
ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

Betriebsversuche an einem eTank Modell

Bachelorarbeit

von

Bernhard Lukas

13. Januar 2022

Studiengang Umweltingenieurwesen



Fachkorrektoren:

Hunziker Manuel, ZHAW Life Sciences und Facility Management, Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil.

Strebel Sven, ZHAW Life Sciences und Facility Management, Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil.

ZHAW LSFM IUNR

Grüental, Postfach, 8820 Wädenswil

Impressum

Keywords: eTank, Phase Changing Materials, Saisonale Energiespeicher

Zitiervorschlag: Bernhard L. (2022) Betriebsversuche an einem eTank Modell

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Departement Life Sciences und Facility Management

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen

Grüentalstrasse 14, Postfach

8820 Wädenswil

Zusammenfassung

eTanks als saisonale thermische Energiespeicher sind eine vielversprechende Technologie, um die beinahe unendliche Energie der Sonne über das ganze Jahr zu nutzen. Mit einer grossen Speicherkapazität, relativ einfacher Bauform und ohne komplizierte Bauteile, sind sie ideal für solarthermische Systeme geeignet. Die Nutzung der Sonne im Winter ist jedoch aufgrund der tiefen Aussentemperaturen und Einstrahlungswinkel mangelhaft. Die tiefen Rücklauftemperaturen der Solaranlage sind aufgrund des niedrigen Temperaturunterschiedes zum eTank nicht gut speicherbar. Abhilfe bietet in diesem Szenario die Kombination des eTanks mit Phasenübergangsmaterialien (PCM). Mithilfe dieser Materialien kann die Speicherkapazität bei niedrigen Temperaturen erhöht werden. Das PCM wird so gewählt, dass der Phasenübergang präzise bei den tiefen Wintertemperaturen stattfindet, welche die Sonne zu diesem Zeitpunkt liefern kann.

Um den Effekt zu quantifizieren, werden zwei Modell-eTanks gebaut. Das PCM wird mit einem Doppelrohrsystem in einem der zwei Modelltanks eingebracht. Im Solarlabor der ZHAW werden Testdurchläufe durchgeführt, bei denen die Tanks parallel be- und entladen werden. Sämtliche relevante Daten werden während den Tests geloggt, ausgewertet und anschliessend bei der Auswertung mit berechneten, theoretischen Werten abgeglichen.

Aufgrund von Ungenauigkeiten bei den Messungen, Frostschäden und Dichtigkeitsproblemen, konnten quantitativ nur eine reduzierte Anzahl Messungen durchgeführt werden. Diese Faktoren beeinflussen auch die Relevanz der Daten. Das Modell ist grundsätzlich funktionstüchtig, was durch den erfolgreichen Phasenübergang sichtbar wird. Dieser konnte bei der Demontage beobachtet werden.

Die Resultate zeigen bei mehreren Testläufen eine grosse Abweichung zwischen den gemessenen und den berechneten Werten. Auch in den grafischen Darstellungen der Temperaturen ist der Phasenübergang schlecht sichtbar.

Die Bauart der Modelltanks ist jedoch vielversprechend. Mit der Kalibration der Temperatursensoren, dichteren Rohrübergängen und mehr Kontrolle über die Vorlauftemperatur zu den Tanks könnten weitere Experimente mit dem System durchgeführt werden.

Abstract

eTanks as seasonal thermal energy storage systems are a very promising technology to use the almost infinite energy from the sun over the whole year. With their large storage capacity, relatively easy construction and lack of complicated parts, they are ideally suited in combination with solar thermal systems. The system still has disadvantages when it comes to the usage of solar power in Winter while temperatures are cold and angle of incidence to the panels are low. The colder return temperatures are difficult to store because of the low temperature difference to the eTank. A promising remedy for this scenario is the combination of an eTank with phase-changing-materials (PCM). These materials provide the possibility to increase the storage capacity at low temperatures. The PCM is selected according to its phase-change-temperature which can be precisely the return temperatures that are expected to be provided by the solar thermal system.

Two model-eTanks are built to quantify this effect. The PCM is built in one of the tanks using a double-pipe system. Test runs are carried out at the solar laboratory at ZHAW. During these test runs, the tanks are thermally loaded and unloaded in parallel. All relevant data are logged during the test runs and later analyzed. During the evaluation, the measured data is compared to calculated possible values.

Because of inaccuracies with the measurements, frost damage and leaks in the pipes, the quantity of the test runs was limited. These factors also affect the relevancy of the data. Based on observations during the disassembly, the PCM has successfully carried out the phase-change. This means that the model-tanks work.

The results show a big difference between the measured and the calculated values in multiple test runs. The graphical analysis of the temperatures also shows no conclusive evidence of if, and at what temperature, the phase change happened.

However, the design of the model-tanks is very promising. With calibrated temperature sensors, leak proof pipe adapters and more control over the inlet temperatures to the tanks, more experiments can be carried out with the system.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Hintergrund	7
2.1. Theorie zu PCM	7
2.2. Theorie zu eTanks	8
2.3. Erwartete Resultate	12
3. Materialien und Methodik	13
3.1. Auswahl der PCM	13
3.2. Modellspeicher	15
3.2.1. Stückliste	15
3.2.2. Bauform	16
3.2.3. Situationsplan	19
3.2.4. Einflussgrößen	21
3.2.4.1. Dämmungsverluste	21
3.2.4.2. Verlust durch Luftspalten	22
3.2.4.3. Verlust durch Wellrohre	23
3.2.4.4. Speicherkapazität Kontrolltank	24
3.2.4.5. Speicherkapazität PCM Tank mit ATP6	25
3.2.4.6. Speicherkapazität PCM Tank mit ATP12	25
3.3. Versuchsplan	26
3.3.1. Messvorgang	26
3.3.2. Auswertung der Daten	26
4. Resultate	28
4.1. ATP6	28
4.2. ATP12	30
4.2.1. Testlauf 1	30
4.2.2. Testlauf 2	31
4.2.3. Testlauf 3	33

4.2.4. Testlauf 4	34
5. Diskussion.....	36
6. Literaturverzeichnis.....	38
7. Abbildungsverzeichnis	39
8. Tabellenverzeichnis	40
9. Anhang.....	41
9.1. Poster.....	42

1. Einleitung

Im Hinblick auf den Klimawandel müssen geeignete Lösungen für nachhaltige Heizsysteme gefunden werden. Moderne Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaikanlagen (PVA) bieten eine sehr gute Grundlage, da die Wärme zu einem grossen Teil aus der Umgebung genutzt werden kann. Bei milden Temperaturen und Sonnenschein funktioniert dieses Prinzip gut. Häufig wird wesentlich mehr Strom produziert, als für das System notwendig wäre. Sobald im Winter die Aussentemperatur und die Sonneneinstrahlung sinkt, wird weniger Strom für das Heizsystem produziert. Dadurch wird die Effizienz und Eigenständigkeit des Systems reduziert. Abhilfe zu der fehlenden Wärme der Umgebung könnten thermische Solarsysteme bringen. Sie haben einen höheren energetischen Wirkungsgrad von bis zu 85% (Doormann, 2021) gegenüber PVA mit ca. 22% (Hau, 2022). Dadurch können sie einen grossen Teil der Sonnenenergie direkt thermisch nutzen, womit die Wärmepumpe weniger Strom für den Temperaturhub auf die gewünschte Temperatur braucht. Abgesehen davon ist das System aber immer noch abhängig von konstantem Sonnenschein, solange die Heizung benötigt wird.

Ideal wäre also ein System, welches Strom und Wärme aus Sonnenenergie produziert und diese für eine spätere Nutzung bei schlechtem Wetter speichern kann. Komponenten, welche diese Anforderungen erfüllen, sind bereits auf dem Markt erhältlich. In so genannten Hybridmodulen werden die Eigenschaften von PVA-Modulen mit Solarthermie-Modulen kombiniert. Somit ist Strom und Wärmeproduktion abgedeckt und es fehlt noch der Energiespeicher. Herkömmliche Energiespeicher für Gebäude sind meist in Form eines Wassertanks zu finden, welcher durch die Wärmepumpe oder ein anderes Heizsystem beheizt wird. Im Kapitel 2.2 wird darauf eingegangen, warum diese Technologie für diesen Einsatzzweck eher ungeeignet ist.

Es sind aber neue, vielversprechende Technologien auf dem Markt. Zwei davon sollen in dieser Arbeit genauer analysiert werden. Phasenübergangsmaterialien, welche ohne Temperaturwechsel thermische Energie speichern können und eTanks, welche über eine grosse Speicherkapazität verfügen. Beide Technologien werden in den nächsten Kapiteln beschrieben.

Es soll untersucht werden, ob Phase Changing Materials (PCM) in einem eTank einen signifikanten Einfluss auf dessen Speicherkapazität haben.

2. Hintergrund

2.1. Theorie zu PCM

Phase Changing Materials oder auf Deutsch Phasenübergangsmaterialien, nutzen den Effekt des Phasenübergangs von fest zu flüssig und umgekehrt zur Aufnahme oder Abgabe thermischer Energie. Ein alltägliches Beispiel für ein PCM ist Wasser. Solange der Eiswürfel im Glas noch existiert, hält er die Temperatur des Getränkes konstant auf der Temperatur des Phasenübergangs. Um 1 kg Eis aufzutauen, werden 344 kJ Energie benötigt. Dies ist zwar weniger als 1 kg Wasser von 0 °C zum Kochen zu bringen (420 kJ) aber die Temperatur bleibt konstant auf 0 °C Dieser Wert kann als thermischer Speicher angesehen werden. Der Phasenübergang bei Wasser zu Eis findet bei 0 °C statt. Da diese Temperatur aber für viele Anwendungen ungeeignet ist, wurden verschiedene Materialien entwickelt, bei denen der Phasenübergang bei geeigneteren Temperaturen stattfindet.

Energiespeichermedien können in die Kategorien in Abbildung 1 eingeteilt werden. PCM gehören zu der Kategorie «Latent heat». Bei einem latenten Speicher verändert sich, im Gegensatz zu sensiblen Speichern, die Temperatur beim Aufnehmen und Abgeben von Energie nicht. Ein Beispiel für einen sensiblen Wärmespeicher ist ein Wasser-Pufferspeicher, welcher im Temperaturbereich zwischen Schmelz- und Verdampftemperatur von Wasser eingesetzt wird.

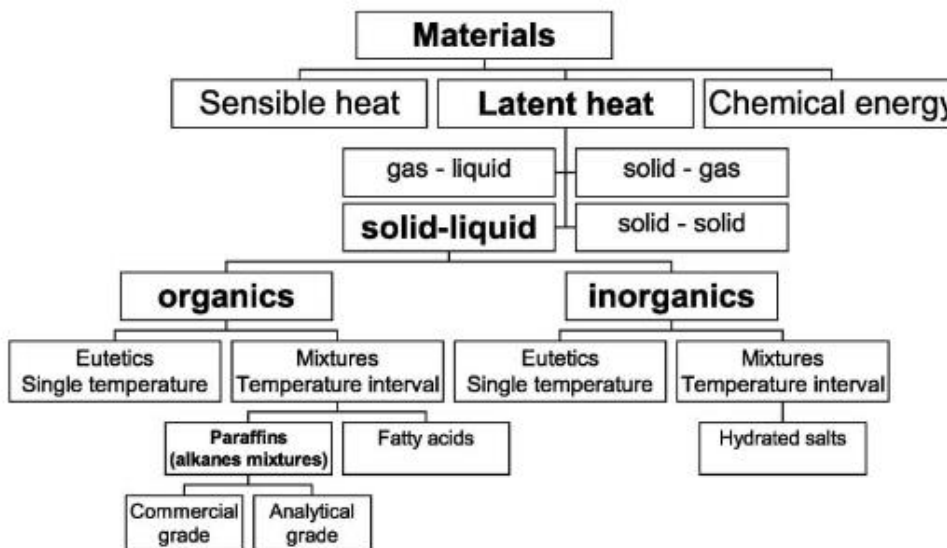


Abbildung 1: Klassifikation von Energiespeichermedien (Zalba, Marín, Cabeza, & Mehling, 2003)

Während organische PCM in Paraffine und Fettsäuren eingeteilt werden, bestehen anorganische PCM hauptsächlich aus Salzhydraten. Der Hauptvorteil von organischen PCM ist, dass sie generell nicht korrosiv und somit etwas einfacher handzuhaben sind. Anorganische PCM haben allgemein etwas höhere Phasenübergangs-Enthalpien (Mehr Energiespeicher beim Phasenübergang) und bessere Wärmeleitfähigkeit als organische PCM (Zalba et al., 2003, S. 264).

2.2. Theorie zu eTanks



Abbildung 2: Visualisierung eines eTanks unter einer Raiffeisenbank in Montreux (Gempeler & Kleptcha, 2010).

Ein eTank ist ein unterirdisches Energiespeichersystem, welches in Kombination mit einer Wärmepumpe und einer Solaranlage ein effizientes Heizsystem für Gebäude darstellt (Abbildung 2). Der Tank ist auf der Unterseite gegen das Erdreich geöffnet und auf allen anderen Seiten gedämmt. Somit ist der Speicher kein geschlossenes System, wie ein Wassertank, sondern kann Erdwärme von unten aufnehmen. Befüllt wird der eTank mit feuchtem Sand (persönliche Kommunikation, TechnoTerm AG, 30.7.2021). Die eTanks haben üblicherweise eine Fläche von ca. 100 m^2 bei einer Tiefe von 1.2 m. Die Heizleitungen sind spiralförmig in drei Schichten mit ca. 30 cm vertikalem Abstand angeordnet. Somit hat ein eTank ein Volumen von ca. 120 m^3 (Abbildung 3).



Abbildung 3: eTank im Bau. Die Heizspiralen sind am rechten unteren Bildrand sichtbar. (Gempeler & Kleptcha, 2010)

Die effektive Speicherkapazität ist aufgrund der offenen Konstruktion schwierig zu beschreiben, da konstant Wärme aus dem Erdreich in den eTank nachfließt, solange die Temperatur des Substrats kühl genug ist. Mit dem Volumen und der Wärmekapazität von Sand und den gängigen Temperaturen beim Betrieb des eTanks kann eine Schätzung zur Speicherkapazität gemacht werden (Neumann & Popp, 2018). Bei dieser Rechnung werden die Werte von trockenem Sand verwendet, die nachfließende Energie aus dem Erdreich jedoch nicht berücksichtigt. Bei diesem Ergebnis handelt es sich um ein Minimum, welches von einem eTank erreicht werden kann.

Mit folgender Formel und den Werten aus Tabelle 1 wird die Speicherkapazität berechnet. Die Formel beinhaltet auch die Umrechnung von Joule zu Kilowattstunden.

$$E = \frac{V \cdot \rho \cdot c \cdot dT}{3.6 \times 10^6}$$

Tabelle 1: Berechnung der theoretischen Speicherkapazität eines eTanks

	Wert	Einheit
Wärmekapazität Sand(c)	830	J/kg*K
Dichte Sand(ρ)	1500	kg/m ³
Volumen eTank(V)	120	m ³
Temperaturbereich eTank	6-23	°C
Temperaturunterschied(dT)	17	°K
Speicherkapazität(E)	705.5	kWh
Spezifische Kapazität	5.9	kWh/m ³

Als Vergleich kann dieselbe Rechnung für einen 800 l Wassertank gemacht werden, welche oft in Einfamilienhäusern als Pufferspeicher anzutreffen sind. Mit folgender Formel und den Werten in Tabelle 2 wird die Speicherkapazität berechnet. Die Formel beinhaltet auch die Umrechnung von Joule zu Kilowattstunden.

$$E = \frac{V \cdot \rho \cdot c \cdot dT}{3.6 \times 10^6}$$

Tabelle 2: Berechnung der Speicherkapazität eines Wasser-Pufferspeichers

	Wert	Einheit
Wärmekapazität Wasser(c)	4200	J/kg*K
Dichte Wasser(ρ)	1000	kg/m ³
Volumen Tank(V)	0.8	m ³
Temperaturbereich	20-80	°C
Temperaturunterschied(dT)	60	°K
Speicherkapazität(E)	56	kWh
Spezifische Kapazität	70	kWh/m ³

Es wird sichtbar, dass ein eTank ein signifikant grösseres Speichervolumen bei einem geringen Temperaturunterschied erreichen kann. Auch der Temperaturbereich, in dem der eTank betrieben wird, ist tiefer als beim Wassertank. Dies ist zur Gewinnung von Solarwärme ein Vorteil, da ein grosser Teil der Energie im eTank gespeichert werden kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich die Quell-Vorlauftemperatur für die Wärmepumpe in einem kleinen Bereich befindet und diese somit sehr effizient betrieben wird.

Für einen Gebäudeenergiespeicher ist üblicherweise die spezifische Speicherkapazität (Speicherkapazität pro Kubikmeter) wichtiger, da diese die physikalische Grösse des Speichers bestimmt. In dieser Disziplin steht der eTank mit mehr als zehn Mal weniger Kapazität schlechter da als der Wasserspeicher. Da sich der eTank aber ausserhalb der Gebäudehülle, in einem ansonsten ungenutzten Bereich befindet, hat die spezifische Kapazität eine kleinere Relevanz.

2.3. Erwartete Resultate

Die Kombination von einem PCM-Speicher und einem eTank bringt den Vorteil, dass verschiedene Speichersysteme in einem System vereint sind. Das PCM ist ein latentes Speichersystem und der eTank ein sensibles (Siehe 2.1). Da beim PCM eine spezifische Temperatur bestimmt werden kann, bei der die Energie gespeichert und wieder freigegeben wird, kann dies der Situation und dem System angepasst werden. Ein Beispielszenario könnte folgendermassen aussehen:

Im Frühling ist das Temperaturniveau des eTanks auf 5 °C gefallen. Die Solarpanels können mit den tiefen Aussentemperaturen nur eine Rücklauftemperatur von ca. 7 °C bereitstellen. Mit der Temperaturdifferenz (dT) von 2 °C lässt sich im sensiblen eTank nur begrenzt viel Energie speichern, weil der Temperaturunterschied zu klein ist, um eine schnelle Wärmeübertragung zu erreichen. Ist der eTank mit einem PCM mit einer Schmelztemperatur von 6 °C versehen, kann die gesamte Energie der Solarpanels ohne grössere Temperaturunterschiede im PCM gespeichert werden. In der Nacht kann die Wärmepumpe diese Energie wieder mit einer konstanten Quell-Vorlauftemperatur von 6 °C fördern.

Die Resultate dieses Versuchs sollen dieses Konzept bestätigen, indem dieser Effekt unter Laborbedingungen simuliert wird. Der Versuch soll auch Klarheit darüber bringen, in welcher Form die PCM in den eTank integriert werden. Dafür wird eine Variante ausgewählt und diese an einem praktischen Beispiel getestet.

Da auch das Substrat thermische Energie aufnimmt, wird mehr Energie im Tank gespeichert, als das PCM beim Phasenübergang aufnehmen kann. Dazu kommt, dass der Temperaturübergang zwischen dem Heizkreis und dem PCM nicht ideal ist, da die Wärmeleitfähigkeit des organischen PCM gering ist. Es wird trotzdem erwartet, dass der Unterschied der zwei Tanks der Speicherkapazität der PCM entspricht.

3. Materialien und Methodik

3.1. Auswahl der PCM

Da das PCM in einem ungetesteten System zum Einsatz kommt, ist ein nicht-korrosives Material wünschenswert. Die Wahl fällt somit auf ein organisches PCM, da diese zur Zeit des Versuchs auch im Handel einfach erhältlich sind.

Die Schmelztemperatur soll in einem Bereich sein, die einem Szenario wie im Abschnitt 2.3 beschrieben wird, entspricht. Namentlich eine Bandbreite von Rücklauftemperaturen, welche die Hybridmodule in den kalten Jahreszeiten liefern könnten. Es sind zwei Versuchsdurchläufe mit verschiedenen PCM geplant. Um das geschätzte obere und untere Ende dieses Bereichs abzudecken, wird ein Temperaturbereich von 6 °C-12 °C gewählt. Die deutsche Firma Axiotherm hat organische PCM mit diesen Schmelztemperaturen im Angebot. Die PCM, welche in Tabelle 3 und Tabelle 4 beschrieben sind, werden für diesen Versuch eingesetzt.

Tabelle 3 Technische Daten ATP6 von Axiotherm (Axiotherm, 2018a).

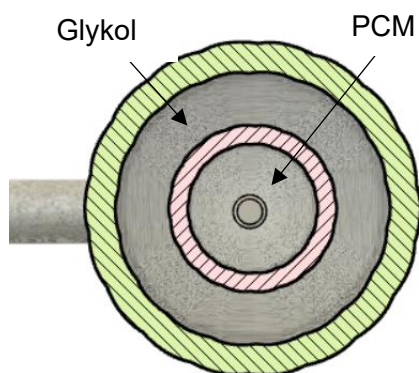
Melting temperature	°C	4 to 6
Congealing temperature	°C	4 to 6
Heat storage capacity* temperature range of -3 – 12°C	kJ/kg	275
Specific heat capacity	kJ/kg*K	2
Density (liquid)	kg/l	0,74
Heat conductivity	W/(m*K)	0,2
Volume expansion	%	<10
Max. operating temperature	°C	50
Flash point	°C	>150

Tabelle 4: Technische Daten von ATP12 von Axiotherm (Axiotherm, 2018b).

Melting temperature	°C	12 to 14
Congeeing temperature	°C	10 to 12
Heat storage capacity* temperature range of 5 – 20°C	kJ/kg	215
Specific heat capacity	kJ/kg*K	2
Density (liquid)	kg/l	0,8
Heat conductivity	W/(m*K)	0,2
Volume expansion	%	<10%
Max. operating temperature	°C	100
Flash point	°C	>180

Axiotherm verkauft PCM üblicherweise verkapselt in Kunststoffbehältern, welche einem Wassertank beigegeben werden können. Es bietet sich an, diese Behälter direkt in den Sand des eTanks zu geben. Dies wäre technisch gesehen die einfachste Lösung. Da aber Sand eine kleinere Wärmeleitfähigkeit als Wasser hat, wird die Wärmeenergie nur sehr schwer von den Heizschlangen zum PCM gelangen. Aus dem Grund wird diese Lösung vernachlässigt.

Die beste Wärmeübertragung wird erreicht, indem das PCM so nahe wie möglich an die Heizschlangen herangebracht wird. Hierfür bietet sich ein Doppelrohrsystem an, bei dem sich das PCM im innenliegenden Rohr befindet.



Da die organischen PCM eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzen, würde das PCM im äusseren Rohr die Wärmeübertragung zum Sand negativ beeinflussen. Doppelrohrsysteme in der Grössenordnung, welche in einem eTank verwendet werden sind aber kommerziell nur schwer verfügbar. Trotzdem bietet sich der Einsatz einer solchen Bauform mit speziell angefertigten Rohren an. Das Rohrsystem (Abbildung 4) wird im Kapitel 3.2.2 genauer beschrieben.

Abbildung 4: Querschnitt des Rohrsystems

3.2. Modellspeicher

Es werden zwei Modellspeicher gebaut. Im Test-Modellspeicher wird das PCM im Doppelrohrsystem miteingefügt, bleibt jedoch im baugleichen Kontrollspeicher das innere Rohrsegment leer (Luft). Es gibt zwei Möglichkeiten einen eTank in kleiner Bauform nachzubauen. Eine Möglichkeit wäre, die Masse zu skalieren, um einen kompletten eTank in kleinerer Form zu bauen. Dies ist aber aufgrund der Grösse der originalen Tanks unpraktisch, da auch das skalierte Modell noch sehr gross wäre. Eine kleinere Skalierung ist nicht möglich, da sämtliche Leitungen zu klein wären.

Die Alternative ist der Nachbau eines Segments des eTanks in Originalgrösse. So können die Leitungen, Leitungsabstände und Dämmungsdurchmesser des Originals eingehalten werden. Diese Variante wird für den Versuch verwendet.

3.2.1. Stückliste

Die verwendeten Bestandteile (Tabelle 5) sind vorwiegend aus dem Sanitärbereich. PE-Rohr wird üblicherweise auch für Bodenheizungssysteme verwendet und hat eine gute Wärmeleitfähigkeit. Die Winkel und Rohrnippel sind aus vernickeltem Stahl und dadurch korrosionsbeständig. Die Wärmeleitfähigkeit von Stahl ist besser als die von PE, aber die ganze Anlage aus Stahl zu fertigen, ist finanziell und gewichtsmässig unvorteilhaft. Für die Verbindungsstücke ist das Gewicht nicht relevant. Die Isolationsdicke wurde so gewählt, dass sie einen statisch genug stabilen Tank bilden können und genug Wärmedämmungspotenzial haben. Die Kunststoffverschraubungen sind die einzigen Produkte, welche es erlauben ein 3/4" Gewindenippel mit einem 32mm Rohr ohne Gewinde zu verbinden.

Tabelle 5: Stückliste

Menge	Art.#	Beschreibung	Lieferant
4	5086971	Verschraubung Aussengewinde	hornbach.ch
24	5086981	Verschraubung Innengewinde	hornbach.ch
3	8656153	Isolation 100mm	hornbach.ch
4	16033199	PE-Rohr 16x1.8mmx5m	maagtechnic.ch
4	16034060	PE-Rohr 32x2.9mmx5m	maagtechnic.ch
1		ATP 6 (5Liter)	axtiotherm.de
1		ATP 12 (5Liter)	axtiotherm.de
20	96590.3	3/4" 90° Winkel	meiertobler.ch
10	80530.312	3/4" 120mm Rohrnippel	meiertobler.ch
4	80530.32	3/4" 200mm Rohrnippel	meiertobler.ch

3.2.2. Bauform

Die Dämmplatten von Swisspor bilden die Struktur des Tanks. Die Aussenmasse sind 2.075 m x 0.5 m x 0.66 m (LxBxH). Dies ergibt Innenmasse von 1.875 m x 0.3 m x 0.46 m und ein Tankvolumen von ca. 259 l.



Abbildung 5: Seitenansicht des Tanks ohne Sand und Seiten- und Deckendämmung.

Die Rohre werden in einer 2x3 Struktur angeordnet und haben eine Länge von 1.5 m. Der Abstand zwischen den Rohren ist in alle Richtungen 17 cm (Abbildung 5).

Die 16 mm Rohre sind in den 32 mm Rohren mittels Distanzstücken platziert. An einem Ende des 32 mm Rohres befindet sich ein Anschlag, der das Verrutschen des 16 mm Rohres durch die Strömung verhindert. (Abbildung 6) Sämtliche Distanzstücke, Endanschlüsse und 16 mm Stopfen wurden mit CAD konstruiert und aus Polyethylenterephthalat (PETG) 3D-gedruckt. Kommerziell sind solche Teile nicht verfügbar. Die Verbindung zwischen den einzelnen 1.5 m Rohren wird mit 32 mm zu $\frac{3}{4}$ Zoll Adaptern, 90° Winkeln und geraden $\frac{3}{4}$ Zoll Rohren bewerkstelligt (Abbildung 7)



Abbildung 6: 16 mm Rohr mit Endkappe und Distanzstück (Links) und 32 mm Rohr mit Anschlag (Rechts).



Abbildung 7: Verbindungsstück mit Adaptern

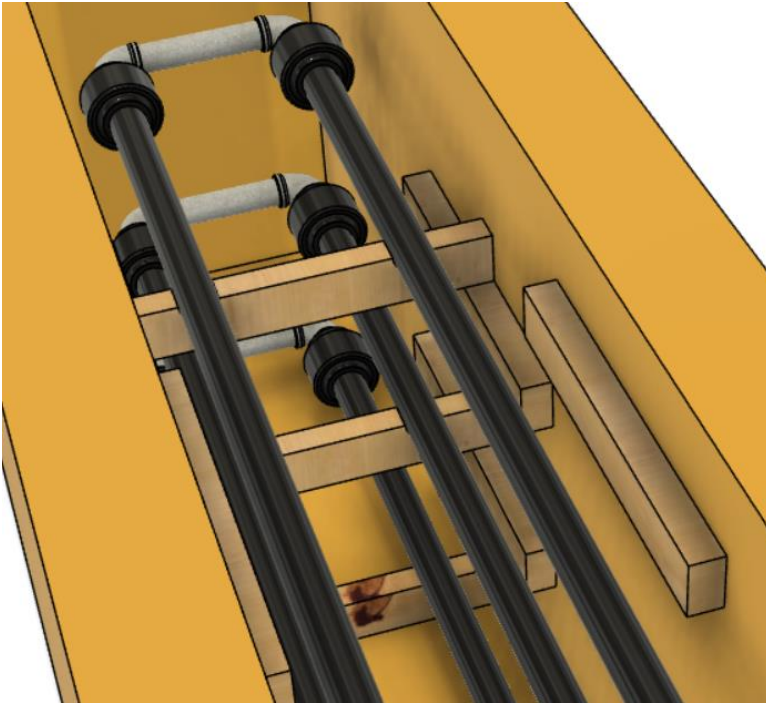


Abbildung 8: Holzkonstruktion als Support für die Rohre

Um die Rohrkonstruktion stabil zu halten, sind Querlatten aus Holz angebracht. Da der Tank beim PCM-Wechsel geöffnet werden muss, ist der Deckel nicht fest verleimt. Er liegt auf den Holzlatten (Abbildung 8) auf, welche an allen Seiten zu diesem Zweck montiert sind. Der geschlossene Tank ist in Abschnitt 3.2.3 sichtbar.

Das Tankvolumen ohne Rohre und Holz ist 259 l. Abzüglich der Rohre (2.97 l) und Holzkonstruktion (5.64 l) ergibt dies ein Füllvolumen für den Sand von 250.4 l.

Um die Feuchtigkeit des Sandes zu messen, wurde die Methode des gravimetrischen Wassergehalts angewendet. Bei dieser Methode wird ein bestimmtes Volumen Sand als Probe entnommen und gewogen (Feuchte Masse [mf]). Nach dem Wägen wird die Probe über 24 Stunden bei 105 °C getrocknet und danach ein zweites Mal gewogen (Trockene Masse [mt]). Der Unterschied zwischen den zwei Massen ergibt die Masse des Wassers in der Probe. Mit folgender Formel kann der gravimetrische Wassergehalt [Wg] der Probe berechnet werden:

$$W_g = \frac{m_f - m_t}{m_t}$$

Der verwendete Sand hat ein gravimetrischer Wassergehalt von 5-15%. Während der Versuche wurde der gravimetrische Wassergehalt beider Tanks drei Mal gemessen. Der Durchschnitt aller Messungen beträgt 10.1% (Abbildung 9).

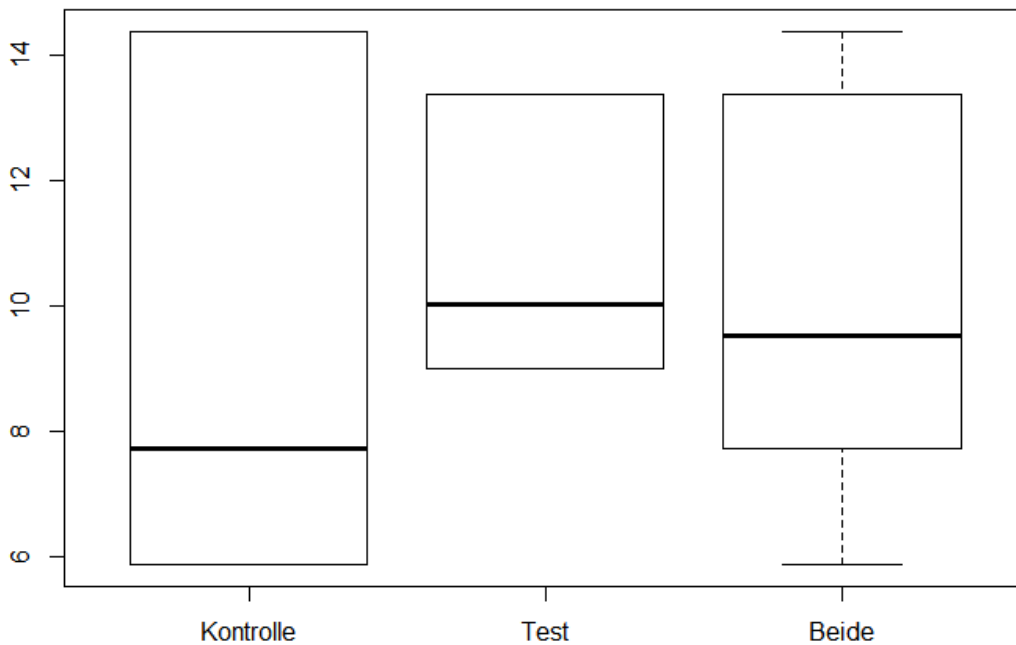


Abbildung 9: Grafische Repräsentation der gravimetrischen Feuchtigkeitsmessungen

3.2.3. Situationsplan

Die Tanks werden auf der Solarplattform des Solarlabors der ZHAW Wädenswil aufgestellt (Abbildung 10 und Abbildung 11). Das Solarlabor wird üblicherweise zur Messung von Temperaturen an Solarkollektoren und dessen Simulation verschiedener Vorlauftemperaturen verwendet. Für dieses Experiment wird das Solarlabor umfunktioniert. Es werden anstelle der Kollektoren die Tanks an die Leitungen angeschlossen. Da die Längen der bestehenden Leitungen beschränkt sind, ist auch der Platz für die Tanks auf der Plattform limitiert. Der Testtank befindet sich ca. 30 cm vom geheizten Container entfernt und ist somit in der Strömungszone des Wärmetauschers. (Ansaugseite).

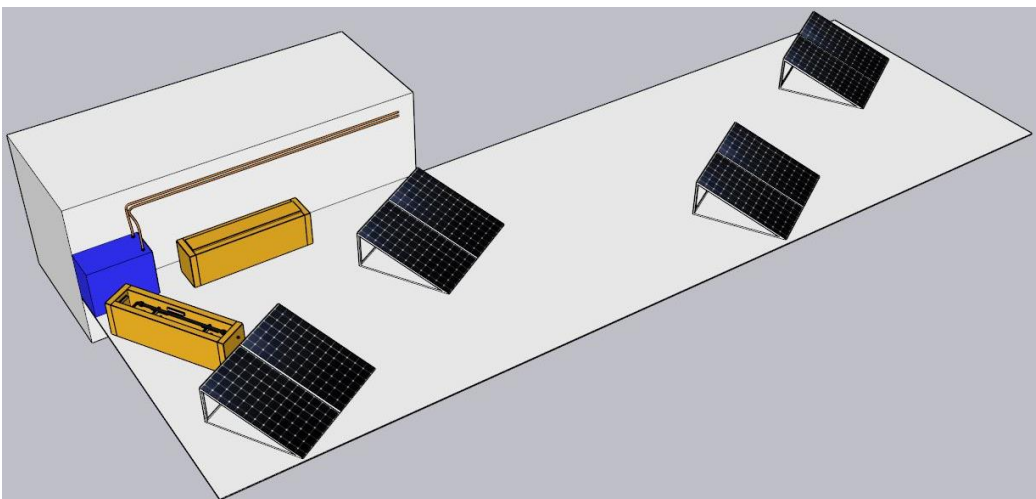


Abbildung 10: Situationsplan mit Testtank (mit Deckel) und Kontrolltank (ohne Deckel)

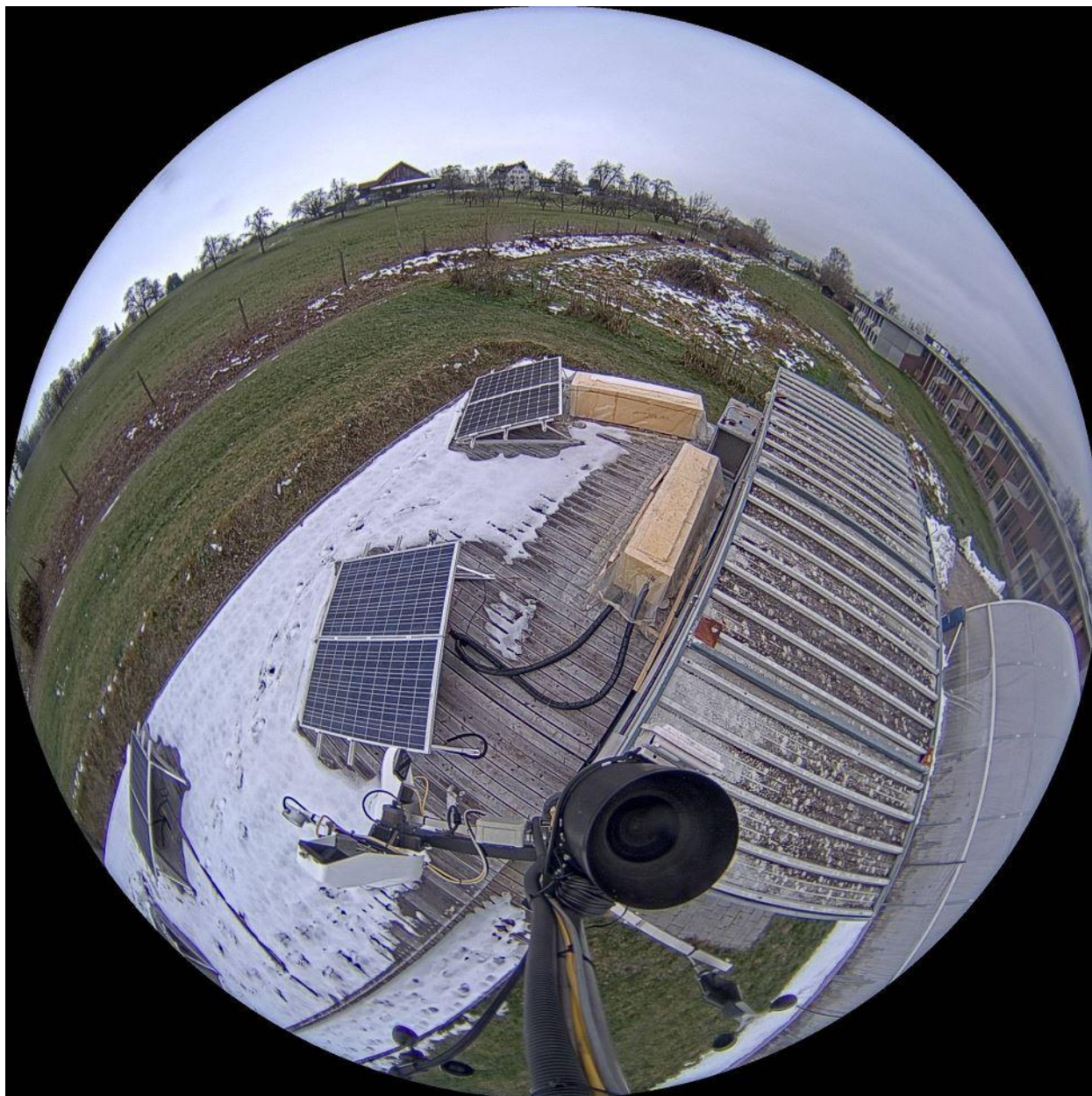


Abbildung 11: Kameraaufnahme der Tanks

Die Temperatursensoren für den Vor- und Rücklauf befinden sich bei der jeweiligen Verteilerstation direkt unter den Solarmodulen. Da die Tanks baugleich sind, ist der einzige Unterschied die Leitungslänge von der Verteilerstation zu den Tanks. Die Leitungen bestehen aus gedämmten Wellrohren. Die Wellrohre für den Testtank und Kontrolltank sind 3 m, respektive 2 m lang.

3.2.4. Einflussgrössen

Da in den Tanks keine Temperatursensoren platziert werden, wird die Rücklaufemperatur als Messgrösse für die Tanktemperatur verwendet. Die Tanktemperatur wird für Verlustrechnungen des Tankes gegenüber Aussen benötigt. Mit den Dämmwerten der Dämmung, den geschätzten Spalten bei den Deckeln und den Dimensionen der Wellrohre, kann abhängig von der Aussen-temperatur der Verlust ausgerechnet werden. Die Rechnungen werden in diesem Abschnitt gemacht und fliessen in die Resultate ein.

Zusätzlich wird die theoretische, temperaturabhängige Speicherkapazität der Tanks berechnet. Dieser Wert soll als Referenz bei der Auswertung der Daten dienen.

3.2.4.1. Dämmungsverluste

Die Dämmungsverluste sind abhängig von Innen- und Aussentemperatur, der Leitfähigkeit des Dämmstoffs, der Dicke und der Fläche des Dämmstoffs. Mit der folgenden Formel und den Werten aus Tabelle 6 kann der Verlust berechnet werden. Das Resultat ist in der Tabelle hervorgehoben.

$$Q = \frac{A \times \lambda \times dT}{l}$$

Tabelle 6: Dämmungsverluste

	Wert	Einheit	Kommentar
Wärmeleitfähigkeit Dämmung [λ]	0.036	W/m*k	Aus Datenblatt (swisspor AG, 2021)
Aussentemperatur	6	°C	Gemessen an Klimastation (Beispiel)
Innentemperatur	8	°C	Rücklaufemperatur (Beispiel)
Dicke Dämmung [l]	0.1	m	
Fläche Dämmung [A]	3.13	m ²	Berechnet mit 3D Modell
Verlust in Watt [Q]	2.25	W	Für Beispielttemperaturen

3.2.4.2. Verlust durch Luftspalten

Für die Verluste durch die Luftspalten beim Deckel wurden Tabellenwerte aus DIN EN ISO 6946 verwendet (Reick & Palecki, 1999). Dies sind Werte, welche spezifisch für Luftspalten in Dämmungen errechnet sind. Mit der folgenden Formel und den Werten aus Tabelle 7 kann der Verlust berechnet werden. Das Resultat ist in der Tabelle hervorgehoben.

$$Q = \frac{A \times dT}{\left[\frac{m^2 K}{W}\right]}$$

Tabelle 7: Verlust durch Luftspalten

	Wert	Einheit	Kommentar
Wärmedurchlasswiderstand	0.15	m ² *K/W	Aus Norm (kein Formelzeichen bekannt)
Aussentemperatur	6	°C	Gemessen an Klimastation (Beispiel)
Innentemperatur	8	°C	Rücklauftemperatur (Beispiel)
Fläche der Spalten [A]	0.018	m ²	0.5 cm über die ganze Länge. Beide Seiten.
Verlust in Watt [Q]	0.24	W	Für Beispielttemperaturen

3.2.4.3. Verlust durch Wellrohre

Die Wellrohre sind für beide Tanks unterschiedlich lang und haben für Vor- und Rücklauf unterschiedliche Verluste gegenüber der Aussentemperatur, da sie unterschiedliche Temperaturen führen. Der Verlust für jedes Rohr muss daher einzeln berechnet werden. Mit der folgenden Formel und den Werten aus Tabelle 8 können die Verluste berechnet werden. Die Resultate sind in der Tabelle hervorgehoben.

$$Q = \frac{A \times \lambda \times dT}{l}$$

Tabelle 8: Verlust durch Wellrohre

	Wert	Einheit	Kommentar
Wärmeleitfähigkeit Wellrohrdämmung [λ]	0.038	W/m*K	Aus Datenblatt (Austroflex, 2018)
Aussentemperatur [T]	6	°C	Gemessen an Klimastation (Beispiel)
Vorlauftemperatur [T]	12	°C	Vorlauftemperatur (Beispiel)
Rücklauftemperatur PCM [T]	10	°C	Rücklauftemperatur (Beispiel)
Rücklauftemperatur Kontroll [T]	10	°C	
Dicke Dämmung [l]	0.019	m	19 mm (Gemessen)
Länge Wellrohr PCM-Tank	3	m	Gemessen
Länge Wellrohr Kontrolltank	2	m	Gemessen
Fläche Wellrohr PCM-Tank [A]	0.268	m ²	28.5 mm als Relevanter Durchmesser (19 mm Wellrohr + 19 mm Dichtung)
Fläche Wellrohr Kontrolltank [A]	0.178	m ²	
Verlust Vorlauf PCM [Q]	3.22	W	Einzelne Verluste pro Wellrohr. (für Beispieltemperaturen)
Verlust Rücklauf PCM [Q]	2.14	W	
Verlust Vorlauf Kontroll [Q]	2.15	W	
Verlust Rücklauf Kontroll [Q]	1.43	W	
Gesamtverlust PCM [Q]	5.37	W	Addition der einzelnen Verluste. (für Beispieltemperaturen)
Gesamtverlust Kontroll [Q]	3.58	W	

3.2.4.4. Speicherkapazität Kontrolltank

Die Speicherkapazität wird abhängig von der Tanktemperatur vor und nach der Beladung berechnet. Der Tank hat per 3D-Modell ein gesamtes Sandvolumen von 250.4 l. Mit Hilfe der Messungen des gravimetrischen Wassergehalts können Rückschlüsse auf die Wassermasse und die Masse des Sandes gezogen werden. Die gesamte Masse des feuchten Sandes beträgt ca. 415.8 kg (Dichterechnung mit Messproben). Die durchschnittliche Abnahme der Masse nach der Trocknung beträgt ca. 9%. Somit sind ca. 37.7 kg der Gesamtmasse Wasser. Der Rest ist trockener Sand und ca. 378 kg schwer.

Mit der Masse des Sandes und des Wassers kann die speicherbare Energie beider Stoffe über den Temperaturunterschied und der spezifischen Wärmekapazität berechnet werden. Diese Grundrechnung gilt auch für beide Varianten der PCM-Tanks in den nächsten Abschnitten. Mit der folgenden Formel und den Werten in Tabelle 9 kann die Speicherkapazität mit den Beispielttemperaturen berechnet werden. Die Formel beinhaltet auch die Umrechnung von Joule zu Wattstunden. Das Ergebnis ist in der Tabelle hervorgehoben.

$$Q = \frac{(m_s \times c_s \times dT) + (m_w \times c_w \times dT)}{3600}$$

Tabelle 9: Speicherkapazität Kontrolltank

	Wert	Einheit	Kommentar
Wärmekapazität Sand [cs]	830	J/kgK	
Wärmekapazität Wasser [cw]	4200	J/kgK	
Masse Sand (trocken) [ms]	378.05	kg	
Masse Wasser [mw]	37.75	kg	
Temperaturveränderung [dT]	5	°K	Beispiel
Speicherkapazität [Q]	656	Wh	

3.2.4.5. Speicherkapazität PCM Tank mit ATP6

Zu den Kapazitätsberechnung des feuchten Sandes kommt beim PCM-Tank die Speicherkapazität des PCM, falls die Phasenübergangstemperatur über- bzw. unterschritten wird. Mit der folgenden Formel und den Werten in Tabelle 10 kann die Speicherkapazität mit den Beispielttemperaturen berechnet werden. Die Formel beinhaltet auch die Umrechnung von Kilojoule zu Wattstunden. Das Ergebnis ist in der Tabelle hervorgehoben.

$$Q = \frac{m \times h}{3.6}$$

Tabelle 10: Speicherkapazität PCM Tank mit ATP6

	Wert	Einheit	Kommentar
Temperaturveränderung [dT]	5	°K	Beispiel
Speicherkapazität ATP6 [h]	275	kJ/kg	(Axiotherm, 2018a)
Volumen PCM [V]	1.09	l	12.4 mm Innendurchmesser der 16 mm Rohre x 6
Dichte PCM [ρ]	0.75	kg/l	(Axiotherm, 2018a)
Masse PCM [m]	0.81	kg	
Speicherkapazität PCM [Q]	62.2	Wh	
Total	718.3	Wh	Addiert mit Kapazität der Kontrolltank-Rechnung

3.2.4.6. Speicherkapazität PCM Tank mit ATP12

Dieselbe Formel wie bei ATP6 wird auch bei ATP12 verwendet. In Tabelle 11 sind die Werte für ATP12 enthalte. Das Ergebnis wird in der Tabelle hervorgehoben.

Tabelle 11: Speicherkapazität PCM Tank mit ATP12

	Wert	Einheit	Kommentar
Temperaturveränderung [dT]	5	°K	Beispiel
Speicherkapazität ATP6 [h]	215	kJ/kg	(Axiotherm, 2018b)
Volumen PCM [V]	1.09	l	12.4 mm Innendurchmesser der 16 mm Rohre x 6
Dichte PCM [ρ]	0.8	kg/l	(Axiotherm, 2018b)
Masse PCM [m]	0.86	kg	
Speicherkapazität PCM [Q]	51.9	Wh	
Total	707.9	Wh	Addiert mit Kapazität der Kontrolltank-Rechnung

3.3. Versuchsplan

Der Versuch ist in zwei Phasen aufgeteilt. In der ersten Phase werden Testläufe mit dem ATP6 durchgeführt, in der zweiten Phase mit dem ATP12. Die Anzahl Testläufe ist abhängig davon, wie schnell das System die Vorlauftemperaturen erreichen kann. Idealerweise soll in beiden Phasen eine Woche lang jeden Tag mindestens einen Durchlauf durchgeführt werden. Somit sollen es pro Phase mindestens sieben Versuche sein. Die Durchflussmenge für alle Versuche wird auf 60 l/h gesetzt. Dies ist in einem stabilen Durchflussbereich des Solarlabors und generiert nicht unnötig hohe Systemdrücke. Initial werden die Tanks auf ein Temperaturniveau unter der Schmelztemperatur der PCM ausgekühlt (ca. 3 °C für das ATP6 und 8 °C für das ATP12). Dies wird im Rücklauf des Heizkreises gemessen. Sobald der Tank genügend ausgekühlt ist, wird ein Beladungsdurchlauf durchgeführt, bei dem mit einer konstanten Vorlauftemperatur beladen wird. Die Vorlauftemperatur ist über der Schmelztemperatur des PCM, damit der Phasenübergang auch stattfinden kann. Bei ATP6 ist die Vorlauftemperatur 10 °C, für ATP12 15 °C. Bei allen Versuchen werden Versuchs- und Kontrolltank parallel beladen und entladen, um externe Einflüsse auszuschliessen.

3.3.1. Messvorgang

Bei allen Durchläufen werden Vor- und Rücklauftemperatur, Durchfluss sowie die thermische Leistung von PCM-Tank und Kontrolltank gemessen. All diese Werte werden von der Software der Solaranlage automatisch im 10 Sekunden-Intervall in einer Datei abgelegt.

3.3.2. Auswertung der Daten

Nach dem Testlauf wird ein geeigneter Zeitraum definiert, bei dem Vor- und Rücklauftemperatur die Phasenübergangstemperatur überschritten werden. So kann sichergestellt werden, dass der Phasenübergang in den PCM stattfindet. Der Zeitraum soll bei allen Testläufen gleich gewählt werden, sodass die thermischen Leistungen unter den verschiedenen Testläufen vergleichbar sind.

Anhand der thermischen Energie, welche über diesen Zeitraum in den Tanks gespeichert wird, soll der Unterschied zwischen Kontroll- und Testtank ersichtlich sein. Die thermische Leistung wird über den Zeitraum aufsummiert, um die thermische Energie zu erhalten. Da beim Beladen der Tanks die thermische Leistung negativ ist (Weil der Tank als Speicher, nicht als Quelle verwendet wird), wird die Leistung erst invertiert. Die 10-Sekunden-Schritte werden durch 360 geteilt, um Wattstunden zu erhalten. Die Werte der thermischen Energie werden nicht grafisch dargestellt, da rein die aufsummierte Differenz zwischen PCM-Tank und Kontrolltank relevant ist. Das Resultat sind thermische Energiewerte in Wattstunden, welche über den Testlauf in den Tanks beladen werden. Die theoretischen Kapazitäts- und Verlustrechnungen im Kapitel 3.2.4

dienen als Vergleichswert. Die Beispieltemperaturen in den Rechnungen werden mit den effektiven Werten der Testläufe ersetzt und ergeben die theoretische Speicherkapazität beider Tanks. Diese werden mit den gemessenen thermischen Werten verglichen. Die Differenz zwischen Kontroll- und PCM-Tank repräsentiert die Speicherkapazität des PCM. Dies wird ebenfalls für die Messwerte und berechneten Werte berechnet.

Die Vor- und Rücklauftemperaturen werden grafisch dargestellt. Anhand dieser Darstellungen soll an den Rücklauftemperaturen ersichtlich sein, wo der Phasenübergang stattfindet. Bis zu der Phasenübergangstemperatur der jeweiligen PCM sollten die Rücklauftemperaturen parallel zueinander laufen. Sobald die Phasenübergangstemperatur erreicht wird, soll die Rücklauftemperatur des Kontrolltanks weiter steigen und diese des PCM-Tanks so lange stagnieren, bis alles PCM den Phasenübergang gemacht hat.

Sämtliche Berechnungen und Visualisierungen werden mit der Software «DIAdem-Student Edition» ausgewertet. Die Software ermöglicht, die Berechnungen zu scripten und somit denselben Ablauf für sämtliche Daten anzuwenden.

4. Resultate

4.1. ATP6

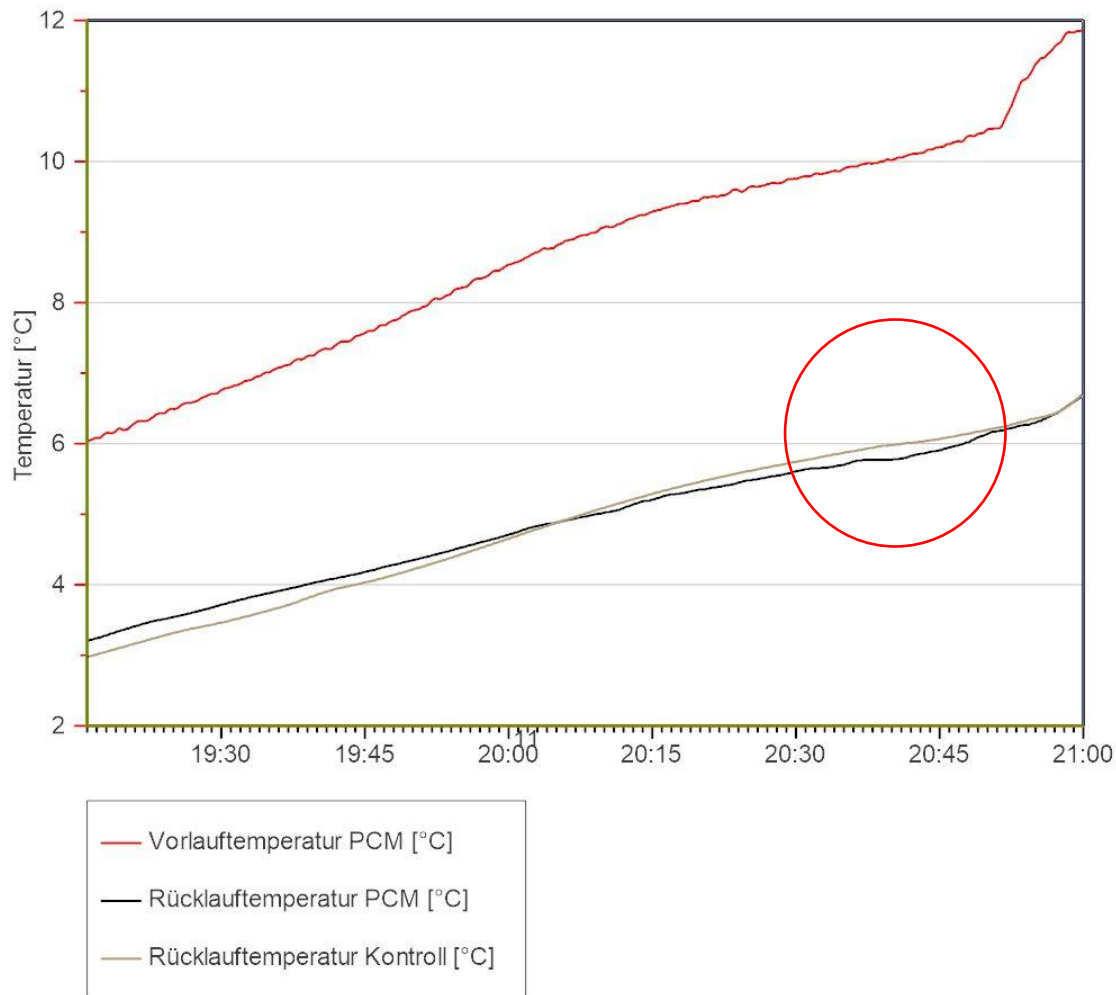


Abbildung 12: ATP6 Versuchsabschnitt über 1h 44 min (623 Messungen à 10 s)

Auf Abbildung 12 ist der einzige erfolgreiche Testlauf mit ATP6 sichtbar. Die Kurven für die Rücklauftemperatur verlaufen über den ganzen Testlauf nicht parallel und kreuzen sich sogar ausserhalb der Phasenübergangstemperatur. Theoretisch sollten sie, bis auf den Phasenübergangsbereich, parallel verlaufen. Eine kurze Zeit flacht die PCM-Rücklauftemperatur bei ca. 5.7 °C ab und steigt nach ca. 5 min wieder an. Anhand der Temperatur könnte dies der Phasenübergang des PCM sein. Der Bereich ist auf der Abbildung mit einem roten Kreis markiert.

Tabelle 12 zeigt die numerischen Resultate des Testlaufs. Der Durchlauf ist in beiden Tanks gleich und somit sind die Daten der thermischen Energie vergleichbar. Die gemessenen Werte sind gemäss den Verlustrechnungen in Kapitel 3.2.4 korrigiert. Auffällig ist, dass die Differenz (PCM Speicherkapazität) bei den Messwerten weniger als halb so gross ist, wie bei den berechneten Werten.

Tabelle 12: Resultate ATP6

	Thermische Energie gemessen [Wh]	Durchfluss [l]	Thermische Energie berechnet [Wh]
Kontroll	400.9	104	486.7
PCM	412.4	104	516.2
Differenz	11.9	-	30

Aufgrund von Frostschäden konnten mit ATP6 keine weiteren Versuche durchgeführt werden.

4.2. ATP12

4.2.1. Testlauf 1

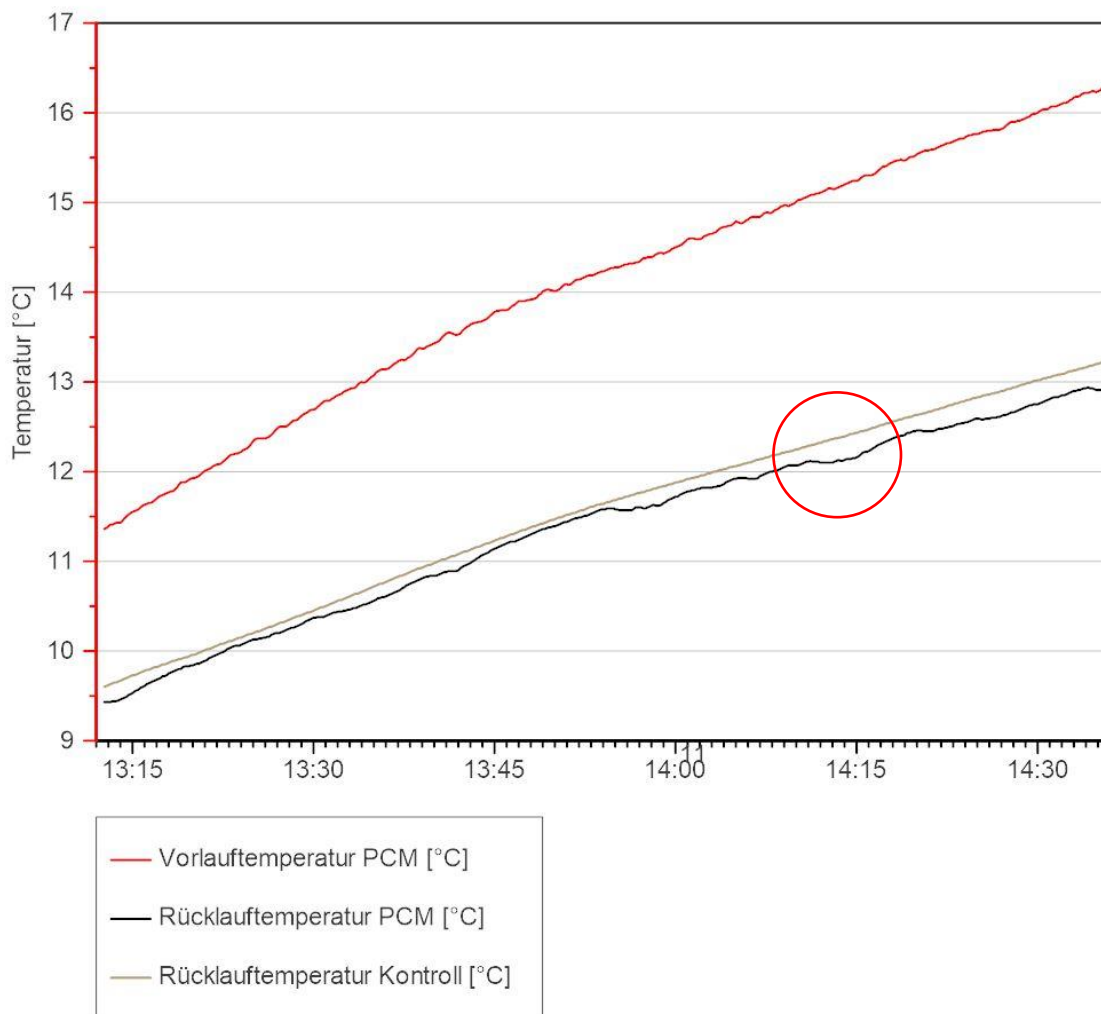


Abbildung 13: ATP12 Versuchsabschnitt über 1h 23 min (500 Messungen à 10 s)

Abbildung 13 zeigt die grafische Auswertung der Rücklauftemperaturen für den ersten Testlauf mit ATP12. Hier ist die unregelmässige Aufzeichnung der Rücklauftemperatur des PCM-Tanks gegenüber des Kontrolltanks gut sichtbar. Bei ca. 12.1 °C flacht die Temperatur kurz ab und steigt nach ca. 5 min wieder an (Roter Kreis). Auffällig ist aber, dass bei ca. 11.5 °C ein ähnliches Muster sichtbar ist, welches sich ebenfalls im Phasenübergangsbereich befinden könnte (abhängig von der Genauigkeit der Temperatursensoren).

Tabelle 13 zeigt die numerischen Resultate des Testlaufs. Der Durchlauf ist in beiden Tanks gleich und somit sind die Daten der thermischen Energie vergleichbar. Die gemessenen Werte sind gemäss den Verlustrechnungen in Kapitel 3.2.4 korrigiert. Auffällig ist, dass bei diesem Testlauf weniger als die Hälfte der thermischen Energie gemessen wird, als theoretisch möglich wäre.

Die Differenz (PCM Speicherkapazität) ist bei diesem Testlauf sehr nahe an dem theoretischen Wert.

Tabelle 13: Resultate Testlauf 1

	Thermische Energie gemessen [Wh]	Durchfluss [l]	Thermische Energie berechnet [Wh]
Kontroll	180	83.8	476.25
PCM	214	83.8	512.43
Differenz	34	-	36.18

4.2.2. Testlauf 2

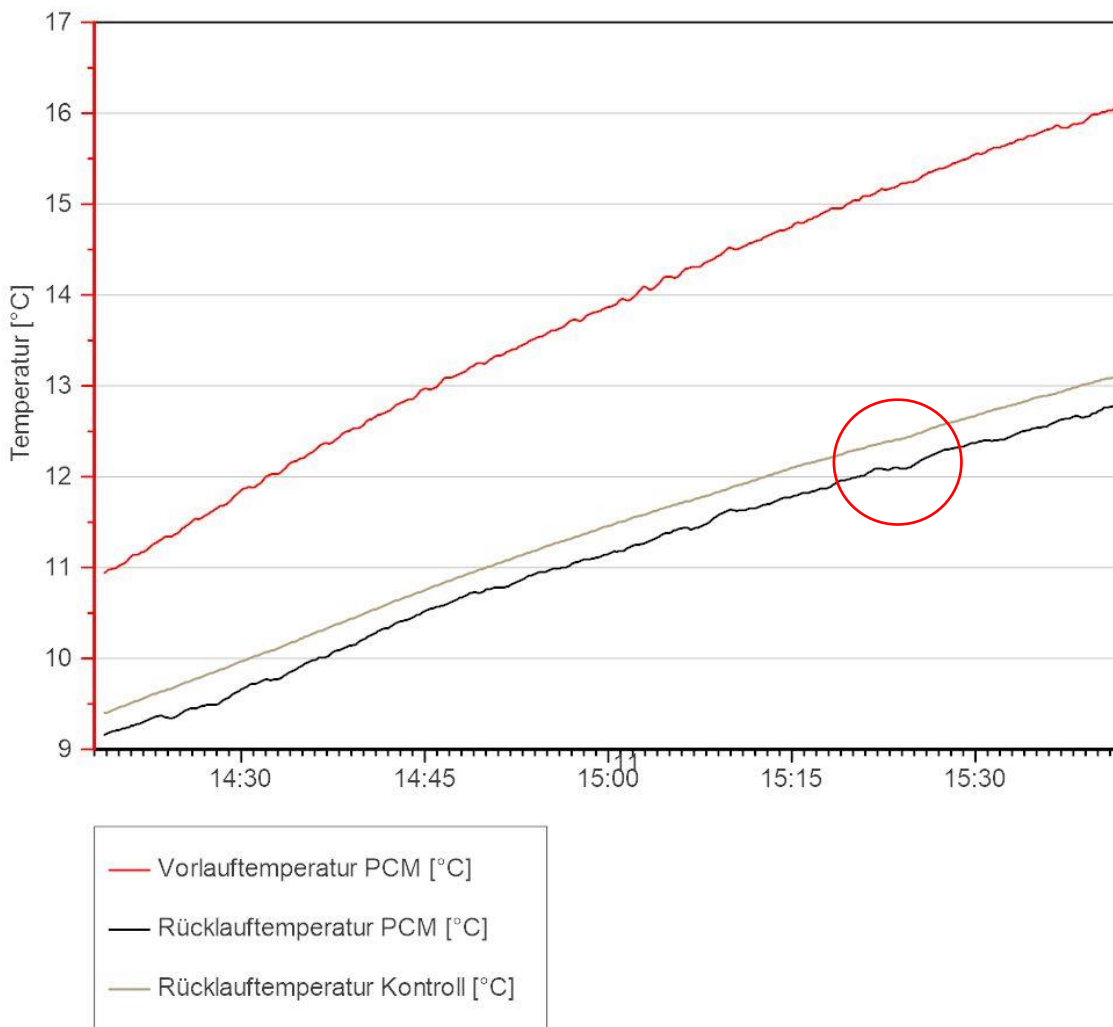


Abbildung 14: ATP12 Versuchsabschnitt über 1h 23 min (500 Messungen à 10 s)

Abbildung 14 zeigt die grafische Auswertung der Rücklauftemperaturen für den zweiten Testlauf mit ATP12. Auch hier ist die unregelmässige Aufzeichnung der Rücklauftemperatur des PCM-

Tanks gegenüber des Kontrolltanks gut sichtbar. Bei ca. 12.1 °C flacht die Temperatur kurz ab und steigt nach ca. 5 min wieder an (roter Kreis). Die Veränderung ist aber so klein, dass es auch eine Unregelmässigkeit der Temperatursensoren sein könnte. Auf der ganzen Kurve sind mehrere Veränderungen in dieser Grössenordnung sichtbar.

Tabelle 14 zeigt die numerischen Resultate des Testlaufs. Der Durchlauf ist in beiden Tanks gleich und somit sind die Daten der thermischen Energie vergleichbar. Die gemessenen Werte sind gemäss den Verlustrechnungen in Kapitel 3.2.4 korrigiert. Auffällig ist auch hier, dass bei diesem Testlauf weniger als die Hälfte der thermischen Energie gemessen wird, als theoretisch möglich wäre. Auffällig ist, dass die gemessene Differenz (PCM-Speicherkapazität) grösser ist als die berechnete.

Tabelle 14: Resultate Testlauf 2

	Thermische Energie gemessen [Wh]	Durchfluss [l]	Thermische Energie berechnet [Wh]
Kontroll	161.8	83.4	486.75
PCM	210.6	83.7	526.8
Differenz	48.8	-	40.05

4.2.3. Testlauf 3

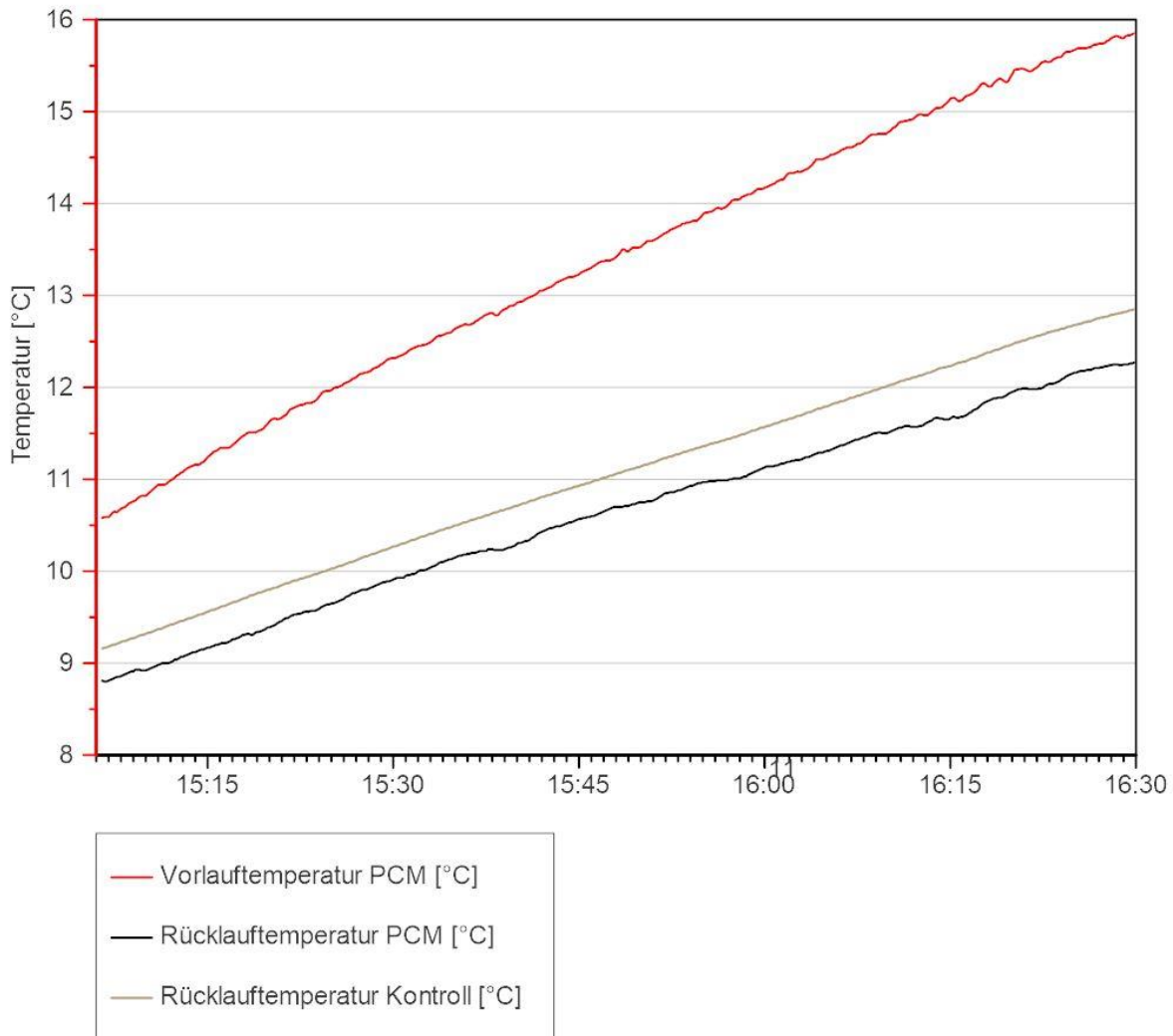


Abbildung 15: ATP12 Versuchsabschnitt über 1h 23 min (500 Messungen à 10 s)

Abbildung 15 zeigt die grafische Auswertung der Rücklauftemperaturen für den dritten Testlauf mit ATP12. Bei diesem Versuch sind keine Bereiche sichtbar, welche auf einen Phasenübergang hinweisen würden.

Tabelle 15 zeigt die numerischen Resultate des Testlaufs. Der Durchlauf ist in beiden Tanks gleich und somit sind die Daten der thermischen Energie vergleichbar. Die gemessenen Werte sind gemäss den Verlustrechnungen in Kapitel 3.2.4 korrigiert. Die thermischen Energiewerte sind auch hier viel kleiner als die berechneten Werte. Auch hier ist die gemessene Differenz (PCM Speicherkapazität) grösser als die berechnete. In diesem Testlauf ist die Differenz beinahe dreimal so hoch wie berechnet.

Tabelle 15: Resultate Testlauf 3

	Thermische Energie gemessen [Wh]	Durchfluss [l]	Thermische Energie berechnet [Wh]
Kontroll	153.7	83.5	484.12
PCM	215	83.7	507
Differenz	61.3	-	22.88

4.2.4. Testlauf 4

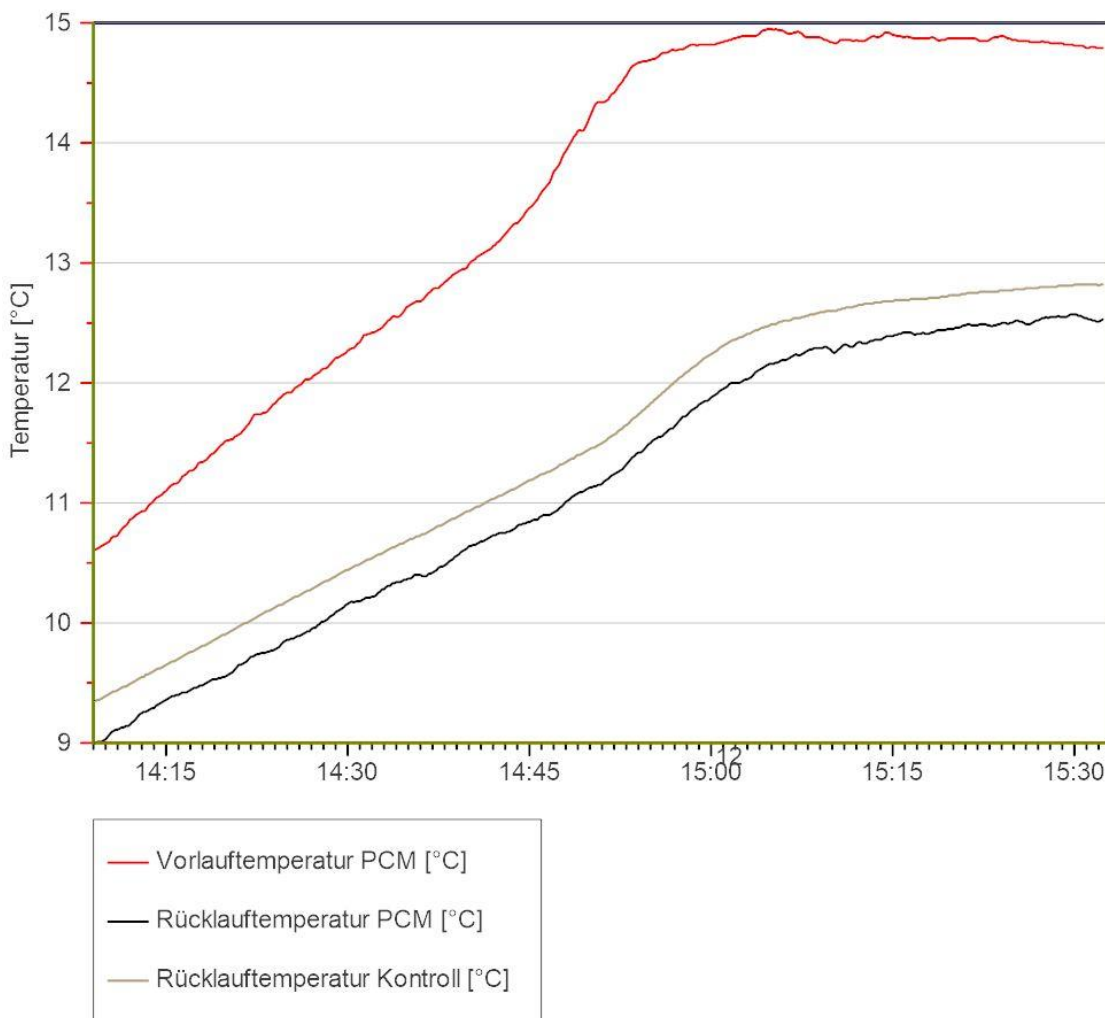


Abbildung 16: ATP12 Versuchsabschnitt über 1h 23 min (500 Messungen à 10 s)

Abbildung 16 zeigt die grafische Auswertung der Rücklauftemperaturen für den vierten Testlauf mit ATP12. Auch bei diesem Versuch sind keine Bereiche sichtbar, welche auf einen Phasenübergang hinweisen würden.

Tabelle 16 zeigt die numerischen Resultate des Testlaufs. Der Durchlauf ist in beiden Tanks gleich und somit sind die Daten der thermischen Energie vergleichbar. Die gemessenen Werte

sind gemäss den Verlustrechnungen in Kapitel 3.2.4 korrigiert. Die thermischen Energiewerte sind auch hier viel kleiner als die berechneten Werte. Bei diesem letzten Testlauf ist die gemessene Differenz (PCM Speicherkapazität) wieder kleiner als die berechnete.

Tabelle 16: Resultate Testlauf 4

	Thermische Energie gemessen [Wh]	Durchfluss [l]	Thermische Energie berechnet [Wh]
Kontroll	153.4	83.8	455.26
PCM	197.7	83.9	520.3
Differenz	44.3	-	65.04

Aufgrund technischer Schwierigkeiten mit der Anlage, konnten keine weiteren Versuche durchgeführt werden.

5. Diskussion

Ein Aspekt, welcher in den Resultaten sichtbar wird, sind die unterschiedlichen Werte, welche die thermischen Leistungen der beiden Tanks während den Versuchen lieferten. Diese sollten dank der Verlustrechnungen praktisch identisch sein. Auffällig ist dabei, dass die Vorlauftemperatur einen Unterschied zwischen den zwei Tanks aufweist, obwohl sie von derselben Quelle gespeisen werden (Abbildung 17). Auch die Rücklauftemperatur weist eine regelmässige Differenz ausserhalb des PCM-Bereichs auf. Die Wellrohrlänge kann als Begründung ausgeschlossen werden, da der Tank mit der kürzeren Leitung (Kontrolltank) die tiefere Vorlauftemperatur anzeigt (eine längere Leitung sollte mehr Verluste haben).

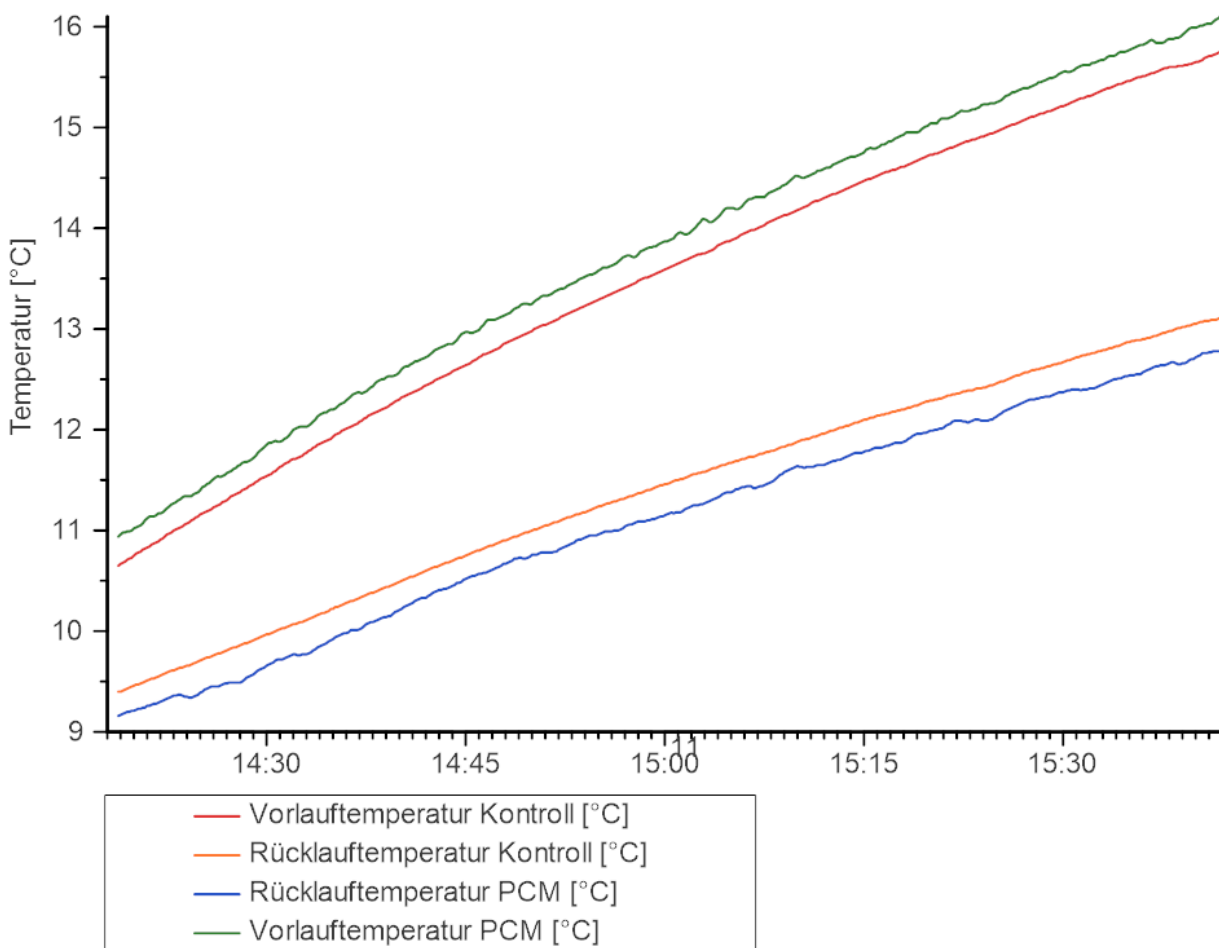


Abbildung 17: Visualisierung der Vor- und Rücklauftemperaturen für Testlauf 1 (ATP12)

Eine mögliche Erklärung ist, dass die Temperatursensoren nicht korrekt kalibriert wurden. Dies wurde bei der Vorbereitung des Versuchs übersehen. Auch der Fakt, dass die Temperaturkurven im Testtank viel abrupter und unregelmässiger aufgezeichnet werden, weist auf einen Fehler in den Sensoren hin. Somit ist zu erwarten, dass auch die Resultate der thermischen Leistung

ungenau sind. Für zukünftige Versuche sollten die Temperatursensoren vorgängig genau kalibriert oder getestet werden, um einen Fehlerwert in die Messungen einrechnen zu können.

Um klarere Ergebnisse zu erlangen, wäre es auch ein grosser Vorteil, wenn die Vorlauftemperaturen über eine Mischbatterie konstant gehalten werden könnten. So wäre es visuell ebenfalls einfacher die Daten auszuwerten. In diesem Experiment sind die Grafiken visuell nur bedingt aussagekräftig, da es für eine visuelle Auswertung sehr konstante Temperaturen braucht.

Ein weiterer Aspekt, welcher in den Resultaten sichtbar wurde, ist dass die theoretischen Energiespeicherwerte bei den meisten Versuchen nur knapp zur Hälfte erreicht wurden. Dies kann mit der Messung der Tanktemperatur begründet werden. Sämtliche Berechnungen basieren auf der Rücklauftemperatur als Wert für die Temperatur im Tank. Da der feuchte Sand ein träges thermisches Medium ist, kann es sein, dass ein Teil des Sandes im Tank die Rücklauftemperatur zum Zeitpunkt der Messung noch nicht erreicht hat. Eine Vermutung, warum dieser Effekt beim Testlauf mit ATP6 weniger stark ausgeprägt ist, gibt es zurzeit nicht. Für zukünftige Versuche mit diesen Tanks, sind Temperaturmessungen im Inneren des Tanks unerlässlich.

Die Differenzen zwischen Kontroll- und Testtank (PCM Speicherkapazitäten) sind in einer Größenordnung, welche den erwarteten Resultaten entsprechen. Bei Testlauf 2 und 3 (ATP12) ist jedoch die gemessene Differenz grösser als die errechnete. Dies ist mit den PCM nicht möglich, was die Vertrauenswürdigkeit der Resultate in Frage stellt. Die Thermische Leistung wird über die Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur gemessen. Auf Abbildung 17 ist die gleichmässige Differenz über den gesamten Zeitraum des Tests sichtbar. Die Differenz beim PCM-Tank ist konstant grösser als diese des Kontrolltanks. Zudem ist visuell keine Veränderung im Bereich der Schmelztemperatur des PCM sichtbar. Der «höher-als-mögliche» Wert für die thermische Leistung kann mit diesem Effekt begründet werden.

Die Bauform der Tanks hat sich im Sinne des Experiments bewährt, da die Rohre relativ einfach auseinandergenommen werden können, um andere PCM einzufüllen. Dieser Vorteil hat sich aber auch als Nachteil erwiesen, da es zu Dichtheitsproblemen kam. Aus diesem Grund mussten die Versuche mit ATP6 vorzeitig abgebrochen werden. Für zukünftige Versuche sollte eine Variante gesucht werden, mit der die Rohre dichter miteinander verbunden werden können. Die Aussenhülle aus Isolation hat ihren Zweck erfüllt.

Das Rohr-in-Rohr System hat sich ebenfalls als positiv erwiesen. Bei der Demontage des ATP6-Versuches war sichtbar, dass das PCM komplett durchgefroren war, und kein Glykol im PCM vorhanden war. Dies zeigt, dass das Experiment in Theorie gelungen ist, aber keine genauen Daten davon extrahiert werden konnten.

6. Literaturverzeichnis

- Austroflex. (2018, August). Technisches Datenblatt Wellrohre. Abgerufen 31. Dezember 2021, von https://www.farko.com/files/solaranbindungsleitung_solarflex.pdf
- Axiotherm. (2018a, Januar 31). *Datasheet ATP6*. Abgerufen von <https://www.axiotherm.de/en/produkte/axiotherm-pcm/>
- Axiotherm. (2018b, Januar 31). *Datasheet ATP12*. Abgerufen von <https://www.axiotherm.de/en/produkte/axiotherm-pcm/>
- Doormann, G. (2021, September 20). Wirkungsgrad Solarthermie. Abgerufen 10. Januar 2022, von <https://www.solaranlagen-portal.com/solarthermie/thermische-solaranlage/wirkungsgrad>
- Gempeler, A., & Kleptcha, S. (2010). Bankgebäude der Raiffeisenbank. Abgerufen 12. Januar 2022, von EZeit Ingenieure GmbH website: <https://ezeit-ingenieure.de/projekt/bankgebaeude-der-raiffeisenbank/>
- Hau, M. (2022). Der Wirkungsgrad moderner Solarzellen. Abgerufen 10. Januar 2022, von <https://www.eigensonne.de/wirkungsgrad-solarzelle/>
- Neumann, N., & Popp, A. (2018, Mai). Funktionsschema des eTank-Systems | eTank. Abgerufen 13. Dezember 2021, von <http://www.etank.de/etank-funktion/etank-funktion-schema/>
- Reick, M., & Palecki, S. (1999, Oktober). *Auszug aus den Tabellen und Formeln der DIN EN ISO 6946*. Abgerufen von https://www.uni-due.de/ibpm/Aufgabensammlung/NeuNorm_A4.pdf
- swisspor AG. (2021, Dezember 31). *XPS 300 GE Stärke 100 mm Datenblatt*. Abgerufen von <https://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=60>
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifikation von Energiespeichermedien (Zalba, Marín, Cabeza, & Mehling, 2003)	7
Abbildung 2: Visualisierung eines eTanks unter einer Raiffeisenbank in Montreux (Gempeler & Kleptcha, 2010).	8
Abbildung 3: eTank im Bau. Die Heizspiralen sind am rechten unteren Bildrand sichtbar. (Gempeler & Kleptcha, 2010)	9
Abbildung 4: Querschnitt des Rohrsystems	14
Abbildung 5: Seitenansicht des Tanks ohne Sand und Seiten- und Deckendämmung.	16
Abbildung 6: 16 mm Rohr mit Endkappe und Distanzstück (Links) und 32 mm Rohr mit Anschlag (Rechts).	17
Abbildung 7: Verbindungsstück mit Adaptern	17
Abbildung 8: Holzkonstruktion als Support für die Rohre.....	18
Abbildung 9: Grafische Repräsentation der gravimetrischen Feuchtigkeitsmessungen	19
Abbildung 10: Situationsplan mit Testtank (mit Deckel) und Kontrolltank (ohne Deckel)	19
Abbildung 11: Kameraaufnahme der Tanks	20
Abbildung 12: ATP6 Versuchsabschnitt über 1h 44 min (623 Messungen à 10 s)	28
Abbildung 13: ATP12 Versuchsabschnitt über 1h 23 min (500 Messungen à 10 s)	30
Abbildung 14: ATP12 Versuchsabschnitt über 1h 23 min (500 Messungen à 10 s)	31
Abbildung 15: ATP12 Versuchsabschnitt über 1h 23 min (500 Messungen à 10 s)	33
Abbildung 16: ATP12 Versuchsabschnitt über 1h 23 min (500 Messungen à 10 s)	34
Abbildung 17: Visualisierung der Vor- und Rücklauftemperaturen für Testlauf 1 (ATP12)	36

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Berechnung der theoretischen Speicherkapazität eines eTanks.....	10
Tabelle 2: Berechnung der Speicherkapazität eines Wasser-Pufferspeichers.....	10
Tabelle 3 Technische Daten ATP6 von Axiotherm (Axiotherm, 2018a).	13
Tabelle 4: Technische Daten von ATP12 von Axiotherm (Axiotherm, 2018b).	14
Tabelle 5: Stückliste	15
Tabelle 6: Dämmungsverluste	21
Tabelle 7: Verlust durch Luftspalten	22
Tabelle 8: Verlust durch Wellrohre	23
Tabelle 9: Speicherkapazität Kontrolltank	24
Tabelle 10: Speicherkapazität PCM Tank mit ATP6	25
Tabelle 11: Speicherkapazität PCM Tank mit ATP12	25
Tabelle 12: Resultate ATP6	29
Tabelle 13: Resultate Testlauf 1	31
Tabelle 14: Resultate Testlauf 2	32
Tabelle 15: Resultate Testlauf 3	34
Tabelle 16: Resultate Testlauf 4	35

9. Anhang

Roh-Messwerte im TXT-Format

9.1. Poster



BETRIEBSVERSUCHE AN EINEM eTANK MODELL

Poster zur Bachelorarbeit von Lukas Bernhard | BA Studiengang Umweltingenieurwesen | Fachkorrektor: Manuel Hunziker | 13.1.2022

eTanks als saisonale thermische Energiespeicher sind eine vielversprechende Technologie, um die schier unendliche Energie der Sonne über das ganze Jahr zu nutzen (Abbildung 1). Mit einer grossen Speicherkapazität, relativ einfacher Bauform und ohne komplizierte Bauteile, sind sie ideal für solarthermische Systeme geeignet. Die Nutzung der Sonne im Winter ist jedoch aufgrund der tiefen Aussentemperaturen und Einstrahlungswinkel mangelhaft. Die tiefen Rücklauftemperaturen der Solaranlage sind aufgrund des niedrigen Temperaturunterschiedes zum eTank nicht gut speicherbar. Abhilfe bietet in diesem Szenario die Kombination des eTanks mit Phasenübergangsmaterialien (PCM). Mithilfe dieser Materialien kann die Speicherkapazität bei niedrigen Temperaturen erhöht werden. Das PCM wird so gewählt, dass der Phasenübergang präzise bei den tiefen Wintertemperaturen stattfindet, die die Sonne zu diesem Zeitpunkt liefern kann.

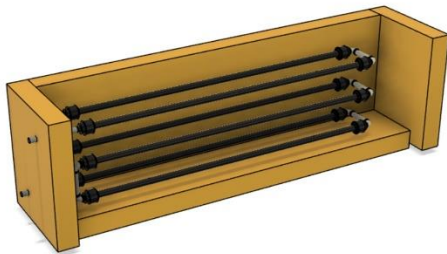


Abbildung 2: Seitenansicht des 3D-Modells der Tanks ohne Sand und Seiten- und Deckendämmung



Abbildung 2: Visualisierung eines eTanks unter einer Raifelsenbank in Montreux.

Um den Effekt zu quantifizieren, werden zwei Modell-eTanks gebaut (Abbildung 2). Das PCM wird mit einem Doppelrohrsystem in einem der zwei Modelltanks eingebracht. Im Solarlabor der ZHAW (Abbildung 3) werden Testdurchläufe durchgeführt, bei denen die Tanks parallel be- und entladen werden. Sämtliche relevante Daten werden während den Tests geloggt, ausgewertet und anschliessend bei der Auswertung mit berechneten, theoretischen Werten abgeglichen.



Abbildung 3: Kameraaufnahme des Versuchsaufbaus beim Solarlabor

Die Resultate zeigen bei mehreren Testläufen eine grosse Abweichung zwischen den gemessenen und den berechneten Werten (Tabelle 1). Auch in den grafischen Darstellungen der Temperaturen ist der Phasenübergang schlecht sichtbar (Abbildung 4).

Die Bauart der Modelltanks ist jedoch vielversprechend. Mit der Kalibration der Temperatur-sensoren, dichteren Rohrübergängen und mehr Kontrolle über die Vorlauftemperatur zu den Tanks könnten weitere Experimente mit dem System durchgeführt werden.

	Thermische Energie gemessen [Wh]	Durchfluss [l]	Thermische Energie berechnet [Wh]
Kontroll	161.8	83.4	486.75
PCM	210.6	83.7	526.8

Tabelle 1: Thermische Energiewerte eines einzelnen Testlaufs. Der Unterschied zwischen den gemessenen und berechneten Werten ist hier gut sichtbar.

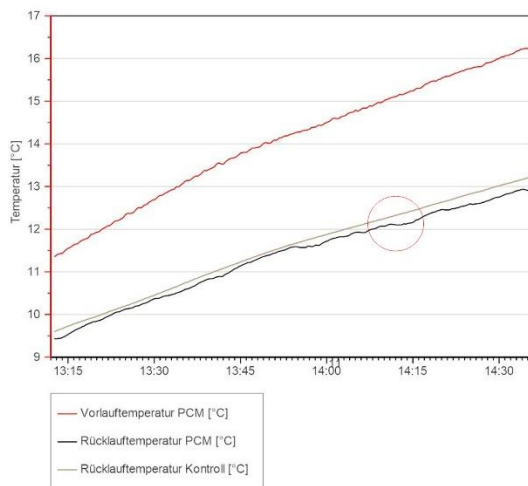


Abbildung 4: Grafische Visualisierung der Vor- und Rücklauftemperaturen eines einzelnen Testlaufs. Die rote Markierung zeigt den potentiellen Phasenübergang bei 12°C.

Literaturverzeichnis (Auswahl)
 Kempfner, A., & Knappe, S. (2016). Kaskadierung der Raifelsenbank. Abgerufen 13. Januar 2022, von FHNW Ingenieurwesen via https://www.ingenieurwesen.de/projects/raifelsenbank-der-zhaw/