Mobile und stationäre Latentwärmespeicher Technik, Wirtschaftlichkeit und Marktreife

Marco Deckert, Stefanie Reil, Michael Jakuttis, Samir Binder, Andreas Hornung

Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, An der Maxhütte 1, D-92237 Sulzbach-Rosenberg, Tel.: +49 (0) 9661 908-490, FAX: +49 (0) 9661 908-469,
E-Mail: marco.deckert@umsicht.fraunhofer.de, www.umsicht-suro.de

Kurzfassung: Am Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg wurde ein mobiler Latentwärmespeicher im Pilotmaßstab optimiert und erprobt. Im Fokus standen zunächst thermodynamische Untersuchungen zum Wärmeübergang sowie Versuche zur Optimierung der Be- und Entladezeiten. Ein eigens entwickelter Prüfstand im Feuerungstechnikum des Instituts ermöglichte die Durchführung der Be- und Entladevorgänge des mobilen Latentwärmespeichers unter konstanten Bedingungen. Parallel zu den Untersuchungen am Pilotspeicher wurde ein Funktionsmuster aufgebaut, um die eingesetzten Wärmeübertragersysteme weiter zu optimieren. Zur Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit des mobilen Wärmetransports, wurde der Pilotspeicher im Praxiseinsatz getestet. Im Rahmen der Erprobung des Pilotspeichers konnte die technische und wirtschaftliche Machbarkeit mobiler Latentwärmespeicher unter Beweis gestellt werden. Im Vergleich dazu werden der Stand der Wissenschaft und Technik sowie die Wirtschaftlichkeit stationärer Latentwärmespeicher aufgezeigt.

Keywords: stationäre Latentwärmespeicher, mobile Latentwärmespeicher, Latentspeichermaterialien, Abwärmenutzung

1 Einleitung

Die bedarfsorientierte Verwertung von Abwärme aus Biomassekonversions- oder Industrieprozessen durch Thermische Speicherung kann einen wichtigen Beitrag zur Einsparung von Primärenergie leisten. Anwendungen zur Abwärmenutzung sind bislang kaum verbreitet. So gehen in Biogasanlagen ohne Wärmenutzungskonzept rund 60 % der eingesetzten Primärenergie ungenutzt als Abwärme an die Umgebung verloren. Zukünftig bieten Latentwärmespeicher eine Option, um Abwärmepotenziale zu erschließen und die Energieeffizienz zu steigern. Durch Speicherung von Wärme auf einem konstanten Temperaturniveau wird vorwiegend der Phasenwechsel von fest zu flüssig und umgekehrt angewandt, was in einer Erhöhung der Speicherkapazität resultiert. Im Vergleich zu sensiblen Wärmespeichern, die beispielsweise Wasser als Speichermedium verwenden, ist die Energiedichte von Latentwärmespeichern signifikant höher. Doch neben dem zeitlich diskontinuierlichen Wärmebedarf, stellt häufig auch die Entfernung zwischen Wärmequelle und Wärmesenke ein Hindernis für die Nutzung der Abwärme dar. Für diese Anwendungsfälle kann ein Distributionssystem auf Basis von mobilen Speichereinheiten sinnvoll sein. Durch die Speicherung ungenutzter Wärme erfolgt eine zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch. Bei mobilen Anwendungen gelingt zusätzlich eine räumliche Trennung zwischen Erzeugeranlage und dem Ort des Energiebedarfs.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Latentwärmespeicher ermöglichen ein bedarfsorientiertes Energiemanagement und können ein wesentlicher Baustein zur Steigerung der Energieeffizienz verfahrenstechnischer Prozesse und deren Wirtschaftlichkeit in einem vielfältigen Anwendungsbereich sein. Bisher werden jedoch wenige Latentwärmespeicher im Temperaturbereich von 50 - 100 ºC kommerziell genutzt, da sich diese für die breite Anwendung meist noch zu preisintensiv darstellen. Grundsätzlich können Latentwärmespeicher nach Art der Wärmeübertragung in direkte und indirekte Systeme unterschieden werden. Bei direkten Systemen erfolgt die Wärmeübertragung durch unmittelbaren Kontakt des Wärmeträgermediums mit dem Latentspeichermaterial. Diese erzielen hinsichtlich der Wärmeübertragung zwar sehr gute Ein- und Ausspeicherraten, konnten sich bisher aber nicht am Markt etablieren. Bei Latentwärmespeichern die indirekte Wärmeübertragung nutzen, sind Latentspeichermaterial und Wärmeträgermedium durch eine feste Wärmeübertragerwand getrennt. Erprobte Systeme sind als Rohr-, Rippenrohr- oder Plattenwärmeübertrager mit Metall- oder Graphitstrukturen ausgeführt. Eine Alternative stellen Matrizensysteme sowie Mikro- und Makroverkapselungen dar. Als Speichermaterialien werden überwiegend Salzhydrate im Temperaturbereich von 50 bis 100 °C verwendet. Bereits näher analysiert wurden als potenzielle Speichermaterialien Natriumacetat-Trihydrat, Natriumsulfat, Bariumhydroxid-Octahydrat sowie die eutektische Salzmischung 86 % Magnesiumnitrat-Hexahydrat gemischt mit 14 % Lithiumnitrat (KNIEP 1995), (HALE ET AL. 1971). Der Einsatz von Latentwärmespeichern kann sowohl in stationären als auch mobilen Anwendungen erfolgen. Da Wärme vorwiegend bedarfsgerecht bereitgestellt wird, finden stationäre Latentwärmespeicher bisher wenig Anwendung. Eine Alternative sind mobile Latentwärmespeicher, die Abwärme wirtschaftlich nutzbar machen können, da der Ort der Wärmenutzung unabhängig vom Ort der Wärmeerzeugung gewählt werden kann. Im Weiteren soll ein Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik sowohl für stationäre, als auch für mobile Latentwärmespeicher gegeben werden. Der Fokus liegt dabei auf Niedertemperaturanwendungen bis 120 °C für den Einsatz in Industrieprozessen, Biogas- und Müllverbrennungsanlagen sowie der Haus- und Gebäudetechnik.

2.1 Stationäre Latentwärmespeicher

Die insolvente Firma *Alfred Schneider GmbH* entwickelte im stationären Anwendungsbereich einen Latentwärmespeicher, der unter dem Namen Schneider-Speicher oder Volksspeicher bekannt wurde. Der Latentwärmespeicher, dargestellt in Abb. 1, nutzt die Phasenwechselenthalpie des Salzhydrates Natriumacetat-Trihydrat. Ein integrierter Plattenwärmeübertrager im Speichermodul dient als Wärmeübertrager. Der Schneider-Speicher wurde für Wärmesysteme mit einem Temperaturniveau im Bereich von 60 - 90 °C konzipiert und kann nach Herstellerangaben sowohl als Kurzzeitspeicher für den Tagesbedarf als auch als Langzeitspeicher ausgelegt werden [VOLKSSPEICHER 1999].

Abb. 1: Aufbau Schneider-Speicher [VOLKSSPEICHER 1999]

Auch die Firma *H. M. Heizkörper GmbH & Co. KG* bietet ein stationäres Latentwärmespeichersystem an, welches unter der Marke Thermobatterie vertrieben wird. Das Grundprinzip basiert auf einen zylindrischen Latentwärmespeicher, der mit einem Wärmeübertrager in Form von Edelstahlrohren und Aluminiumlamellen versehen ist. Als Speichermaterial dient ebenfalls Natriumacetat-Trihydrat. Die zylindrischen Latentwärmespeicher lassen sich je nach Bedarf auf größere Einheiten skalieren. Der modulare Aufbau gewährleistet auch die Speicherung geringerer Wärmemengen. Der Temperaturbereich für dieses System wird vom Hersteller auf 30 °C bis 90 °C angegeben. Die Thermobatterie dient zur Ergänzung von konventionellen Heizsystemen, kann allerdings auch als Wärmespeicher für solarthermische Anlagen genutzt werden. [HM HEIZKÖRPER 2014].

Die *K-UTEC AG Salt Technologies* in Sondershausen entwickelte einen Latentwärmespeicher für stationäre und mobile Anwendungen mit dualem Latentwärmespeicher-Stoffsystem. Das duale Stoffsystem besteht aus einem nichtkorrosiven organischen Speichermaterial und einem zweiten anorganischen Speichermaterial in Form von einer Salzschmelze. Beide Speichermaterialien befinden sich in einem vorzugsweise quaderförmigen Behälter aus korrosionsfestem, nichtmetallischem Material. Der Behälter ist durch Trennwände in mindestens zwei Sektionen unterteilt. Der Wärmeübertrager aus metallischem Werkstoff befindet sich nur in der Sektion, welche das nichtkorrosive Speichermaterial enthält. Die Wärmeübertragung erfolgt in Form von Rohrschlangen, Rohrbündeln oder Plattenwärmeübertragern. Die Salzschmelze ist hermetisch von der Umgebung sowie durch die Trennwand vom nicht korrosiven Speichermaterial abgeschlossen. Bei der Beladung wird sowohl der organische als auch der anorganische Speicherstoff erwärmt und zum Schmelzen gebracht. Beide Stoffe nehmen dabei Wärme auf. Beim Entladen wird umgekehrt dem organischen Stoff und etwas zeitverschoben dem anorganischen Stoff Wärme entzogen. Die Stoffe geben dabei ihre sensibel und latent gespeicherte Wärme an das Wärmeträgerfluid im Rohrsystem ab. Diese Entwicklung existiert bisher nur auf dem Papier. Eine praktische Umsetzung der Idee ist bisher nicht bekannt [PATENT 2011].

Ein grundlegend anderes Speicherkonzept wurde von der Firma *PowerTank GmbH* angeboten, deren Produktportfolio Ende 2012 von dem Schweizer Unternehmen *STC SolarTransfer Consult* übernommen wurde. Das Unternehmen vertreibt Latentwärmespeicher auf Paraffinbasis für den stationären Bereich. Die Latentwärmespeichersysteme bestehen aus einzelnen Latentwärmezellen, welche von einer Speicherschüttung, beispielsweise Kies oder Grauwacke, umhüllt sind [STC 2014]. In einem Landwirtschaftsbetrieb in Dänemark dient dieses Speichersystem zur Unterstützung der Wärmeversorgung durch eine solarthermische Anlage. Der zusätzliche Wärmebedarf wird mittels einer Holzheizung gedeckt. Das Prinzip der Latentwärmezellen für den stationären Bereich auf Paraffinbasis wurde auch für die mobile Anwendung entworfen. Jedoch wurde dieses Konzept nie in der Praxis umgesetzt.

Die Wirtschaftlichkeit stationärer Latentwärmespeicher in der Solarthermie, der Heizungstechnik sowie der Abwärmenutzung scheint fraglich. Bisher konnte sich kein System nachhaltig am Markt etablieren. Seitens der Hersteller werden zum Teil erhöhte Speicherkapazitäten angegeben, die Erwartungen beim Anwender wecken, auf Grund der Eigenschaften des Speichermaterials jedoch als nicht realistisch einzuschätzen sind. Zweifelsohne ist die volumenbezogene Speicherkapazität im Vergleich zum Speichermedium Wasser höher, jedoch sind Wärmespeicher, die Latentspeichermaterialien verwenden weniger dynamisch, was sich in längeren Be- und Entladezeiten wiederspiegelt. Der Einsatz von stationären Latentwärmespeichern in der Haus- und Gebäudetechnik als Pufferspeicher oder zur saisonalen Speicherung überschüssiger Wärme aus solarthermischen Anlagen ist daher sorgfältig abzuwägen. Der Vergleich eines Pufferspeichers mit einem Fassungsvermögen von 1000 l mit einem Paraffinspeicher äquivalenten Volumens und einer Phasenwechselenthalpie von 180 kJ/kg·K zeigt, dass der Latentwärmespeicher bei einer Beladetemperatur von 60 °C nur 20 kWh über dem Speichervermögen des Pufferspeichers liegt.

2.2 Mobile Latentwärmespeicher

Mobile Latentwärmespeicher bestehen aus transportierbaren Einheiten die mittels Sattelzugmaschine im Straßenverkehr befördert werden. In der Vergangenheit wurden bereits mobile Wärmespeichersysteme auf Basis von Latentspeichermaterialien vorgeschlagen. Konkret handelt es sich um einen Latentwärmespeicher mit direkter Wärmeübertragung, bei dem Wärme direkt zwischen Wärmeträgermedium und Speichermaterial übertragen wird. Das mobile Speichersystem wurde von der *TransHeat GmbH* entwickelt und verwendet wiederum Natriumacetat-Trihydrat als Latentspeichermaterial. Als Wärmeträgerfluid dient ein technisches Wärmeträgeröl wie beispielsweise Weißöl. Beide Komponenten mischen sich auf Grund von Dichteunterschieden im flüssigen Zustand nicht. Zur Beladung des Speichers, wird Wärmeträgeröl höheren Temperaturniveaus direkt durch das Natriumacetat-Trihydrat gepumpt und somit Wärme an das Latentspeichermaterial abgegeben. Die Entladung erfolgt durch Umkehrung der Fließrichtung des Wärmeträgeröls, wodurch Wärme aus dem Speichermaterial ausgespeichert wird. Die maximale Be- und Entladeleistung beträgt nach Herstellerangaben 1 MW. Die verwendeten 20-Fuß-Container beinhalten nach Angaben des Innovations- und Transferinstitut Bingen GmbH 26 Mg Natriumacetat-Trihydrat und 3 Mg Weißöl [ITB 2001]. Neben dem Speichersalz Natriumacetat-Trihydrat wurden Bariumhydroxid-Octahydrat, Magnesiumchlorid-Hexahydrat und Natriumsulfat-Decahydrat als potenzielle Speichersalze von der Firma *TransHeat GmbH* betrachtet [ITB 2001, ABO 2009]. Das Speichersystem wurde unter anderem von der *Clariant Deutschland GmbH* in Sulzbach am

Taunus (Speichermedium: Natriumacetat-Trihydrat) und der *LSG Lufthansa Service GmbH* (Speichermedium: Bariumhydroxid-Octahydrat) zur Verwertung von Abwärme angewandt [BINE 2002]. Heute sind mobile Latentwärmespeicher am Markt verfügbar und bestehen aus transportierbaren Einheiten auf Basis von 20-Fuß-Containern oder umgerüsteten Lebensmitteltanks [DECKERT 2013, FRIEDL 2013, SCHLUPECK 2013].

Die Firma *LaTherm Energie AG* bietet Wärmeversorgungssysteme für die mobile Anwendung an. Neben dem direkten Verkauf mobiler Latentwärmespeicher, verfolgt LaTherm Contractingmodelle in denen Kauf, Transport und Verkauf von Wärme für einen festen Wärmegestehungspreis angeboten werden. Der mobile Latentwärmespeicher basiert auf dem Patent des stationären Latentwärmespeichers der Firma *Alfred Schneider GmbH*. Nach der Insolvenz des Unternehmens von Alfred Schneider im Jahr 2010, kaufte die mittlerweile neu firmierte *LaTherm Energie AG* das Patentrecht für den mobilen Latentwärmespeicher auf. Die Erfindung beschreibt „einen Latentwärmespeicher mit einem Speicherbehälter, der mit einem Salzhydrat als Latentspeichermaterial gefüllt ist, wobei in dem Latentspeichermaterial zum Erwärmen oder Abkühlen eines Sekundärmediums ein Wärmeübertrager angeordnet ist, der mehrere Zwischenräume voneinander beabstandete Wärmeleitplatten aufweist, die mit dem Sekundärmedium in thermischem Kontakt stehen“ [PATENT 1999]. Das Grundgerüst dieses Speichers stellen 20-Fuß-Standard-Container und umgerüstete Lebensmitteltanks dar. Dieser wird mit einem indirekten Wärmeübertragungssystem auf Basis eines Plattenwärmeübertragers versehen. Als Speichermaterial wird ebenfalls das Salzhydrat Natriumacetat-Trihydrat verwendet [LaTherm 2014].

Auch die Firma *FSAVE Solartechnik GmbH* vertreibt einen mobilen Latentwärmespeicher, den FLEXSAVE Mobil, der anfallende Abwärme auf einem Temperaturniveau über 60 °C verwertet. Der mobile Latentwärmespeicher auf Basis eines 20-Fuß-Containers speichert Abwärme aus Industrie-, Biogas-, oder Müllverbrennungsanlagen. Auch dieses System nutzt das Latentspeichermaterial Natriumacetat-Trihydrat. Das Gesamtgewicht des Latentwärmespeichers beträgt 27 Mg, die maximale Speicherkapazität wird bei einer Temperaturdifferenz von 60 K mit 2,5 MWh angegeben [FSAVE 2014].

3 Methodik

In Kooperation mit den Firmen *FSAVE Solartechnik GmbH, Kraft GmbH & Co. KG und Ingenieurbüro Budach* wurde am Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg ein optimierter, mobiler Latentwärmespeicher im Pilotmaßstab erprobt. Der Pilotspeicher, dargestellt in Abb. 2, besteht aus zwei parallel geschalteten Teilspeichern, die in einem wärmegedämmten 20-Fuß-Container eingebaut sind und verfügt über einen Latentwärmeanteil von ca. 1,3 MWh. Unter Einbeziehung der sensiblen Speicheranteile, ist eine Speicherkapazität von insgesamt 2 MWh möglich. Als Speichermaterial dient ein Salzhydrat, welches bei der Entladung die freiwerdende Kristallisationsenthalpie abgibt. Das verwendete Natriumacetat-Trihydrat garantiert über einen definierten Zeitraum eine gleichbleibende Temperatur von ca. 58 °C. Die Teilspeicher wurden mit jeweils 24 innen liegenden Rohrregistern, die als Rohrwärmeübertrager dienen, ausgestattet. Zusätzlich wurde der Rohrwärmeübertrager eines Teilspeichers mit Graphitstrukturen erweitert, um eine verbesserte Ein- und Ausspeicherung der Wärme zu erzielen. Beide Teilspei-

cher sind mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, um das Verhalten des Phasenwechselmaterials bei den Be- und Entladevorgängen zu analysieren.

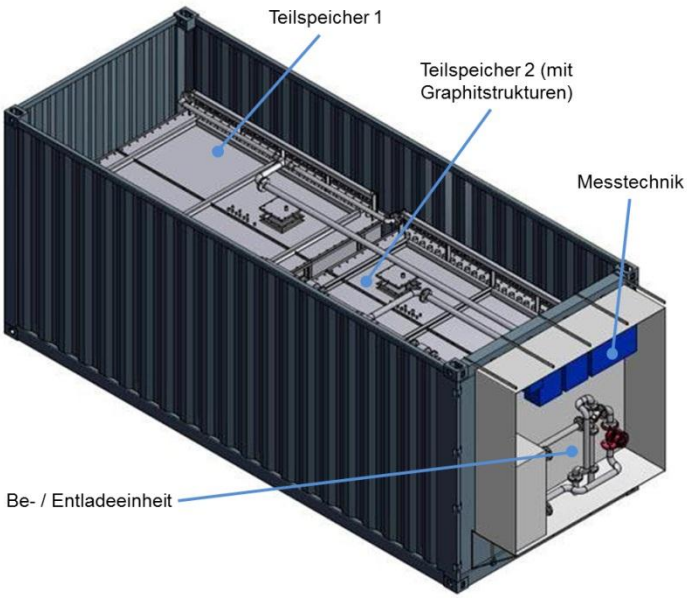

Abb. 2: Aufbau des Pilotspeichers mit zwei Teilspeichern.

4 Ergebnisse

Die Untersuchungen zum Pilotspeicher bei Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg umfassten Versuche am Prüfstand im Feuerungstechnikum des Instituts, die Optimierung der Wärmeübertragung an einem Funktionsmuster sowie den praktischen Betrieb über ein halbes Jahr, in dem der Einfluss des Anwenderverhaltens, sowie die technische und wirtschaftliche Machbarkeit analysiert werden sollte.

4.1 Untersuchungen am Prüfstand

Im Fokus standen zunächst thermodynamische Untersuchungen zum Wärmeübergang sowie Versuche zur Optimierung der Be- und Entladezeiten. Ein eigens entwickelter Prüfstand im Feuerungstechnikum des Instituts ermöglichte die Durchführung der Be- und Entladevorgänge des mobilen Latentwärmespeichers unter konstanten Bedingungen. Primär wirkt sich eine hohe Temperaturdifferenz zwischen Eintrittstemperatur und Schmelzpunkt des Salzhydrates positiv auf die Beladezeit aus. Der Schwerpunkt wurde daher auf die Variation des Volumenstroms, bei konstanten Eintrittstemperaturen von 85 °C, gelegt. Vor der Versuchsdurchführung wurde eine zu erreichende Beladekapazität von 750 kWh je Teilspeicher definiert. Die Beladekapazität von Teilspeicher 2 konnte nach 11,1 Stunden erreicht werden. Im Vergleich zu Teilspeicher 1, der nach 14 Stunden beladen war, entspricht dies einer Zeiteinsparung von 2,9 Stunden bzw. 18 % durch die Erweiterung der Rohrregister mit Graphitstrukturen. Das Diagramm in Abb. 3 zeigt exemplarisch die Beladung von Teilspeicher 2 im Technikumsversuch bei einem Volumenstrom von 5,2 m^3/h.

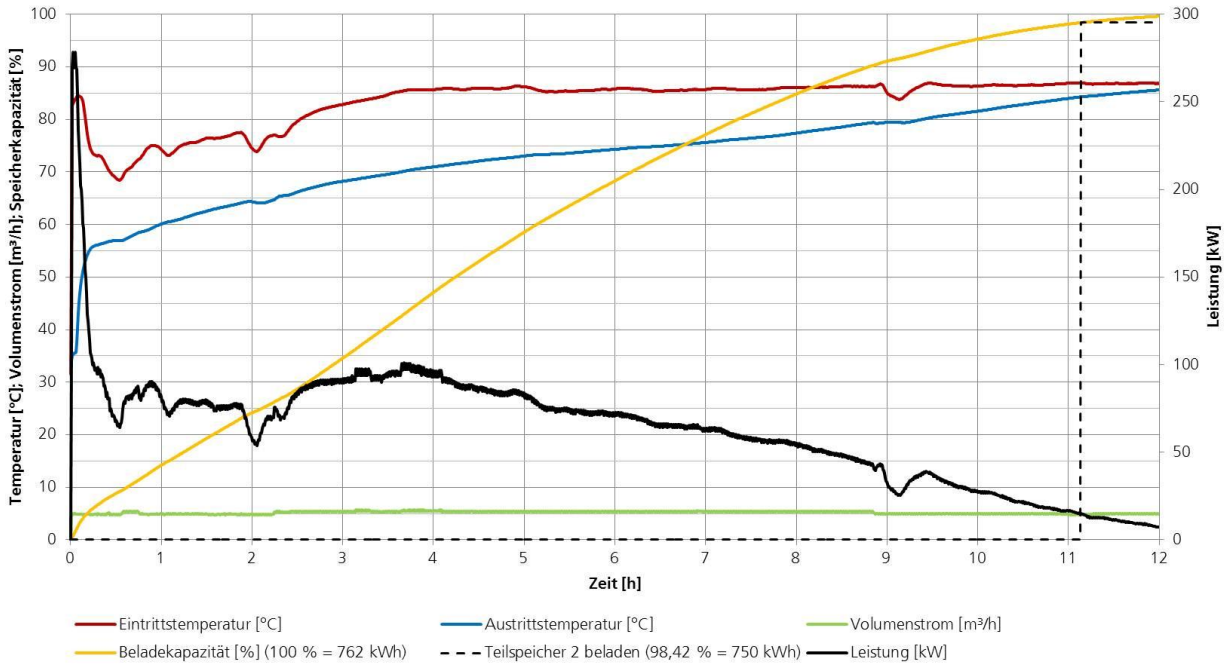

Abb. 3: Beladung von Teilspeicher 2 im Technikumsversuch

Bei der Entladung sollte die mögliche Entladezeit und die ausgespeicherte Wärmemenge ermittelt werden. Generell gelten Latentwärmespeicher als Entladen, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur des aufzuheizenden Fluids einen Wert von 5 Kelvin unterschreitet. Durch Vorgabe des Volumenstroms und einer fixen, rückgekühlten Eintrittstemperatur von 35 °C konnte ein optimaler Verbraucher durch den Prüfstand simuliert werden. Bei der Entladung war keine signifikante Zeitdifferenz zwischen den beiden Teilspeichern erkennbar. Beide Teilspeicher galten bei einem konstanten Volumenstrom je Teilspeicher von 3,5 m^3/h nach 15,2 Stunden als entladen. In Bezug auf die Güte des Speichers konnte ein Gesamtwirkungsgrad von 90 % erreicht werden. Teilspeicher 2 konnte bei einer eingespeicherten Wärmemenge von 750 kWh und einer ausgespeicherten Wärmemenge von 710 kWh sogar einen Wirkungsgrad von 94,5 % erreichen.

4.2 Untersuchungen am Funktionsmuster

Parallel zu den Untersuchungen des Pilotspeichers am Prüfstand wurde ein Funktionsmuster (Abb. 4) im Maßstab 1:50 aufgebaut, um die eingesetzten Wärmeübertragersysteme weiter zu optimieren. Auf Grund der kompakten, modularen Bauweise ist das Funktionsmuster leichter modifizierbar als der Pilotspeicher im 20-Fuß-Container. Somit konnten kurzfristig aufschlussreiche Ergebnisse generiert werden, auf deren Basis Empfehlungen zur Bau- und Fahrweise des Pilotspeichers gegeben werden konnten. Durch Variation der Abstände zwischen den Rohrregistern, des Volumenstroms und der Eintrittstemperatur wurde in mehreren Versuchsstufen eine Verkürzung der Beladezeit um 37 % erzielt.

Abb. 4: Funktionsmuster des Pilotspeichers

4.3 Untersuchungen im Praxisbetrieb

Zur Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit des mobilen Wärmetransports wurde der Pilotspeicher über einen Zeitraum von 6 Monaten im Praxiseinsatz getestet. Durch die Beladung mit Abwärme einer Biogasanlage und der Entladung in einem 6 km entfernten Nahwärmenetz wurde das System kontinuierlich im Praxisbetrieb erprobt. Das durch den Latentwärmespeicher erweiterte Nahwärmenetz wird standardmäßig über eine Hackschnitzelheizung befeuert und liefert Wärme für sechs Einfamilienhäuser, ein Bürogebäude sowie eine Lagerhalle. Der Betrieb des Pilotspeichers wurde in jeder Erprobungsphase messtechnisch begleitet, mit dem Ziel, belastbare Aussagen über die Funktionalität des Systems und für das Anwenderverhalten zu treffen. Mit den Daten und Erkenntnissen war es möglich den Praxisbetrieb sowohl energetisch als auch hinsichtlich des wirtschaftlichen Betriebs zu bewerten. Die Auswertung der Messergebnisse zeigte, dass der Latentwärmespeicher bei Eintrittstemperaturen des Heißwassers von 90 °C und einer durchschnittlichen Beladeleistungen von 120 kW die Kapazitätsgrenze stets nach 12 - 14 Stunden erreichte und voll beladen war. Die Beladekapazität ist dabei abhängig vom Temperaturniveau, bis zu dem der Latentwärmespeicher entladen wurde. Da im konkreten Anwendungsfall die Niedertemperaturwärme des Speichers für den Betrieb einer Trocknungsanlage für Holzhackschnitzel genutzt werden konnte, war es möglich diesen auf ein Temperaturniveau von 25 °C zu entladen. So wurde bei der Beladung meist eine Beladekapazität von bis zu 2000 kWh erzielt. Das Diagramm in Abb. 5 stellt exemplarisch einen Entladevorgang dar.

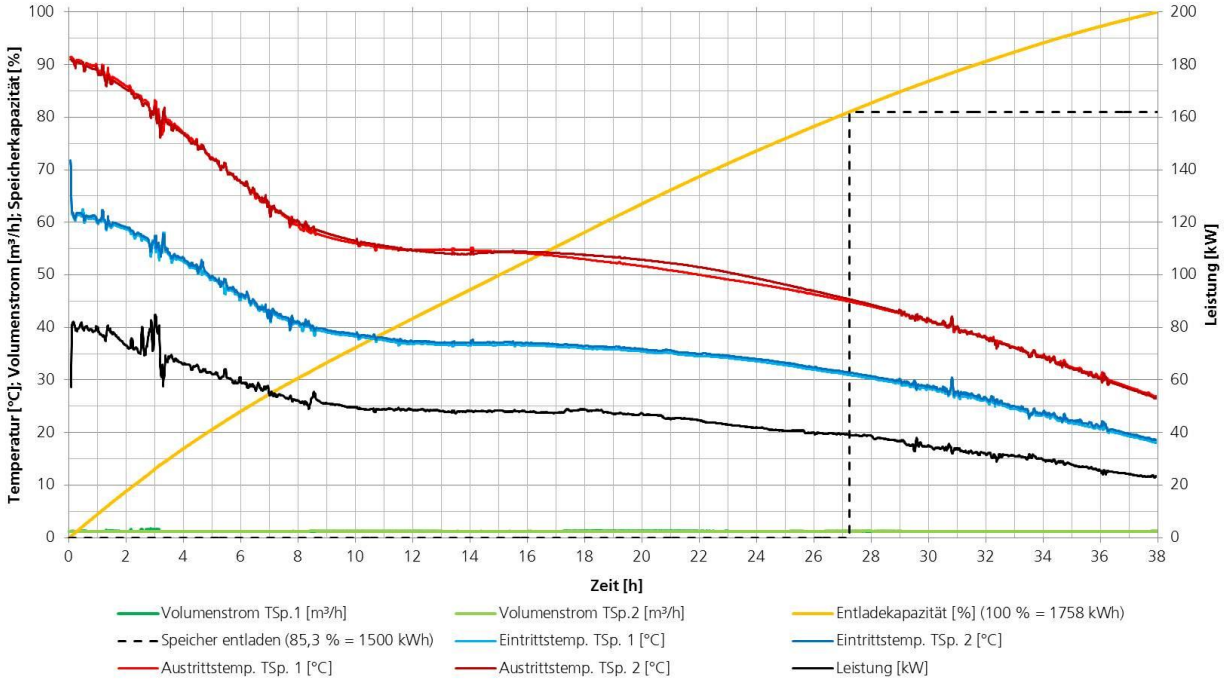

Abb. 5: Entladung des Pilotspeichers im Praxisbetrieb

Gut erkennbar ist, neben den Bereichen sensibler Wärmeabgabe, der latente Wärmeanteil im Temperaturbereich von 50 - 60 °C, in dem Wärme über einen Zeitraum von ca. 16 Stunden ausgespeichert wurde. Während der gesamten Entladung wurde aus beiden Teilspeichern in etwa die gleiche thermische Leistung entnommen, was an den nahezu identischen Leistungskurven der beiden Teilspeicher ersichtlich ist. Der Einfluss der Graphitstrukturen in Teilspeicher 2 wirkt sich im Vergleich zu Teilspeicher 1 nicht signifikant auf die Entladeleistung aus. Dies ist auf die geringe Leistungsabnahme des Verbrauchers von maximal 40 kW über die Entladezeit von 38 Stunden zurückzuführen.

4.4 Wirtschaftlichkeit mobiler Latentwärmespeicher

Nicht jeder Anwender hat die Möglichkeit die Niedertemperaturwärme technisch sinnvoll zu verwerten, sodass nach Ausspeicherung von 1500 kWh eine effektive Entladezeit von 27 Stunden erreicht ist. Ein Zyklus von Be- und Entladung, inklusive einer Umschlagzeit von einer Stunde für Wechsel und Transport der mobilen Speichereinheit ist somit in einem Zeitraum von 40 Stunden realisierbar. Betrachtet über ein Jahr sind mit einem angepassten Logistikkonzept 220 Zyklen möglich. Im Rahmen der wirtschaftlichen Bewertung wurden mit Hinblick auf anfallende Wartungsarbeiten, Personalausfälle oder nicht kontinuierliche Wärmeabnahme 200 Zyklen im Jahr zu Grunde gelegt. Als Kostenaufwand sind die fixen Investitionskosten sowie transportgebundene und betriebsgebundene Kosten, wie Diesel für den Transport oder Strom für den Betrieb der Pumpen, berücksichtigt und auf einen Zyklus von Be- und Entladung aufgeschlüsselt worden. Die Betrachtung beruht auf einer Abschreibungsdauer von zehn Jahren und einer vollständigen Eigenfinanzierung ohne anfallende Zinsen. Bei einer transportierten Wärmemenge von 1500 kWh/Zyklus über 200 Zyklen/a und einer Entfernung von 6 km zwischen Wärmequelle und Wärmesenke im Pilotbetrieb ergeben

sich die Wärmegestehungskosten zu 5,0 ct/kWh bei der Verwendung von zwei Latentwärmespeichern im Wechselbetrieb (Abb. 6). Ausgehend von einem durchschnittlichen Fernwärmepreis von 7,4 ct/kWh, wird für jede transportierte Kilowattstunde ein Gewinn von ca. 2,4 ct erzielt [IHK 2013].

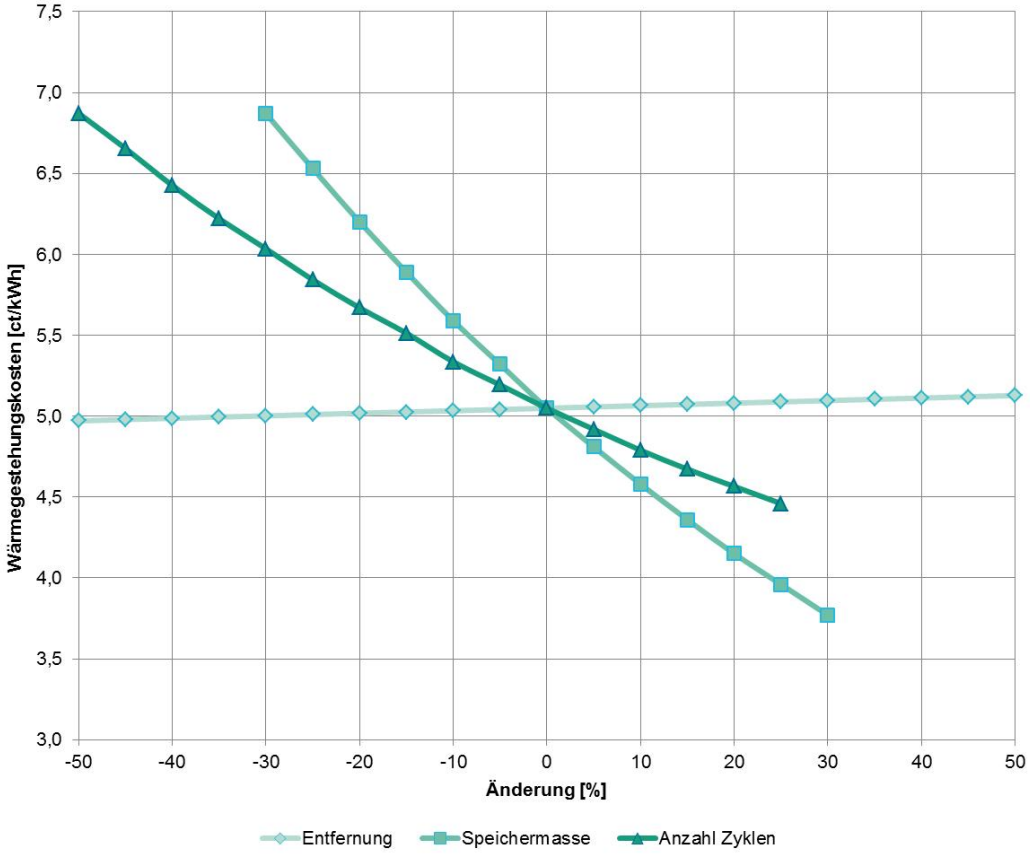

Abb. 6: Sensitivitätsanalyse des Pilotspeichers

Mit für den Markt gefertigten Systemen in der Bauform des Pilotspeichers gelingt es, die Wärmegestehungskosten weiter zu reduzieren, was in der Sensitivitätsanalyse in Abb. 6 deutlich wird. Diese werden auf die für den Straßentransport maximal zulässige Gesamtmasse ausgelegt und können mit einem Speicherinhalt von 21000 kg die Wärmegestehungskosten auf 3,7 ct/kWh senken. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Zyklenzahl, die im Jahresverlauf so hoch wie möglich zu halten ist. Im Vergleich zur Speichermasse und zur Zyklenzahl weist die Transportstrecke die geringste Sensitivität auf. Bei Verwendung von zwei Speichern beläuft sich diese auf 12 km je Zyklus. Selbst eine um 50 Prozent längere Transportstrecke wirkt sich lediglich mit einer geringfügigen Erhöhung der Wärmegestehungskosten auf 5,1 ct/kWh aus. Es ist zu berücksichtigen, dass mobile Latentwärmespeicher auf Grund der Phasenwechseltemperatur von 58 °C vorwiegend zur Unterstützung bestehender Heizsysteme eingesetzt werden, um die Brennstoffkosten zu verringern. Die Grafik in Abb. 7 zeigt in diesem Zusammenhang Wärmegestehungskosten konventioneller Heizsysteme. Demnach stellen vor allem Gas- und Ölheizungen potenzielle Heizsysteme für die Anwendung mobiler Latentwärmespeicher dar.

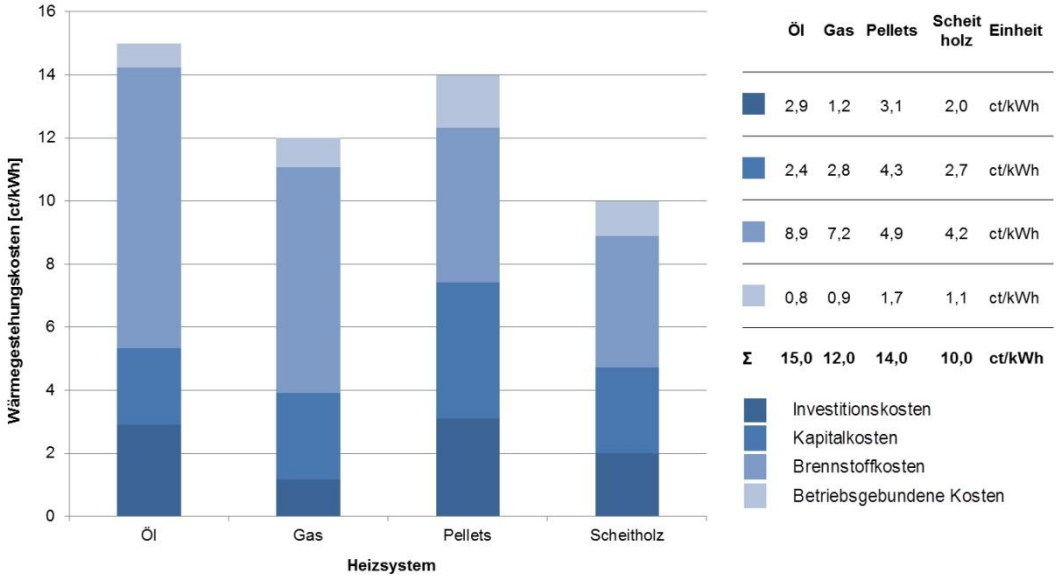

Abb. 7: Wärmegestehungskosten vergleichbarer Heizsysteme, eigene Berechnung nach [FNR 2009]

5 Fazit

Im Rahmen der Erprobung des Pilotspeichers konnte die technische und wirtschaftliche Machbarkeit mobiler Latentwärmespeicher unter Beweis gestellt werden. Im Vergleich zu stationären Latentwärmespeichern gelingt es mobilen Latentwärmespeichern, durch Substitution von Primärenergie konventioneller Heizsysteme, wirtschaftlich zu arbeiten. Neben der Speicherkapazität dieser Systeme ist die Wirtschaftlichkeit entscheidend von der Zyklenzahl im Jahresverlauf und vom Anwenderverhalten abhängig. Voraussetzung hierfür ist, dass Abwärme ungenutzt ist und kostenfrei zur Verfügung steht. Auf technischer Seite sind schnelle Lade- und Entladezeiten notwendig. Durch Variation der Parameter Durchfluss, Eintrittstemperatur, primärseitige Leistungsabgabe und -entnahme sowie Material und Geometrie des Wärmeübertragersystems konnten optimierte Ladezeiten für den Latentwärmespeicher ermittelt werden. Der Einsatz von Graphitstrukturen hatte dabei einen positiven Einfluss auf die Beladezeit. Allerdings wirken sich diese Elemente intensiv auf die Fertigungskosten mobiler Latentwärmespeicher aus. Durch die gewonnen Ergebnisse am Funktionsmuster ist eine Verkürzung der Be- und Entladezeiten ebenso durch Verringerung der Rohrabstände zwischen den Rohrregistern zu erzielen. Aufbauend auf den gewonnen Erkenntnissen ist es mit dem am Markt verfügbaren System zukünftig möglich, vor allem bei ungenutzten Abwärmepotenzialen, mobile Latentwärmespeicher einzusetzen.

Literatur

ABO 2009 — A-B-O UMWELTSERVICE GMBH: *Der Anfang bei TransHeat*. Im Internet: http://www.a-b-o-umweltservice.com/documents/Waerme-Transport-16Juli2009-Vers5.pdf [Zugriff am: 24.01.2014].

BINE 2002 — BINE INFORMATIONSDIENST (Hrsg.): *Latentwärmespeicher*. *Themeninfo IV/02*. Im Internet: http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Themen-Infos/IV_2002/themen0402internetx.pdf [Zugriff am: 24.01.2014].

DECKERT 2013 — DECKERT ET AL: *Wärme nimmt Fahrt auf*. Mobiler Latentwärmespeicher auf dem Prüfstand. BWK Das Energie-Fachmagazin Bd. 65. (2013), Nr. 9, S34-37.

EEG 2012 — ERNEUERBARE-ENERGIEN-GESETZ (EEG) 2012: *Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien*. 04.08.2011, Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 42, S. 1634.

FNR 2009 — FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (Hrsg.): *Holzpellets*. 6. Auflage. Gülzow: Media Cologne Kommunikationsgesellschaft GmbH, 2009.

FRIEDL 2013 — FRIEDL; CHRISTL: *Heiße Ware*. Recycling Magazin, Nr. 12 (2013), S. 26-29.

FSAVE 2014 — FSAVE SOLARTECHNIK GMBH: *FLEXSAVE MOBIL*. Im Internet: http://www.fsave.de/download/FLEXSAVE%20MOBIL%20Informationen%202012.pdf [Zugriff am: 24.01.2014].

HALE ET AL. 1971 — HALE, D.V. ; HOOVER, M.J. ; O´NEILL, M.J.: *Phase Change Materials Handbook. Huntsville Alabama* : Lockheed Missiles and Space Company, Huntsville Research and Engineering Center, 1971.

HM HEIZKÖRPER 2014 — H. M. HEIZKÖRPER GMBH & CO. KG: *Thermobatterien*. Im Internet: http://www.thermobatterie.net/uploads/media/Thermobatterie_HM-Heizkoerper.pdf. [Zugriff am: 24.01.2014].

IHK 2013 — IHK SCHLESWIG-HOLSTEIN, ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INDUSTRIE- UND HANDELSKAMMERN ZU FLENSBURG, ZU KIEL UND ZU LÜBECK (Hrsg.): *VEA-Fernwärme-Preisvergleich 2013*. Im Internet: http://www.ihk-schleswig-holstein.de/innovation/energie/zahlen_daten_fakten/734186/VEA_Fernwaerme_Preisvergleich.html;jsessionid=C0353E36C6070C61A062DC251E9B1D20.repl1 [Zugriff am: 24.01.2014].

ITB 2001 — INNVATIONS- UND TRANSFERINSTITUT BINGEN GMBH: *Abwärmenutzung mit dem TransHeat-System*. 05.09.2001 Im Internet: http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/downloads/Projekte/Seeg/transhead.pdf [Zugriff am 24.01.2014].

KNIEP 1995 — KNIEP, R.: *Latentwärmespeicher in Kraftfahrzeugen: Speichersalze im Blickpunkt*. In: GIT Fachzeitschrift Labor Vol. 12 (1995), S. 1137-1141.

LATHERM 2014 — LATHERM ENERGIE AG: Latentwärmespeicher. Im Internet: http:www.latherm.de/ [Zugriff am: 24.01.2014].

PATENT 1999 — PATENTSCHRIFT: EP 1098157 A3 (04.11.1999). Alfred Schneider GmbH.

PATENT 2001 — PATENTSCHRIFT EP1098157 A2 (09.05.2001). Alfred Schneider GmbH.

PATENT 2011 — PATENTSCHRIFT: DE 102009034772 A1 (27.01.2011). K-UTEC AG Salt Technologies.

SCHLUPECK 2013 — SCHLUPECK; BERND: *Heizen mit E 260*. Recycling Magazin, Nr. 03 (2013), S. 32-33.

STC 2014 — STC SOLARTRANSFER CONSULT: *Latentwärmespeicher*. Im Internet: http://www.latentspeicher.com/de [Zugriff am: 24.01.2014].

TAB 2008 — TAB BÜRO FÜR TECHNOLOGIE-ABSCHÄTZUNG BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG (Hrsg.): *Energiespeicher : Stand und Perspektiven*. Sachstandsbericht zum Monitoring Nachhaltige Energieversorgung (Februar 2008), Arbeitsbericht Nr. 128. Im Internet: http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab123.pdf [Zugriff am: 24.01.2014].

VOLKSSPEICHER 1999 — ALFRED SCHNEIDER GMBH: *Solarthermische Energietechnik, thermische Energiespeicher*. Im Internet: http://www.oocities.org/infotaxi/volksspeicher [Zugriff am: 24.01.2014].