums ist der Restwert der Anlagenkomponenten gleich Null. Außerdem gibt es keine Ersatzbeschaffungen. Der preisdynamische Annuitätsfaktor (ba) unterscheidet nicht zwischen kapitalgebundenen, bedarfsgebundenen, betriebsgebundenen und sonstigen Kosten:

$$ba = ba_{IN} = ba_V = ba_B = ba_S$$

6.6.1 Kapitalgebundene Kosten

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_n - R_w) \cdot a + \frac{f_k}{100} \cdot A_0 \cdot ba_{IN}$$

$A_{N,K}$	Annuität der kapitalgebundenen Zahlungen in €/a
A_0	Investitionsbetrag in €
$A_{1,2, \dots, n}$	Barwert der ersten, zweiten, ..., n-ten Ersatzbeschaffung
R_w	Restwert
a	Annuitätsfaktor
f_k	Faktor für die Instandsetzung in % des Investitionsbetrages im Jahr
ba_{IN}	Preisdynamischer Annuitätsfaktor für Instandsetzungszahlungen

$$a = \frac{q-1}{1-q^{-T}}$$

$$b = \frac{1 - \left(\frac{r}{q}\right)^T}{q-r}$$

$$ba_{IN} = b_{IN} \cdot a$$

T_N	Nutzungsdauer der Anlagenkomponente in Jahren
T	Betrachtungszeitraum in Jahren
q	Zinsfaktor
r	Preisänderungsfaktor
n	Anzahl der Ersatzbeschaffungen innerhalb des Betrachtungszeitraums

6.6.2 Bedarfsgebundene Kosten

$$A_{N,V} = A_{V1} \cdot ba_V$$

$A_{N,V}$	Annuität der bedarfs-(verbrauchs-)gebundenen Zahlungen in €/a
A_{V1}	bedarfs-(verbrauchs-)gebundene Zahlungen im ersten Jahr in €
ba_V	preisdynamischer Annuitätsfaktor für bedarfs-(verbrauchs-)gebundene Zahlungen

6.6.3 Betriebsgebundene Kosten

$$A_{N,B} = A_{B1} \cdot ba_B$$

$A_{N,B}$	Annuität der betriebsgebundenen Zahlungen in €/a
A_{B1}	betriebsgebundene Zahlungen im ersten Jahr in €
ba_B	preisdynamischer Annuitätsfaktor für betriebsgebundene Zahlungen

6.6.4 Sonstige Kosten

$$A_{N,S} = A_{S1} \cdot ba_S$$

$A_{N,S}$	Annuität der sonstigen Zahlungen in €/a
A_{S1}	Sonstige Zahlungen im ersten Jahr in €
ba_S	preisdynamischer Annuitätsfaktor für sonstige Zahlungen

6.7 Wirtschaftlichkeitsberechnung Mobile Wärme

Die bei dem BHKW Neuried derzeit noch ungenutzte Wärme soll zu Heizzwecken verwendet werden. Als Abnehmer dieser sogenannten ‚Mobilen Wärme‘ kommt ein Gartenbaubetrieb in Offenburg mit 13 Gewächshäusern sowie ein Schwimmbad in Frage. Die Gewächshäuser sind in den Monaten Oktober bis April frostfrei zu halten. Während dieser Periode werden momentan noch 70.000 l Heizöl benötigt. Dies entspricht einem Energiebedarf von 630 MWh/a. Das Schwimmbad gehört zu den Klosterschulen Offenburg und benötigt derzeit 100.000 l Heizöl im Jahr, also entsprechend 900 MWh/a Energiebedarf. Der Wärmebedarf ist ganzjährig mit Ausnahme der schulfreien Zeit.

Die Mobile Wärme der Biogasanlage Neuried wird mittels eines Wärmetauscher ‚abgeholt‘ und in einen Standardcontainer geladen. Dieser Beladevorgang dauert 10 Stunden. Danach wird der Container mit Chassis von einem Spediteur zu den Wärmeabnehmern, dem Gartenbaubetrieb und dem Schwimmbad, gebracht. Die Entladung der Wärme dauert ca. 15 Stunden.

In dem Container können 2 MWh Energie geladen werden. Damit die Wärmelieferung möglichst reibungslos funktioniert, werden 4 dieser Container von der Firma LaTherm gekauft. So können 2 Container jeweils mit Mobiler Wärme beladen werden, während die anderen 2 bei den Kunden zur Entladung stehen. Es entsteht so ein rollierendes System.

Betrachtet man die Heizztage, so sind dies für den Gartenbaubetrieb 200 Tage und für das Schwimmbad 300 Tage im Jahr. Setzt man dies ins Verhältnis zu dem erforderlichen Wärmebedarf (MWh/a), so ergibt sich, daß jeder der beiden Kunden im Schnitt 1,5mal täglich angefahren wird. So erhalten beide pro Tag 3 MWh Wärme, was einer Jahresleistung von 600 MWh beim Gartenbaubetrieb und einer

Jahresleistung von 900 MWh beim Schwimmbad entspricht. Der Energiebedarf kann somit bei beiden über Mobile Wärme gedeckt werden.

Betrachtet man nun den Invest, der an den einzelnen Stellen zu tätigen ist, so ergibt sich folgendes:

Bei der Biogasanlage muss eine Übergabestation errichtet werden, die 30.000,- € kostet. Des Weiteren entstehen Kosten für die Bedienung und Wartung der Anlage in Höhe von etwa 10.000,- €. Weiter sind Kosten für Strom und Versicherung zu berücksichtigen. So kommt man auf eine Summe von 43.500,- €.

Der Betreiber der Biogasanlage profitiert davon, dass es nach dem Erneuerbare-Energie-Gesetz den KWK-Bonus in Höhe von 30,- €/MWh gibt. Dies entspricht für die vorrausichtlich entnommene Wärme von 1.500 MW einem Betrag von 45.000,- € pro Jahr.

Die Container der Firma LaTherm kosten inklusive einem Elektronikpaket 280.000,- €. Um diese jedoch transportieren zu können, werden noch 4 gebrauchte Chassis angeschafft, Marktpreis derzeit pro Stück 15.000,- €. Hinzu kommen auch hier Wartungskosten von 4.000,- € im Jahr.

Insgesamt werden also im ersten Jahr folgende Kosten entstehen:

Übergabestation	30.000,- €
Bedienungs- und Wartungskosten an der Übergabestation	10.300,- €
Strom und Versicherung	3.150,- €
Container	280.000,- €
Chassis	60.000,- €
Wartungskosten Container und Chassis	4.000,- €
Transportkosten (Kosten pro Zyklus 100,- € x 500 Zyklen)	50.000,- €
Summe der Kosten im ersten Jahr für den Betreiber:	437.450,- €

Hiervon wird der KWK-Bonus in Höhe von 45.000,- € abgezogen, so dass tatsächliche Kosten in Höhe von **392.450,- € im ersten Jahr** entstehen.

In den Folgejahren fallen folgende Kosten an:

Bedienungs- und Wartungskosten an der Übergabestation	10.300,- €
Strom und Versicherung	3.150,- €
Wartungskosten Container und Chassis	4.000,- €
Transportkosten	50.000,- €
Summe der Kosten in den Folgejahren	17.500,- €

Diese Kosten unterliegen der jährlichen Preissteigerung.

Die Kosten im ersten Jahr beim Kunden sehen folgendermaßen aus:

Anschluss an die vorhandene Leitung	20.000,- €
Übergabestation	10.000,- €
Bedienungskosten an der Übergabestation je 20,- € pro Zyklus, d.h. beim	
Gartenbaubetrieb	4.000,- €
Schwimmbad	6.000,- €
Wartungskosten	300,- €
Stromkosten für den Gartenbaubetrieb	1.200,- €
Stromkosten für das Schwimmbad	1.800,- €
Versicherung	150,- €

Summe der Kosten im ersten Jahr für den Gartenbaubetrieb 35.650,- €

Summe der Kosten im ersten Jahr für das Schwimmbad 38.250,-€

In den Folgejahren werden für den Gartenbaubetrieb Kosten in Höhe von 5.650,- € pro Jahr entstehen, für das Schwimmbad 8.250,- € pro Jahr. Dies sind die Kosten für Bedienung der Übergabestation, Wartung, Strom und Versicherung. Auch hier ist die jährliche Preissteigerung zu berücksichtigen.

Wärmepreisberechnung

Davon ausgehend, dass die Kosten des Betreibers der Mobilen Wärme komplett finanziert werden müssen und der Kunde seine Kosten selbst finanziert, des Weiteren man von einem Amortisationszeitraum von 15 Jahren ausgeht und von einer Verzinsung von 6 %, sowie einer jährlichen Preisdynamik von 3 %, so erhält man für diese Zeit eine Annuität pro Jahr von 67.187,78 €. Hierbei ist der ausbezahlte KWK-Bonus bereits berücksichtigt. Ins Verhältnis zu der zu liefernden Wärmemenge ergibt sich ein Wärmepreis von 45,- € pro MWh. Um einen tatsächlichen Gewinn zu erwirtschaften, sollte der Wärmepreis jedoch im Verkauf höher angesetzt werden. Der Preis von 45,- € führt lediglich zu einer Deckung der laufenden Kosten.

Wenn der Kunde/Wärmeabnehmer seine Investitionskosten ebenfalls zu 100 % fremdfinanziert, auf 15 Jahre zu 6 %, jährliche Preisdynamik von 3 % mit einberechnet, so erhält man hier eine Annuität pro Jahr von 9.881,62 € für den Gartenbaubetrieb und von 13.004,18 € für das Schwimmbad.

Für das Heizöl ergibt sich derzeit ein Preis von 84 ct/l, dies multipliziert mit dem oberen Heizwert und dem Anlagen-Wirkungsgrad von 90 %, erhält man den Heizölpreis von 80,- €/MWh. Damit ergibt sich für den Gartenbaubetrieb, dass er jährlich 48.000,- € für seine erforderlichen 600 MWh/a ausgeben müsste. Das Schwimmbad kommt auf 72.000,- € pro Jahr für die erforderlichen 900 MWh/a. Die Preisdynamik der folgenden Jahre wurde hier nicht mit eingerechnet. Hinzu kommen die Kosten für Schornsteinfeger, Wartung und Strom.

Angenommen der Wärmepreis wird mit 45,- €/MWh so an den Kunden weitergegeben, so kostet dies den Gartenbaubetrieb pro Jahr 27.000,- €. Mit der Annuität dazu also Kosten in Höhe von 36.881,- € statt 48.000,- € für Heizöl. Für das Schwimmbad kostet die Mobile Wärme 40.500,- € plus die Annuität, also Kosten von 53.504,- € anstatt 72.000,- € mit Heizöl.

Bei einem kalkulierten Wärmepreis von 50,- €/MWh, damit für den Betreiber eine Gewinnspanne (hier: 7.500,- €) entsteht, kostet dies den Gartenbaubetrieb 30.000,- €, zuzüglich seiner jährlichen Annuität also insgesamt 39.881,- € statt 48.000,- € für Heizöl. Für das Schwimmbad kämen Kosten von 45.000,- € für die Mobile Wärme zuzüglich der Annuität also 58.004,- € statt 72.000,- € mit Heizöl.

Erst ab einem Wärmepreis von etwa 60,- € wird die Differenz zum Heizölpreis so gering, dass es sich für die Kunden nicht mehr rechnen würde, Mobile Wärme zu beziehen.

7 Zusammenfassung

Das Ziel des Forschungsprojekts liegt in der Untersuchung des wirtschaftlich sinnvollen Einsatzes mobiler Wärmespeicher unter Verwendung und Weiterentwicklung heute verfügbarer Technologien. Die hier untersuchten Systeme sind der Heißwasserspeicher, Latentwärmespeicher auf Basis von PCM-Materialien sowie ein Zeolithadsorber in dem Wasser adsorbiert wird. .

Die technische Bewertung der Systeme ergab folgendes:

Aus einem Warmwasserspeicher kann die Wärme nur bei der Maximal-Temperatur des Wassers T_{Start} im Speicher entnommen werden. Diese sinkt sobald Warmwasser entnommen wird und dieses durch kaltes Wasser ersetzt wird.

Im Falle des PCM-Speichers kann die Wärme bei einem konstanten Temperaturniveau entnommen werden, die der Temperatur des Phasenüberganges entspricht. Das Temperaturniveau bleibt so lange konstant bis der Phasenübergang des PCM-Materials vollständig abgeschlossen ist.

Bei einem Zeolithspeicher kann die Entlade-Temperatur beliebig eingestellt werden. Sie hängt ab von der Menge an Wasser, die pro Zeiteinheit dem Zeolithspeicher zugeführt wird. Wird in kurzer Zeit viel Wasser zugeführt, so kann die Wärme auf einem Temperaturniveau entnommen werden, das höher sein kann als die Ladetemperatur.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Entnahmetemperatur sowohl beim Warmwasserspeicher als auch beim PCM-Speicher durch die Bauart und das verwendete Speichermaterial festgelegt sind. Nur im Falle des Zeolithspeicher kann die Entnahmetemperatur beliebig eingestellt werden. Ein weiterer Vorteil des Zeolithspeichers liegt in der pro Volumeneinheit speicherbaren Energiemenge. Diese liegt beim Zeolithspeicher ca. 220 kWh/m^3 . Im Gegensatz dazu kann in einem PCM-Speicher ca. 100 kWh/m^3 und im Warmwasserspeicher ca. 60 kWh/m^3 gespeichert

werden. Die Lade- als auch die Entladezeiten sprechen auch für den Zeolithspeicher, da sie kürzer sind als bei den beiden anderen Speichersystemen.

Eine vergleichende Kostenabschätzung ist z.Z. noch nicht möglich, da im Falle des Zeolithwärmespeichers noch offene Punkte existieren. Jedoch spricht die höhere Wärmespeicherkapazität pro Volumeneinheit beim Zeolithwärmespeicher im Vergleich zum Latentwärmespeicher für eine bessere Wirtschaftlichkeit des Zeolithwärmespeichers. Ein weiterer Vorteil des Zeolithwärmespeichers liegt in der kürzeren Belade- und Entladezeit, was einen höheren Wärmedurchsatz zulässt.

8 Literaturverzeichnis

- [1] A. Hauer, „Thermische Energiespeicherung durch Adsorptionsprozesse – Von den thermodynamischen Möglichkeiten zu konkreten Anwendungen,“ Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung (ZAE Bayern), o.O., o.J..
- [2] M. Ohl, M. Blesl und U. Fahl, „Mobile Wärme auf Basis PCM. Kurzstudie für die EnBW AG. IER,“ Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007.
- [3] K. Scheffler, Wasserdampf tafeln : thermodynamische Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf bis 800 °C und 800 bar, Berlin: Springer, 1981.
- [4] A. Heinz und W. Streicher, „Application of phase change materials and PCM-slurries,“ Graz, o.J..
- [5] U. Stimming, H. Spliethoff und W. Schölkopf, „Nutzung von Abwärme durch mobile Sorptionsspeicher,“ ZAE Bayer, Garching, 2009.
- [6] Google Maps, „20km Umkreis um das BHKW Neuried,“ Neuried, 2011.
- [7] Jenbacher, „Technische Daten Jenbacher J316GS,“ o.O., o.J..
- [8] D. Brüggemann, „Wärme auf Rädern transportieren,“ *energy 2.0*, Nr. Oktober 2008, pp. 46-48, 2008.
- [9] LaTherm, „Informationen über Latentwärmespeicher der Firma LaTherm,“ Düsseldorf, o.J..
- [10] Elvaco, „Elvaco CMi2110,“ [Online]. Available: <http://www.elvaco.com/products/cmi-series/cmi2110>. [Zugriff am 20 Oktober 2011].
- [11] TSB - Transferstelle für rationelle und regenerative Energienutzung im ITB, „Eignung eines Latentwärmespeichers auf der Basis von Natriumacetat für die Holz-Sonne-Kopplung,“ Innovations- und Transferinstitut Bingen GmbH, Bingen, 2001.
- [12] ZAE Bayern, „Nutzung von Abwärme durch mobile Sorptionsspeicher,“ gefördert durch Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Förderkennzeichen 0327383A, Abschlussbericht, 2009.