



Messprotokoll

Untersuchung der wärmetechnischen Parameter eines Latentwärmespeichers

Auftraggeber:

Jekusol GmbH Dipl.-Ing. Klaus-Dietmar Lamprecht Anton-Bruckner-Weg 10 D-07743 Jena

Ausführende:

Hochschule Zittau/Görlitz, Fakultät Maschinenwesen, Fachgebiet Energiesystemtechnik Dipl.-Ing.(FH) Christoph Ebermann

Fraunhofer IFAM Dresden, Geschäftsfeld Energie und Thermisches Management Prof. Dr.-Ing. Jens Meinert





<u>Testobjekt</u>

- Speicherabmessungen B x T x H = 0,6 x 0,6 x 1,2 m \rightarrow Speichervolumen V = 0,432 m³
- Speichermasse m = 500 kg
- PCM (Phase Change Material) \rightarrow Bariumhydroxid-Octahydrat Ba(OH)₂ x 8 H₂O mit einer Schmelztemperatur von T_{Sch} \approx 78 °C
- Messung mit Wasser als Wärmeträger

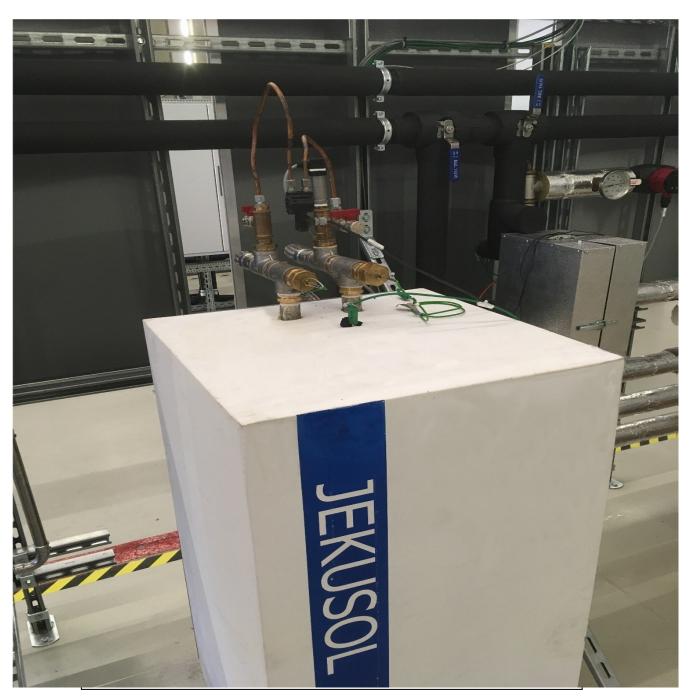


Abbildung 1: Speicher mit vollständigen hydraulischen und messtechnischen Anschlüssen





Übersicht der Messfahrten:

	Beladung		Entladung		
Messfahrt	ṁ	T ₁	ṁ	T ₁	
Messianri	[kg/s]	[°C]	[kg/s]	[°C]	
1	0,25	93,56	0,24	60,63	
2	0,28	94,61	0,26	43,69	
3	0,34	94,19	0,34	52,09	

Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Messfahrten mit dem eingestellten Massestrom m und der Vorlauftemperatur T₁, angegeben als gemittelte Werte über die Messdauer

Messfahrt 1:

→ Beladen des Speichers (23.06.2017)

Beginn/Ende der Messfahrt (ausgewerteter Zeitraum)	23.06.17, 8:43 Uhr bis 12:25 Uhr	
Messdauer	min	222
Zugeführte Wärmemenge (kumuliert)	MJ	83,50
	kWh	23,19
AA:add a a a a AA: a a a a a a a a a a a a a a	kg/s	0,25
Mittlerer Wärmeträgerstrom	l/min	15,24
Values atvis als a Consist and alst a*	kWh/m³	53,69
Volumetrische Speicherdichte*	kJ/l	193,28
Mittlere thermische Leistung im Auswertezeitraum	kW	6,27
Mittlere volumetrische Leistungsdichte*	kW/m³	14,51

^{* ...} gebildet mit Gesamtvolumen des Speichers

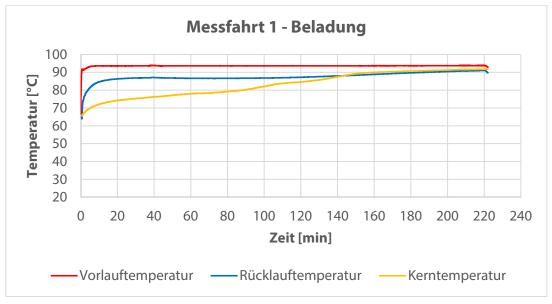


Abbildung 2: Vor- und Rücklauftemperatur sowie Kerntemperatur während des Beladens (Messfahrt 1)





→ Entladen des Speichers (23.06.2017)

Beginn/Ende der Messfahrt (ausgewerteter Zeitraum)	23.06.17, 12:58 Uhr bis 18:07 Uhr	
Messdauer	min	309
Alexandriante Minuse and an area (laureauliante)	MJ	78,43
Abgeführte Wärmemenge (kumuliert)	kWh	21,79
AA:ttl a.c., \A/ii .c. a.t. ii .c. a.t. ii .c. a.t.	kg/s	0,24
Mittlerer Wärmeträgerstrom	l/min	14,60
Values atticales Consistential	kWh/m³	50,43
Volumetrische Speicherdichte*	kJ/l	181,56
Mittlere thermische Leistung im Auswertezeitraum	kW	4,23
Mittlere volumetrische Leistungsdichte*	kW/m³	9,78

^{* ...} gebildet mit Gesamtvolumen des Speichers

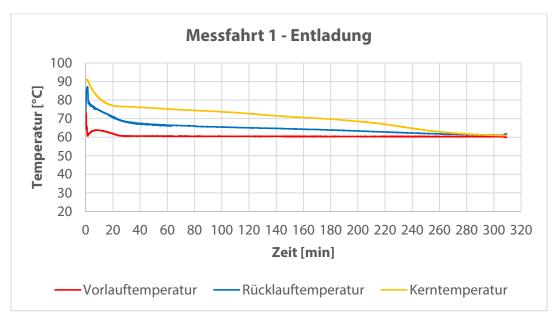


Abbildung 3: Vor- und Rücklauftemperatur sowie Kerntemperatur während des Entladens (Messfahrt 1)

→ Fazit

Das Beladen des Speichers erfolgte mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 95 °C, das Entladen mit nahezu konstant 60 °C als Vorlauftemperatur. Damit betrug die Temperaturdifferenz zur Schmelztemperatur jeweils 17 \dots 18 K.

Die volumetrische Speicherdichte beträgt rund 50 kWh/m³ gebildet mit den Außenabmessungen. Die Leistung ist beim Beladen trotz gleicher Temperaturdifferenzen mit rund 6,3 kW höher als beim Entladen mit rund 4,2 kW, dies kann durch Konvektionsströmungen im aufschmelzenden PCM verursacht werden.





Messfahrt 2

→ Beladen des Speichers (28.06.2017)

Beginn/Ende der Messfahrt (ausgewerteter Zeitraum)	28.06.17, 11:17 Uhr bis 18:18 Uhr	
Messdauer	min	422
Zugeführte Wärmemenge (kumuliert)	MJ	117,44
	kWh	32,62
Add and Add an	kg/s	0,28
Mittlerer Wärmeträgerstrom	l/min	17,65
Volumetrische Speicherdichte*	kWh/m³	75,51
	kJ/l	271,85
Mittlere thermische Leistung im Auswertezeitraum	kW	4,64
Mittlere volumetrische Leistungsdichte*	kW/m³	10,74
Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz** für die Wärmeübertragung im Speicher	K	14,30

^{* ...} gebildet mit Gesamtvolumen des Speichers

^{** ...} während des Schmelz-/Erstarrungsvorganges bei konstanter PCM-Temperatur (berechnet aus der Vor- und Rücklauf- sowie der gemessenen PCM-Temperatur)

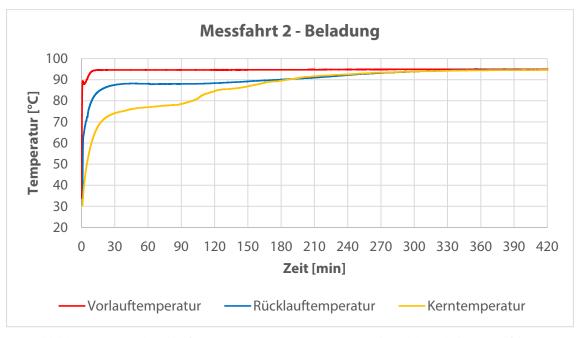


Abbildung 4: Vor- und Rücklauftemperatur sowie Kerntemperatur während des Beladens (Messfahrt 2)





→ Entladen des Speichers (29.06.2017)

Beginn/Ende der Messfahrt (ausgewerteter Zeitraum)	29.06.17, 8:28 Uhr bis 11:33 Uhr	
Messdauer	min	185
Alexandria Millione and an all and and	MJ	92,71
Abgeführte Wärmemenge (kumuliert)	kWh	25,75
NA:tallanan NA/2 maa atuu aanaa	kg/s	0,26
Mittlerer Wärmeträgerstrom	l/min	15,76
Malana at the dear Constall and the task	kWh/m³	59,61
Volumetrische Speicherdichte*	kJ/l	214,6
Mittlere thermische Leistung im Auswertezeitraum	kW	8,37
Mittlere volumetrische Leistungsdichte*	kW/m³	19,38
Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz** für die Wärmeübertragung im Speicher	К	11,55

^{* ...} gebildet mit Gesamtvolumen des Speichers

^{** ...} während des Schmelz-/Erstarrungsvorganges bei konstanter PCM-Temperatur (berechnet aus der Vor- und Rücklauf- sowie der gemessenen PCM-Temperatur)

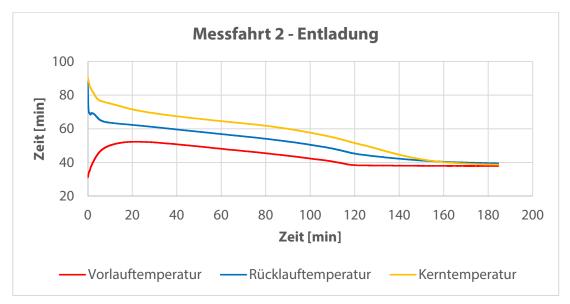


Abbildung 5: Vor- und Rücklauftemperatur sowie Kerntemperatur während des Entladens (Messfahrt 2)

→ Fazit

Das Beladen des Speichers erfolgte mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 95 °C, das Entladen mit 40 °C, wobei es aufgrund der Charakteristik der Versuchsanlage zu einem signifikanten Überschwingen und erst nach 2 Stunden zur Erreichung der gewünschten Vorlauftemperatur kommt.

Die volumetrische Speicherdichte beträgt beim Beladen rund 75 kWh/m³, da im Unterschied zu Messfahrt 1 bei Raumtemperatur begonnen wurde. Die Leistungen unterschieden sich zwischen Be- und Entladung deutlich aufgrund der unterschiedlichen treibenden Temperaturdifferenzen.





Messfahrt 3

→ Beladen des Speichers (24.10.2017)

Beginn/Ende der Messfahrt (ausgewerteter Zeitraum)	24.10.17, 6:59 Uhr bis 12:20 Uhr	
Messdauer	min	321
7. a of ibut a Minus and an are (leans all out)	MJ	116,73
Zugeführte Wärmemenge (kumuliert)	kWh	32,42
Maintain and Maintain and a state of the sta	kg/s	0,34
Mittlerer Wärmeträgerstrom 	l/min	21,00
Mahamatata da a Constala and alata W	kWh/m³	75,06
Volumetrische Speicherdichte*	kJ/l	270,20
Mittlere thermische Leistung im Auswertezeitraum	kW	6,07
Mittlere volumetrische Leistungsdichte*	kW/m³	14,05
Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz** für die Wärmeübertragung im Speicher	K	8,29

^{* ...} gebildet mit Gesamtvolumen des Speichers

^{** ...} während des Schmelz-/Erstarrungsvorganges bei konstanter PCM-Temperatur (berechnet aus der Vor- und Rücklauf- sowie der gemessenen PCM-Temperatur)

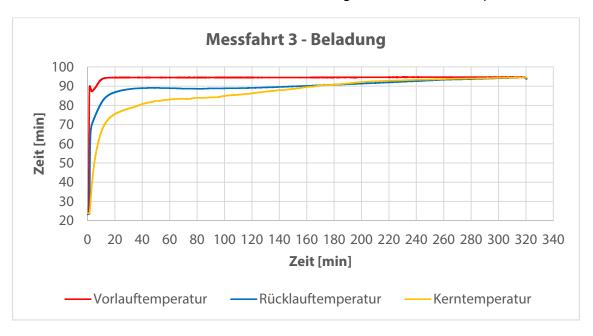


Abbildung 6: Vor- und Rücklauftemperatur sowie Kerntemperatur während des Beladens (Messfahrt 3)





→ Entladen des Speichers (25.10.2017)

Beginn/Ende der Messfahrt (ausgewerteter Zeitraum)	25.10.17, 11:10 Uhr bis 14:53 Uhr	
Messdauer	min	223
Alexandria Alifornia a a a a a a a a a a a a a a a a a a	MJ	90,96
Abgeführte Wärmemenge (kumuliert)	kWh	25,27
Adiational VACCIONAL AND	kg/s	0,34
Mittlerer Wärmeträgerstrom	l/min	20,43
Walnus and a language of the could have	kWh/m³	58,49
Volumetrische Speicherdichte*	kJ/l	210,55
Mittlere thermische Leistung im Auswertezeitraum	kW	6,82
Mittlere volumetrische Leistungsdichte*	kW/m³	15,78
Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz** für die Wärmeübertragung im Speicher	K	9,34

^{* ...} gebildet mit Gesamtvolumen des Speichers

^{** ...} während des Schmelz-/Erstarrungsvorganges bei konstanter PCM-Temperatur (berechnet aus der Vor- und Rücklauf- sowie der gemessenen PCM-Temperatur)

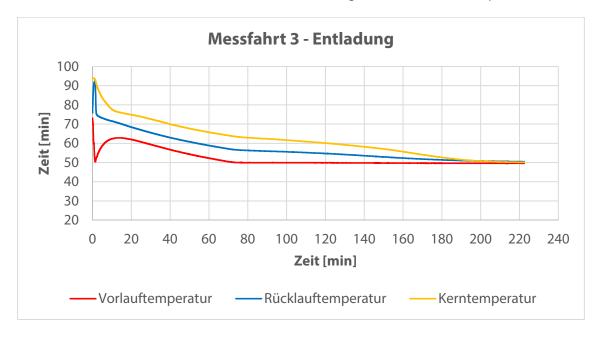


Abbildung 7: Vor- und Rücklauftemperatur sowie Kerntemperatur während des Entladens (Messfahrt 3)

→ Fazit

Das Beladen des Speichers erfolgte mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 95 °C, das Entladen mit 50 °C als Vorlauftemperatur (mit Überschwingen). Die Speicherleistungen passen sich entsprechend der Temperaturdifferenzen an.





Oberflächentemperatur (Speicheraußenwand)

Die Oberflächentemperatur während des Be- und Entladens ist am Beispiel von Messfahrt 2 dargestellt. An der Außenwand des Speichers sind zwei Thermoelemente positioniert (Seitenwand und Deckel), welche die unmittelbare Temperatur der Oberflächen messen. Als Vergleichsmessstelle wurde zusätzlich ein Umgebungstemperatursensor installiert.

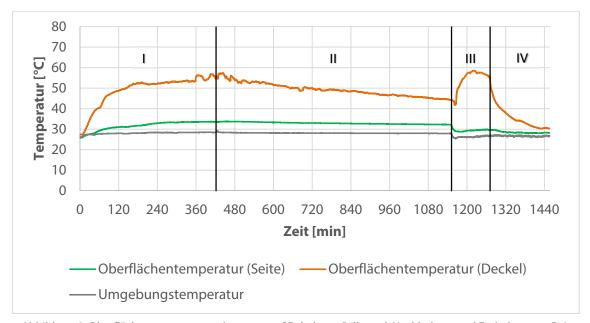


Abbildung 8: Oberflächentemperaturen bezogen auf Beladung, Stillstand, Nachladung und Entladung am Beispiel von Messfahrt 2

- Bereich I Beladung mit Vorlauftemperatur 95°C
- Bereich II Stillstand
- Bereich III Nachladung mit Vorlauftemperatur 95 °C
- Bereich IV Entladung mit Vorlauftemperatur von 38 °C (30 °C)

Auffällig ist der Temperaturverlauf an der oberen Abdeckung. Mit einer Maximaltemperatur von fast 60 °C ist diese eindeutig zu hoch. Dies ist auf den konstruktiven Aufbau des Speichers zurückzuführen, der bereits mit dem Auftraggeber besprochen wurde.





Druckverlustmessung

Der angegebene Differenzdruck (Druckverlust) bezieht sich auf die Durchströmung des Wärmespeichers mit Wasser bei T \approx 24 °C. Der Messfehler liegt bei maximal \pm 0,2 % vom Messbereichsendwert (370 mbar). Somit beläuft sich dieser Wert auf \pm 0,74 mbar und ist als vertikaler Fehlerindikator dargestellt.

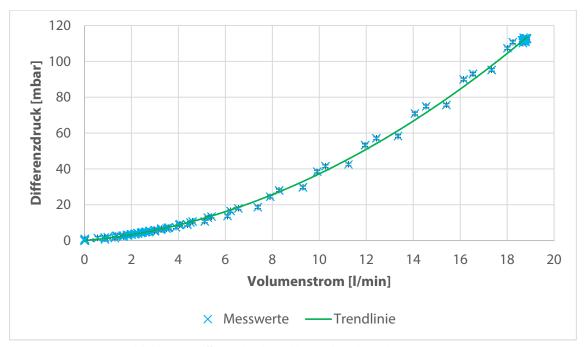


Abbildung 9: Differenzdruck in Abhängigkeit des Volumenstromes

Durch den geringen Messfehler des verwendeten Differenzdrucksensors, ist der absolute Fehler sehr gering, was an den Fehlerindikatoren innerhalb der Abbildung zu erkennen ist. Für den Differenzdruck bzw. Druckverlust kann die nachfolgende quadratische Ausgleichsfunktion innerhalb des gemessenen Volumenstrombereiches angewendet werden:

$$\frac{\Delta p}{\text{mbar}} = 0.2595 \left(\frac{\dot{V}}{\text{l/min}}\right)^2 + 1.131 \frac{\dot{V}}{\text{l/min}}$$





<u>Anmerkungen</u>

Die Halterung der äußeren Hülle erfolgt durch Stützstreben am oberen Deckel. An diesen Streben findet ein Wärmeübergang vom Speicherbehälter zur äußeren Hülle statt, welche zu den hohen Oberflächentemperaturen am Deckel (vgl. Abbildung 8) führen. Diese Konstruktion sollte verändert werden, um die Wärmeverluste an die Umgebung zu minimieren.

Die Beladung des Speichers erfolgt mit nahezu konstant eingestellter Temperatur. Lediglich am Anfang jeder Beladung wird durch die thermische Masse und die Trägheit des Gesamtsystems die Vorlauftemperatur erst nach wenigen Minuten erreicht. Bei der Entladung ist, je nach Vorlauftemperatur, eine sehr lange Zeit notwendig bis diese konstant ist. Dies ist auf die zu geringe Kühlleistung des Temperiergerätes zurückzuführen. Dieser Umstand hat lediglich Auswirkungen auf die Zeitdauer des Entladens. Die energetische Bilanzierung, und somit die dokumentierten Speicherkenndaten, werden durch diesen Umstand nicht beeinflusst.

Die Messung der Kerntemperatur im Phasenwechselmaterial erfolgt punktuell immer an der gleichen Stelle und spiegelt nicht die Temperatur des gesamten Speichermaterials im Behälter wieder. Die Positionierung ist ausschlaggebend für die Visualisierung des Temperaturverlaufes während des Be- oder Entladevorganges. Während der Messungen konnte durch Mischungsvorgänge im flüssigen PCM kein eindeutiges Temperaturplateau, welches für Phasenwechselmaterialien charakteristisch ist, festgestellt werden. Die Neupositionierung der eingebauten Tauchhülse könnte diesen Fakt verbessern.

Prof. Dr.-Ing. J. Meinert

Zittau, den 24.11.2017