

FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Untersuchung: Mobiler Wärme- speicher

Analyse des thermischen
Beladevorganges eines mobilen
Speichers der Fa. pecem am MHKW
Bremen, am 17.03.2021.

Prof. Dr.-Ing. Bernd Boiting
Stand: 19.04.2021

Inhalt

1. Aufgabenstellung	3
2. Messfahrt: Beladungsvorgang	3
3. Auswertung der Messwerte	4
4. Analyse/Validierung der Messwerte	6
5. Zusammenfassung	8

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Untersuchung soll der Beladevorgang eines mobilen Wärmespeichersystems vom Typ: MHS – HC 58 – 2.0, der Fa. pecem ausgewertet und in Hinblick auf die dabei aufgenommene thermische Energie beurteilt werden.

Das mobile Wärmespeichersystem ist in der Lage, Wärme sowohl sensible als auch latent aufzunehmen. Der Phasenübergangsbereich des eingesetzten Phasenwechselmaterials (PCM, engl. phase change material) vom Typ ATS 58, liegt nach dem Gütezeichen RAL-GZ 896, zwischen 54°C und 58°C.

Die sich aus der Messung ergebende Gesamtenergie soll einer Plausibilitätsprüfung auf der Grundlage der hier eingesetzten Massen und Materialien im Speichersystem unterzogen werden.

2. Messfahrt: Beladungsvorgang

Abbildung 1 zeigt den Speicher MHS – HC 58 – 2.0 während seiner thermischen Beladung am Müllheizkraftwerk Bremen (MHKW). Der Beladungsvorgang wurde am 17.03.2021 gegen 12:55 Uhr gestartet und am 17.03.2021 gegen 18:40 Uhr beendet.



Abbildung 2: Mobiler Speicher während der thermischen Beladung am MHKW, Bremen.



Abbildung 1: Wärmeübergabestation MHKW, Bremen

Der Speicher selbst wird über eine jeweils am Be- und Entladeort extern vorhandene Wärmeübergabestation be-, bzw. entladen. Abbildung 1 zeigt den direkten Anschluss des Speichersystems an die Wärmeübergabestation (Abbildung 2). Die Wärme wird dabei auf einem Temperaturniveau von ca. 95°C aus der Müllverbren-

nungsanlage entkoppelt und über einen Plattenwärmetauscher in einen Sekundärkreislauf übertragen. Eine im Sekundärkreislauf befindliche Umwälzpumpe durchströmt die im mobilen Wärmespeicher befindlichen Speicherblöcke (Cubes). Dabei wird die gesamte aus dem MHKW übertragene Wärme über einen Wärmemengen-zähler erfasst. Eine parallel installierte Messwerterfassungsanlage protokolliert da-

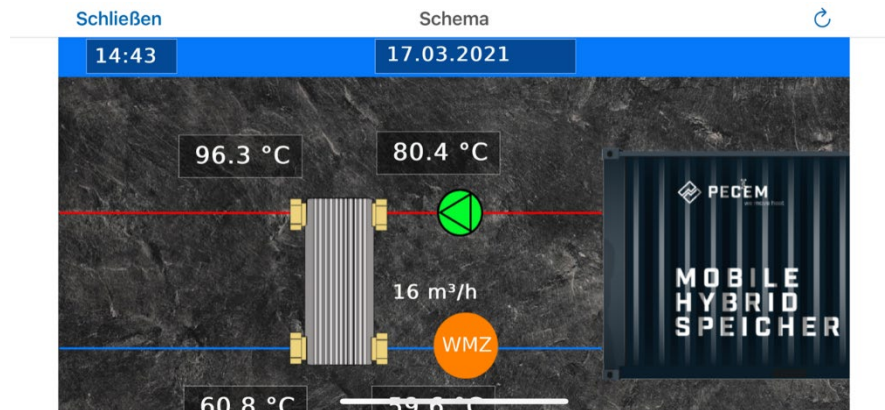


Abbildung 3: Ausschnitt Messwerterfassungssystem mit Plattenwärmetauscher, Umwälzpumpe und Wärmemengen-zähler.

bei weitere Temperaturen und speichert diese ab. Die Messwerterfassungsanlage ist online über das Internet zu erreichen und abfragbar. Alle Messwerte können als Excel-Tabelle exportiert werden.

Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt aus der online erreichbaren Messwerterfassungsanlage. Links im Bild ist der Primärkreislauf des MHKW, rechts im Bild der Sekundärkreislauf des Speichersystems zu erkennen. Der Wärmemengen-zähler wird kontinuierlich (Vorlauf- und Rücklauftemperaturen sowie Wassermassenstrom) ausgelesen und die Messwerte gespeichert.

Diesem Untersuchungsbericht liegt das Messprotokoll vom 17.03.2021 zugrunde.

3. Auswertung der Messwerte

Die zur Analyse und Auswertung übergebenen Messwerte sind in Auszügen in Abbildung 4 zu erkennen. In den Messwerten befinden sich weitere Messpunkte, an denen weitere, hier nicht betrachtete, speicherinterne Temperaturen erfasst wurden.

Die Wassermassenströme ändern sich im Sekundärkreislauf während der durchgeführten Messfahrt. Daher wurde sowohl der thermische Leistungsverlauf als auch

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	Datum	Uhrzeit	1/Ana1 - 1: T.1	2/Ana2 - 2: T.1	3/Ana3 - 3: T.1	4/Ana4 - 4: T.1	5/Dig1 - 1: La 2	6/Ana1 - 1: V 2	7/Ana2 - 2: Li 2	8/Ana3 - 4: Sl 2	9/Ana4 - 7: D 2	10/Ana5 - 8: D 2	11/Ana8 - 11: 2	12/Ana9 - 12: 2	13/Ana10 - 13: 2	14/Ana11 - 1: Wärmemengen-zähler	Kilowatts		
2	17.03.2021	12:53:00	20,5	20,6	20,2	20,3	0	5083	0	5500	0	0	21	21	0,2	0			
3	17.03.2021	12:53:10	20,6	20,7	20,2	20,3	0	5083	0	5500	0	0	21	21	0,2	0			
4	17.03.2021	12:53:20	20,6	20,7	20,2	20,3	0	5083	0	5500	0	0	21	21	0,2	0			
5	17.03.2021	12:53:30	20,6	20,7	20,2	20,3	0	5083	0	5500	0	0	21	21	0,2	0			
6	17.03.2021	12:53:40	20,6	20,6	20,2	20,3	1	5083	0	5500	0	0	21	21	0,2	0			

Abbildung 4: Auszüge aus den am 17.03.2021 aufgenommen Messwerten

Messfahrt des mobilen Wärmespeichers MHS – HC 58 – 2.0, am 17.03.2021

die kumulierte Leistung, bzw. aufgenommene thermische Energie nochmals nachträglich diskret aus den Messwerten berechnet und mit den Ergebnissen des Wärmemengenzählers abgeglichen.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	
Datum	Uhrzeit	Rel.Disk.	T.V. Primär	T.R. Primär	T.R. Sekundär	T.V. Sekundär	Ladepumpe	Volumen Gesamt	Leistung Aktuell	Skalierfunktion	Ergebnis	Durchfluss Aktuell	Durchfluss Akt.T.Vorlauf	T.Rücklauf	Temperatur (Wärmemengenzähler)	Kilowatt	Energie	Energie in kWh	Energie in kWh	Energie in kWh	Energie in kWh	Energie in kWh	Energie in kWh	Energie in kWh	Energie in kWh
17.03.2021	12:53:00	0,00	20,5	20,6	20,2	20,3	0	5083	0		5500	0	0	21	21	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
17.03.2021	12:53:10	20,00	20,6	20,7	20,2	20,3	0	5083	0		5500	0	0	21	21	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
17.03.2021	12:53:20	20,00	20,6	20,7	20,2	20,3	0	5083	0		5500	0	0	21	21	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
17.03.2021	12:53:30	20,00	20,6	20,7	20,2	20,3	0	5083	0		5500	0	0	21	21	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
17.03.2021	12:53:40	40,00	20,6	20,6	20,2	20,3	1	5083	0		5500	0	0	21	21	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
17.03.2021	12:53:50	50,00	20,6	20,7	20,1	20,6	1	5083	0		5500	0	0	21	21	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
17.03.2021	12:54:00	60,00	20,6	20,5	17,3	20,9	1	5083	0		5500	0	0	21	21	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
17.03.2021	12:54:10	70,00	21,4	17,8	16,0	19,1	1	5083	0		5500	0	0	21	21	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
17.03.2021	12:54:20	80,00	25,5	17,1	16,6	19,1	1	5083	0		5500	0	0	21	21	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
17.03.2021	12:54:30	90,00	38,9	16,7	16,4	21,4	1	5083	0		5500	0	0	21	21	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	
17.03.2021	12:54:40	100,00	50,9	17,1	16,0	28,4	1	5083	0		5500	5600	5	20	16	4	0,1	0,14489383	0,77246914	20,7088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	
17.03.2021	12:54:50	110,00	58,1	17,5	16,3	36	1	5083	26,1		5500	5600	5	20	16	4	0,2	0,21670714	0,77246914	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	
17.03.2021	12:55:00	120,00	63,1	18,6	16,3	42	1	5083	26,1		5500	5600	5	20	16	4	0,3	0,31129157	0,77246914	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	
17.03.2021	12:55:10	130,00	66,5	20,1	16,2	47,8	1	5083	26,1		5500	5600	5	20	16	4	0,4	0,41149148	0,77246914	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	
17.03.2021	12:55:20	140,00	68,5	20,5	16,1	50,9	1	5083	26,1		5500	5600	5	20	16	4	0,5	0,511595062	0,77246914	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	
17.03.2021	12:55:30	150,00	70	21,4	16	53,2	1	5083	26,1		5500	5600	5	20	16	4	1,0	1,011595062	0,77246914	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	
17.03.2021	12:55:40	160,00	71,8	22,0	16	56,8	1	5083	259,6		5500	5600	5	15	15	40	1,5	1,511595062	0,77246914	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	
17.03.2021	12:55:50	170,00	72,2	22,4	15,9	59	1	5083	259,6		5500	5600	5	15	15	40	2,0	2,011595062	0,77246914	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	
17.03.2021	12:56:00	180,00	73,4	21,3	15,9	57,8	1	5083	259,6		5500	5600	5	15	15	40	2,5	2,511595062	0,77246914	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	
17.03.2021	12:56:10	190,00	74,3	22,1	15,9	57,8	1	5083	259,6		5500	5600	5	15	15	40	3,0	3,011595062	0,77246914	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	
17.03.2021	12:56:20	200,00	74,2	21,1	15,6	56,0	1	5083	259,6		5500	5600	5	15	15	40	3,5	3,511595062	0,77246914	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	26,0088889	

Abbildung 5: Manuelle Prüfung/Validierung der Messfahrt in Hinblick auf zeitliche Leistungsaufnahme und kumulierte Wärme

Anschließend wird eine neue virtuelle Zeit eingeführt, um die Messungen ab einem Zeitpunkt t=0s darstellen zu können.

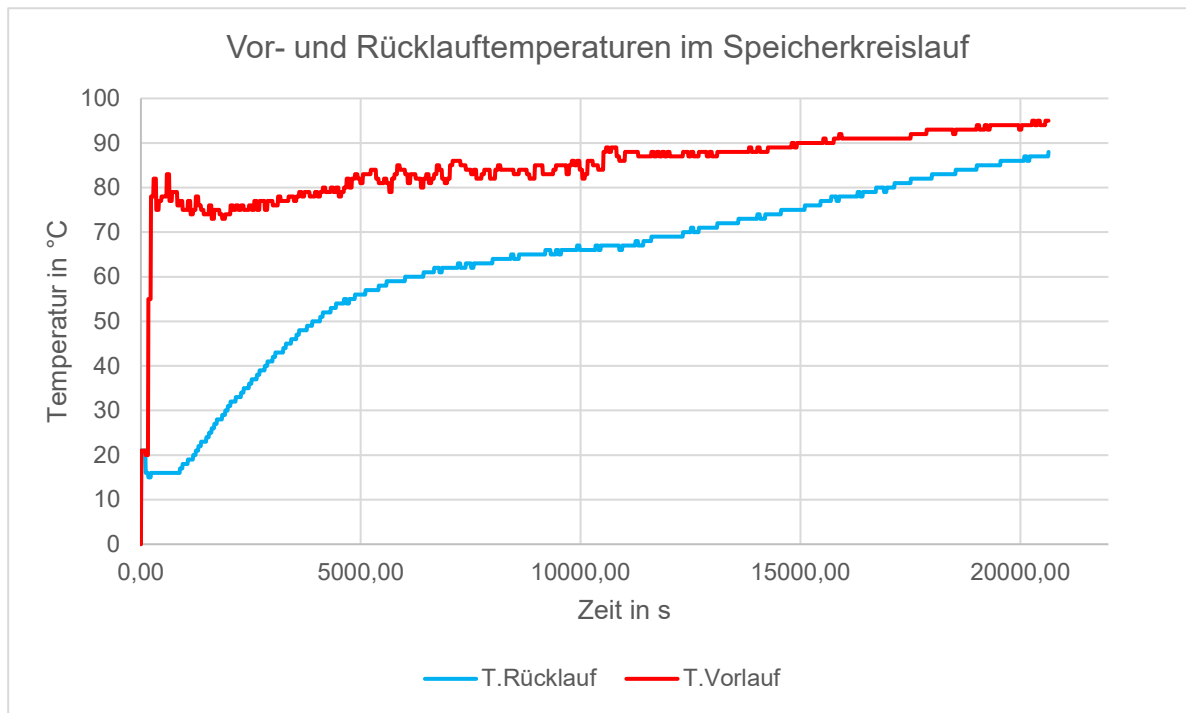


Abbildung 6: zeitlicher Verlauf von Vor- und Rücklauftemperaturen im Speichersystem

Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Vor- und Rücklauftemperatur im Speichersystem. Bis zum Zeitpunkt t= 5000s (ca. 1,4 h) ist eine steile Zunahme der Rücklauftemperatur zu erkennen. Mit Erreichen von ca. 58°C im Speicher, ist der Übergang in den Bereich der latenten Wärmeaufnahme zu erkennen. Ab dem Zeitpunkt t=11000s (ca. 3h) ist ein erneuter Steigungswechsel zu erkennen, mit dem die oberhalb des Phasenübergangsbereichs erneute sensible Wärmeaufnahme beginnt. Die dabei deutlich kleinere Temperaturdifferenz zwischen Speichertemperatur und Vorlauftemperatur lässt die Steigung deutlich flacher ausfallen.

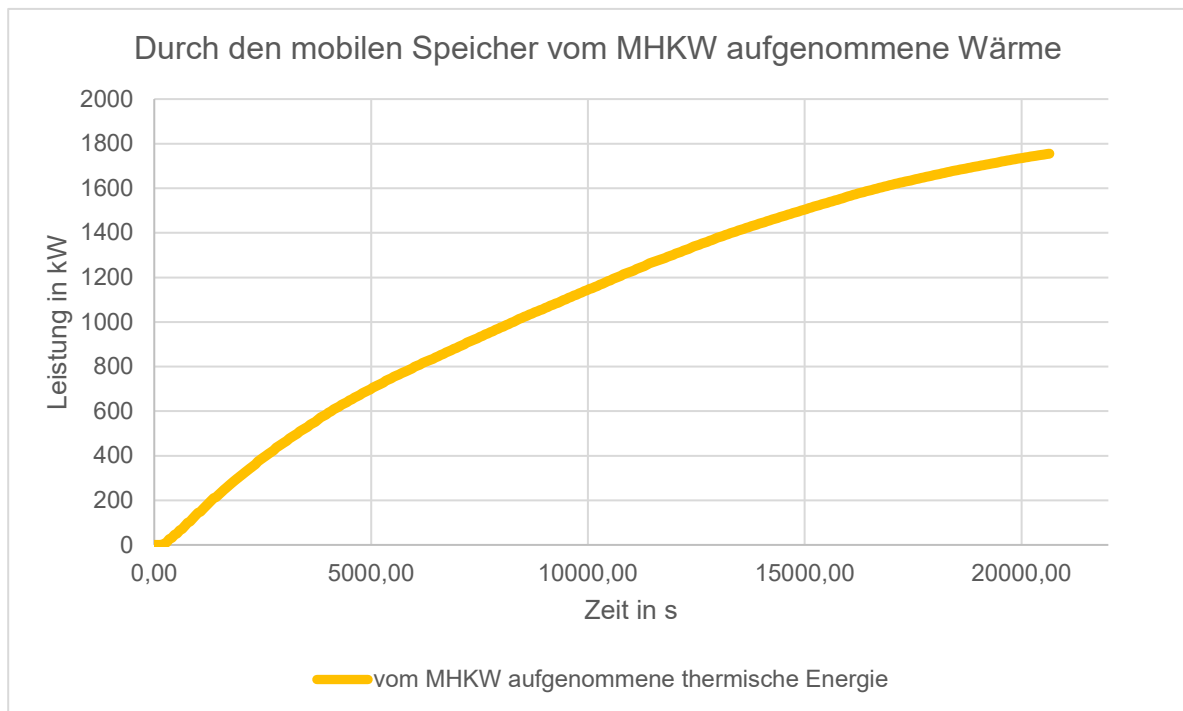


Abbildung 7: zeitlicher Verlauf der aufgenommenen thermischen Energie an am MHKW, durch den mobilen Speicher

Abbildung 7 zeigt den kumulierten Verlauf der aufgenommenen thermischen Energien aus dem Müllheizkraftwerk Bremen. Der dabei stark abflachende Verlauf ab ca. $t = 20000\text{s}$ (ca. 5.5h) zeigt das sinnvolle Beenden des Beladungsvorganges an. Aufgrund der thermischen Verluste an die deutliche kältere Umgebung, ist von einer minimalen kontinuierliche Wärmeaufnahme auszugehen. Liegt die Speicheraustrittstemperatur deutlich über der Phasenübergangstemperatur ($dt \sim 5\text{K}$) und ist die Temperaturdifferenz zwischen Speichervor- und Rücklaufumtemperatur kleiner als ca. 5K, sollte der Beladevorgang abgebrochen werden, da der Speicher als komplett thermisch beladen zu betrachten ist.

4. Analyse/Validierung der Messwerte

Eine Überprüfung der geplanten thermischen Kapazität des mobilen Speichers kann nicht auf der Grundlage der erfassten Messwerte erfolgen, da diese nur die Ist-Kapazität des Systems, unter den hier vorliegenden Randbedingungen aufzeigen. Die theoretisch erreichbare Kapazität der konstruktiven Ausführungen ergibt sich auf der Grundlage der verwendeten Materialien und deren thermischen Speicherkapazitäten im betrachteten Temperaturbereich.

Daher wurde hier aufgrund einer thermischen Bilanzberechnung das theoretische Speichervermögen des mobilen Speichers abgeschätzt und der tatsächlich gemessenen Kapazitäten gegenübergestellt. Dabei wurden die zur Verfügung gestellten

Datenblätter der Speicherplatten HeatStaxx 2.0 ATS 58 verwendet und die mitgeteilten verwendeten Mengen an Platten und Wasserfüllmengen des Speichersystems.

Tabelle 1 zeigt eine überschlägige thermische Kapazitätsbestimmung des untersuchten mobilen Speichers. Da das verwendete PCM und das im Speicher befindliche Wasser aufgrund ihrer sensibel und latent aufgenommenen Wärme die Hauptspeicher darstellen, wurden auch nur diese betrachtet.

Tabelle 1: Überschlägige thermische Kapazitätsberechnung

HeatStaxx 2.0 ATS 58	1.536 kJ pro Platte
Speicherinhalt	2160 Platten
Latente Energie des Speichers im Phasenübergang:	3317760 kWs 921,6 kWh

HeatStaxx 2.0 ATS 58	3 kJ/kgK
Gewicht einer Platte	6,4 kg pro Platte
Speicherinhalt:	2160 Platten
Sensible Energie im Speicher (PCM) über ein $dT=(57)$ K	2363904 kJ 656,64 kWh

Wasserinhalt des Speichers	4.500 kg Gesamt 4,18 kJ/kgK
Sensible Energie im Speicher (Wasser) über ein $dT=62$ K	1166220 kJ 323,95 kWh

Überschlägige Kapazität des Gesamtspeichers: über ein $dT=62$ K	1902,19 kWh
---	--------------------

Der Speicher befindet sich zu Beginn des Beladvorganges auf einem Temperaturniveau von ca. 20°C. Am Ende des Beladevorganges erreicht der Gesamtspeicher ein Temperaturniveau von ca. 82°C. Das entspricht einer Temperaturerhöhung von 62K (Innerhalb des PCM's werden ca. 5K im Bereich des Phasenübergangs durchlaufen, der bei der Ermittlung der sensiblen Wärmeaufnahme ausgeklammert werden muss).

Der hier erfolgte Beladungsvorgang beginnt auf einer gegenüber eines möglichen geplanten Einsatzbereiches wahrscheinlich deutlich niedrigeren Startbeladungstemperatur. Insofern sind die hier gemachten Kapazitätsbetrachtungen auf andere Betriebstemperaturen umzurechnen und können nicht pauschal übertragen werden!

Die konservative Berechnung zeigt unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur und Vernachlässigung der Speicherkapazitäten der verwendeten zusätzlichen Materialien wie Stahl (Cuben und Rohrleitungen) aber auch der thermischen Verluste an die Umgebung, eine theoretische, thermische Speicherkapazität von ca. 1.9 MWh.

5. Zusammenfassung

Die diskutierten Messwerte der Messfahrt vom 17.03.2021 am Müllheizkraftwerk Bremen, zeigen das typische Verhalten eines thermisch hybriden Speichers, der sowohl sensibel als auch latent Wärme speichern kann. Dabei nimmt der Speicher vom Typ: MHS – HC 58 – 2.0 zunächst große thermische Leistungen sensibel auf, bis er den Phasenübergangsbereich erreicht, um anschließend bis zum Beladungsende weiter sensibel zu überhitzen.

Die dabei in Summe aufgenommenen sehr großen Wärmemengen, lassen sich aufgrund der verwendeten Speichermaterialien, deren Mengen und Speicherkapazitäten, im betrachteten Temperaturbereich plausibel ableiten, begründen, bzw. bestätigen.

Wird der hier betrachtete Speicher in anderen Temperaturarbeitsbereichen verwendet, ist die erreichbare theoretische Speicherkapazität des mobilen Speichers entsprechend anzupassen.

Steinfurt den 19.04.2021



Prof. Dr.-Ing. Bernd Boiting