

Entwicklung und Demonstration eines thermischen Speichermodells für die Simulationssoftware Polysun

Version: 1.0

Autor: M. Lacher

E-Mail: Markus.lacher@stud.hslu.ch

Matrikelnummer: 12 154 688

Advisor: Prof. Dr. M. Kleingries

Experte: Dr. G. Guidati

Fachgebiet: Energy & Environment

Erstellt am: 14. September 2020

Letzte Änderung am: 21. Januar 2021

Abstract Deutsch

Situation / Herausforderung	Trotz jahrzehntelanger Untersuchungen und Simulationen von Phasenwechselmaterialien (phase change material, PCM) sowie latent thermischen Speicher sind noch wenige Programme für Energiesysteme-Simulationen mit latent thermischen Speicher ausgestattet. Der Grund liegt darin, dass PCM Eigenschaften besitzen, die nur schwer zu simulieren sind.
Ziel	Das Ziel war ein latent thermischer Speicher für das Simulationsprogramm Polysun zu programmieren und auszutesten. Neben dem Speicher soll auch die mathematische Grundlage dokumentiert sowie eine Erstellanleitung für einen latent thermischen Speicher erstellt werden.
Vorgehen	Zu Beginn wurde der latent thermische Speicher genau analysiert um die Energiewege in Polysun genau darzustellen. Danach erfolgte eine Parameteranalyse der Fluideigenschaften mit dem Ziel mehrere PCMs zu programmieren. Die programmierten PCMs wurden mit einer Versuchssimulation getestet und danach mit einem nachprogrammierten Versuchsaufbau validiert. Zuletzt wurde ein PCM verwendet, um ein Energiesystem eines Einfamilienhauses mit einem latent thermischen Speicher in Polysun zu simulieren.
Ergebnisse	Die Simulationen zeigen auf, dass sowohl PCMs wie auch latent thermischer Speicher in Polysun simuliert werden können. Der simulierte Versuchsspeicher zeigte mit einer durchschnittlichen Kapazität von 7.97 kWh eine ähnlich hohe Kapazität des realen Systems mit 7.9 kWh.
Empfehlungen	<i>Der latent thermische Speicheraufbau soll mit weiteren realen Systemen validiert werden, um mögliche Programmierfehler auszuschliessen bzw. die Robustheit des Speichersystems weiter zu prüfen.</i>

Abstract English

Situation / Challenge	Despite decades of studies and simulations of phase change materials (short PCM) as well as latent thermal storage, few programs for energy systems simulations are still equipped with latent thermal storage. The reason is, that PCM have properties that are difficult to simulate.
Goal	The goal was to program and test a latent thermal storage for the simulation program Polysun. In addition to the storage, the mathematical basis should also be documented and a creation manual for a latent thermal storage should be created.
Approach	At the beginning, the latent thermal storage was analysed in detail in order to represent the energy paths in Polysun exactly. This was followed by a parameter analysis of the fluid properties with the goal of programming several PCMs. The programmed PCMs were tested with an experimental simulation and then validated with a reprogrammed experimental setup. Lastly, a PCM was used to simulate a single-family home energy system with a latent thermal storage tank in Polysun.
Results	The simulations indicate, that both PCMs and latent thermal storage can be simulated in Polysun. The simulated experimental storage system showed an average capacity of 7.97 kWh, similar to the real system's capacity of 7.9 kWh.
Recommendations	<i>The latent thermal storage setup will be validated with further real systems to exclude possible programming errors and to further test the robustness of the storage system.</i>

Änderungsnachweis

Version	Änderungsgrund	Kürzel	Datum
1.0	Erstellung des Dokumentes	M. Lacher	21.01.21

Inhalt

Abstract Deutsch	2
Abstract English	3
1 Begriffe und Definitionen	6
1.1 Symbole, Formelzeichen, Einheiten.....	6
1.2 Abkürzungen	10
1.3 Begriffe und Definitionen	11
2 Einleitung	12
3 Ausgangslage.....	13
3.1 Thermische Energie	13
3.1.1 Thermische Speicher in der Gebäudetechnik	13
3.1.2 Energiepolitik in der Schweiz	14
3.2 Physikalische Grundlagen von thermischem Speicher.....	15
3.2.1 Erster Hauptsatz der Thermodynamik.....	15
3.2.2 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	17
3.3 Stand der Technik	18
3.3.1 Thermochemischer Speicher	18
3.3.2 Sensibler thermischer Speicher	19
3.3.3 Latenter thermischer Speicher	20
3.4 Studien zu latent thermischem Speicher.....	22
3.4.1 Charakteristiken.....	22
3.4.2 Simulationen.....	23
4 Aufgabenklärung	24
4.1 Anforderungen / Nutzungsvereinbarung	24
4.2 Ziel der Arbeit	24
4.3 Rahmenbedingungen	24
4.4 Nutzung.....	24
5 Vorgehen.....	25
5.1 Zusammenfassung	25
5.2 Systemdefinition	26
5.2.1 Aufbau eines PCM-Speichers.....	26
5.2.2 Energiefluss in einem PCM-Speicher.....	28
5.2.3 System Gebäude	29

5.3	Fluiddefinitionen in Polysun	30
5.3.1	Einstellung der Fluideigenschaften	30
5.3.2	Homogene Fluide und Mischungen	31
5.3.3	Austestung der einzelnen Parameter	33
5.4	Aufbau eines latent thermischen Speichers	38
5.4.1	Aufteilung des Speichers in sensiblen und latenten Teil	38
5.4.2	Einstellung der Kapseloberfläche und Kapselmaterial	40
5.4.3	Reduktion von Wärmeverlusten	41
5.5	Aufbau der Simulation in Polysun	41
5.5.1	Aufbau PCM-Versuch	41
5.5.2	Aufbau Validierungssystem	43
5.5.3	Simulation Einfamilienhaus	46
6	Ergebnisse	48
6.1	Parameterstudie Fluiddefinition	48
6.1.1	Erste Testreihe	48
6.1.2	Zweite Testreihe	50
6.3	PCM-Fluide	52
6.3.1	Verhalten von Wasser in der Simulation	52
6.3.2	Verhalten von PCM in der Simulation	53
6.4	Validierung Versuchsaufbau	56
6.4.1	Temperaturverlauf der Ladephase	56
6.4.2	Temperaturverlauf der Entladungsphase	58
6.4.3	Nachberechnung Kapazität	60
6.4.4	Vergleich mit Wasser	63
6.5	Simulation Einfamilienhaus	64
6.5.1	Verhalten des Speichers mit einem Ölkessel	64
6.5.2	Verhalten des Speichers mit einem 58 °C PCM	65
6.5.3	Verhalten des Speichers mit einem 53 °C PCM	67
7	Schlussfolgerungen, Ausblicke und Empfehlungen	69
8	Literatur und Quellenverzeichnis	70
9	Verzeichnisse	73
9.1	Abbildungen	73
9.2	Tabellen	74
9.3	Formeln	74
10	Erklärung zur Urheberschaft	76
Anhang		77
I	Aufgabenstellung	77
II	Pflichtenheft	77
III	Projektplan	77
IV	Anleitung PCM-Speicher für Polysun	77
V	Elektronische Daten	77

1 Begriffe und Definitionen

1.1 Symbole, Formelzeichen, Einheiten

Stöchiometrie

A	Molekül / Element A [mol]
B	Molekül / Element B [mol]
AB	Chemisches Produkt mit Molekül / Element A und B [mol]

Dimensionen

A	Fläche [m ²]
A_i	Fläche Element I [m ²]
A_R	Fläche Rohr [m ²]
A_{PCM}	Oberfläche Phasenwechselmaterial [m ²]
A_{Kugel}	Oberfläche Kugel [m ²]
d	Durchmesser Speicher [m]
d_R	Durchmesser Rohr [m]
d_K	Theoretische Kugeldurchmesser [m]
d_{Kugel}	Durchmesser Kugel [m]
h	Höhe Speicher [m]
m_{WT}	Masse Wärmeträger [kg]
m_{PCM}	Masse Phasenwechselmaterial [kg]
$m_{PC,L}$	Masse Phasenwechselmaterial, Liquidphase [kg]
$m_{PC,S}$	Masse Phasenwechselmaterial, Solidphase [kg]
m_{Sys}	Masse im System [kg]
N	PCM-Kapselanzahl [Stück]

l	Materialdicke [m]
l_i	Dicke des Materials [m]
T	Temperatur [Kelvin]
T_1	Temperatur Zustand 1 [K]
T_2	Temperatur Zustand 2 [K]
T_3	Temperatur Phasenwechsel [K]
t	Zeit [s]
V	Volumen [m ³]
X	Kapsellänge in X-Richtung [m]
Y	Kapsellänge in Y-Richtung [m]
Z	Kapsellänge in Z-Richtung [m]
z_a	Höhenunterschied zur Bezugsebene, Austritt vom System [m]
z_e	Höhenunterschied zur Bezugsebene, Eintritt ins System [m]
π	Kreiszahl PI [~ 3.14]

Kinematik

c_a	Geschwindigkeit, Austritt vom System [m/s]
c_e	Geschwindigkeit, Eintritt ins System [m/s]
g	Gravitation [9.81 m/s ²]
$\dot{m}_a$	Massenstrom, Austritt vom System [kg/s]
$\dot{m}_e$	Massenstrom, Eintritt ins System [kg/s]
$\dot{m}_{j,WT}$	Massenstrom Wärmeträger [kg/s]
$\rho(T)$	Dichte als Temperaturfunktion [kg/s]
ρ_{WT}	Dichte Wärmeträger [kg/m ³]
$\rho_{PCM,Fluid}$	Dichte Phasenwechselmaterial, Fluidphase [kg/m ³]

$\nu(T)$	Kinetische Viskosität als Temperaturfunktion [mm ² /s]
ν	Geschwindigkeit [m/s]

Energie / Arbeit

$C(T)$	Wärmekapazität als Temperaturfunktion [J/kgK]
$C_{p,j}$	Wärmekapazität, Druckspezifisch [J/kgK]
$C_{p,j,WT}$	Wärmekapazität Wärmeträger, Druckspezifisch [J/kgK]
$C_{p,PC,S}$	Wärmekapazität Phasenwechselmaterial, Solidphase [J/kgK]
$C_{p,PC,L}$	Wärmekapazität Phasenwechselmaterial, Liquidphase [J/kgK]
C_{WT}	Wärmekapazität Energieträger [J/kgK]
E_{Sys}	Energie System [J]
H_A	Enthalpie Element / Molekül A [J/mol]
H_{Aktiv}	Enthalpie für Reaktionsaktivierung [W]
H_{AB}	Enthalpie Produkt [J/mol]
H_B	Enthalpie Element / Molekül B [J/mol]
H_{PC}	Phasenwechselenthalpie [J/kg]
h_a	Enthalpie, Austritt vom System [J/kg]
h_e	Enthalpie, Eintritt ins System [J/kg]
Q	Wärme [W]
$\dot{Q}_i$	Wärmefluss [W]
$\dot{Q}_{Latent}$	Latenter Wärmefluss [W]
Q_{Masse}	Kapazität Masse [J]
$Q_{Reibung}$	Reibungsenergie [J]
$Q_{Transport}$	Energietransport [W]
Q_L	Ladungswärme [J]

Q_{SP}	Wärmeenergie Speicher [W]
Q_V	Verlustwärme [J]
S	Entropie [W/K]
S_{Gen}	Entropiegeneration im System [W/K]
$\dot{S}_{m,a}$	Entropieaustrag durch Massenstrom, Austritt vom System [W/K]
$\dot{S}_{m,e}$	Entropieeintrag durch Massenstrom, Eintritt ins System [W/K]
$\dot{S}_{Q,i}$	Entropiefluss durch Wärmefluss [W/K]
$\dot{W}_{t,j}$	Mechanische Arbeit [W]
α_1	Wärmeübergangskoeffizienten Grenzfläche 1 [W/m²K]
α_2	Wärmeübergangskoeffizienten Grenzfläche 2 [W/m²K]
α_3	Wärmeübergangskoeffizienten Grenzfläche 3 [W/m²K]
$\lambda(T)$	Wärmeleitfähigkeit als Temperaturfunktion [W/m]
λ_i	Spezifische Wärmeleitfähigkeit [W/m]
$\lambda_{j,L}$	Spezifische Wärmeleitfähigkeit, Liquidphase [W/m]
$\lambda_{i,S}$	Spezifische Wärmeleitfähigkeit, Solidphase [W/m]
η	Wirkungsgrad [-]

1.2 Abkürzungen

BWW	Brauchwarmwasser
Bzw.	beziehungsweise
CCH	Calcium chloride hexahydrate / Kalziumchlorid Hexahydrat
EFH	Einfamilienhaus
Ent.	Enthalpie
Kin. Vis.	Kinetische Viskosität
Kon.	Konstant
KV	Kontrollvolumen
MFH	Mehrfamilienhaus
MT	Mischterm
MuKEN	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
PCM	Phase change material / Phasenwechselmaterial
PV	Photovoltaik
SAT	Sodium acetate trihydrate / Natriumacetat Trihydrat
SPF	Institut für Solartechnik, Ost-Hochschule, Standort Rapperswil
Wärmekap.	Wärmekapazität
Wärmeleit.	Wärmeleitung
WP	Wärmepumpe
z. B.	Zum Beispiel

1.3 Begriffe und Definitionen

System	Natürliches oder künstliches Gebilde, welches aus verschiedenen Einzelteilen besteht.
Enthalpie	Die Energiesumme im System, welches durch die innere Energie und dem Produkt aus Druck und Volumen entsteht.
Innere Energie	Die gesamte mikroskopische Energie, welche im System vorhanden ist.
Wärme	Die Energie, welche das System durch die Umgebung erhält oder abgibt.
Latent	Vorhandene aber nicht erkennbare Energie im System.
Sensibel	Vorhandene erkennbare Energie im System.
Potenzielle Energie	Energie, die durch Lageunterschied von Objekt zur Bezugsebene entsteht.
Kinetische Energie	Energie, die durch Lageveränderung des Objekts zur Bezugsebene entsteht.
Reversibel	Ein Prozess, der ohne Zusatzenergie zwischen zwei verschiedenen Zuständen bewegen kann.
Irreversibel	Ein Prozess, der nur mit Zusatzenergie zwischen zwei verschiedenen Zuständen bewegen kann. Hat in der Regel eine natürliche Richtung.
Entropie	Thermodynamischer Begriff für Energiezunahme / Abnahme eines Systems, welches einen irreversiblen Prozess durchläuft.
Endotherme Reaktion	Eine Reaktion, die für den Prozess Wärme benötigt.
Exotherme Reaktion	Eine Reaktion, die durch den Prozess Wärme generiert.
Sorption	Prozesse, die zu einer Anreicherung von Stoff innerhalb einer Phase oder an Grenzflächen zwischen zwei Phasen führt.
Phase	Chemische und physikalische Eigenschaften eines Stoffes, die in einem bestimmten Temperaturbereich homogen sind.
Solid	Phase, in der die Atome und Moleküle eine strukturierte Bindung untereinander eingehen.
Fluid	Phase, in der die Atome und Moleküle eine lockere Bindung untereinander eingehen.
WW	Warmwasser

2 Einleitung

Ausgangslage	In den letzten 20 Jahren wurden viele Studien über latent thermische Speicher und Phasenwechsel-Materialien durchgeführt. Diese befassten sich hauptsächlich über die Materialeigenschaften, Speichereigenschaften und Simulationen von PCM. Aufgrund der aufkommenden PCM-Speichersysteme auf dem Markt wird es für verschiedene Programme von Energiesystemen für Gebäude wie z.B. Polysun von Vela Solaris nötig, solche latent thermischen Speicher in den Katalog aufzunehmen.
Herausforderung	Gegenüber dem sensiblen thermischen Speicher besteht der latent thermische Speicher aus zwei verschiedenen Speichermaterialien. Diese müssen korrekt ins System einprogrammiert werden, um das Verhalten des Speichers sauber zu simulieren. Des Weiteren haben einige PCM Eigenschaften, die die Simulation in Polysun nur schwer nachvollziehen kann. Hier muss eine gute Vereinfachung gefunden werden, ohne dass andere Eigenschaften mitbeeinflusst werden.
Ziel	Das Ziel der Studie ist das Erstellen eines latent thermischen Speichers mit PCM-Kapseln im Simulationsprogramm Polysun. Neben dem Speicher sollen auch die mathematische Grundlage und eine Anleitung für den latent thermischen Speicher erstellt werden.
Vorgehen	Zuerst wurde das System latent thermischer Speicher genau analysiert, um die verschiedenen Einflussparameter zu bestimmen. Danach erfolgt eine Parameteranalyse über die in Polysun vorgegebenen Fluideigenschaften, um die Berechnungen der Speichertemperaturen sowie Kapazitäten in Polysun zu verstehen. Der nächste Schritt war das Programmieren von drei verschiedenen PCMs und das Austesten der PCMs durch eine Versuchssimulation. Dann erfolgte das Programmieren eines Versuchsspeichers in Polysun und damit die Möglichkeit, den Speicheraufbau zu validieren. Zum Schluss erfolgte die Simulation von einem Energiesystem eines Einfamilienhauses.
Ergebnisse	Die Simulationen zeigten, dass sowohl PCM wie auch der latent thermische Speicher in Polysun mit den gegebenen Elementen simuliert werden kann. Die Simulierte Kapazität des Versuchsspeichers mit ca. 7.97 kWh entspricht der gemessenen Kapazität von 7.9 kWh bzw. der Temperatur berechneten 8.1 kWh ziemlich genau.
Empfehlungen	<i>Der latent thermische Speicheraufbau soll mit weiteren realen Systemen validiert werden um mögliche Programmierfehler auszuschliessen bzw. die Robustheit des Speichersystems weiter zu prüfen.</i>

3 Ausgangslage

3.1 Thermische Energie

Definition	Die physikalische Beschreibung der thermischen Energie basiert auf makroskopische und mikroskopische Energieformen, die auf die ungerichtete Bewegung von den Atomen eines Stoffes beruht. Diese beinhaltet einerseits Enthalpie, innere Energie und Wärme, andererseits auch die mittlere Energie eines Atoms pro Freiheitsgrad und den Energieaustausch zwischen zwei Atomen ^(I) .
Energiebezug	2019 wurde in der Schweiz ca. 324'960 TJ an thermischer Energie verbraucht. Den grössten Teil nutzten die Haushalte mit ca. 158'140 TJ. Die Industrie verwendete insgesamt 88'150 TJ an thermischer Energie und der Dienstleistungssektor ist mit 73'740 TJ auf einem ähnlichen Niveau. Insgesamt entstammen 70.8 % der verwendeten Energie in der Schweiz von nicht erneuerbaren Quellen ⁽¹⁾ .
Erneuerbare Quellen	Erneuerbare Quellen machten im Jahr 2019 in der Schweiz circa 29.2 % der genutzten thermischen Energie aus. Davon ist der grösste Anteil Holz, Fernwärme und industrielle Abfälle. Der Rest besteht aus Solarthermie, Wind, Biogas und Umweltwärme. Im Vergleich zum Jahr 2000 wuchs der Anteil der thermischen Energie aus erneuerbaren Quellen um 13.4 %. Der Grund liegt darin, dass der Nutzen von bekannten Quellen ausgebaut wurde, andererseits auch vermehrt auf den Energieverbrauch von thermischen Systemen wie Gebäude geachtet wird.

3.1.1 Thermische Speicher in der Gebäudetechnik

Definition	Thermischer Speicher sind thermodynamische Systeme, die Energie in Form von Wärme aufnehmen, für eine bestimmte Zeitspanne speichern und nach Bedarf wieder abgeben. Die gespeicherte Energiemenge im System wird durch die verwendeten Materialien, den Zustand des Materials und des operativen Temperaturbereichs des Systems definiert.
Verwendung	Der Hauptzweck der thermischen Speicherung ist die Entkopplung von Produktion und Verbrauch sowie das Garantieren der Versorgungssicherheit an thermische Energie. Daher werden in vielen thermischen Systemen und Anwendungen, die eine konstante Wärmemenge benötigen, thermische Speicher eingebaut.
Gebäudetechnik	In Gebäuden werden zentrale Heizsysteme, Brauchwarmwasser (BWW) und thermische Energiespeicher ab Mitte des 20. Jahrhunderts als Gebäudestandard eingebaut. Dies war eine Reaktion auf das steigende Bedürfnis der Kunden, zu jeder Tageszeit warmes Wasser zu beziehen ^(II) . Als Hauptquelle wurde vor allem Öl und Gas favorisiert, da diese im Gegenzug zu Kohle sauberer verbrannten und zur damaligen Zeit die wirtschaftlichste und effizienteste thermische Energiequelle waren.

- Ölpreisschock** Mit der Ölpreiskrise im Jahr 1973 und 1979/80 wurde der Politik, Wissenschaft und der allgemeinen Öffentlichkeit bewusst, dass eine Energiepolitik, die nur auf Erdöl basiert, zu starker Abhängigkeit führt ^(III). Um diese Abhängigkeit wieder zu reduzieren, wurde einerseits nach neuen Energiequellen gesucht, andererseits auch der Energieverbrauch von Gebäuden in Frage gestellt.
- Erneuerbare Quellen** Die erneuerbaren Energiequellen kamen damit wieder in den gesellschaftlichen Fokus. Diese waren seit Längerem bekannt, wurden aber aufgrund ihrer geringen Energiedichte gegenüber von Gas und Öl vernachlässigt. Eine weitere Eigenschaft von erneuerbaren Quellen ist, dass diese oft witterungsabhängig und / oder standortabhängig sind.
- Neue Heizsysteme** Das Unternehmen Jenni Energietechnik AG zeigte 1989 an die Fachwelt in der Schweiz, dass ein Wohngebäude übers ganze Jahr durch Solarenergie versorgt werden kann ^(IV). Der Erfolg garantierte dabei ein Speichersystem aus drei verschiedenen thermischen Speichern mit insgesamt 118 m³ Inhalt. Seither gab es diverse Entwicklungen, die einerseits andere Quellen z.B. Geothermie miteinbeziehen, andererseits den Wärmebedarf eines Gebäudes reduzierten. Auch bei den thermischen Speichern werden seither vermehrt Forschungen betrieben.

3.1.2 Energiepolitik in der Schweiz

- Vor 1973** Vor Beginn des 20. Jahrhunderts gab es in der Schweiz keine nennenswerte bundesweite Energiepolitik. Dies änderte sich erst, als die Eisenbahngesellschaften damit begannen, ihre Streckennetze zu elektrifizieren. Hier wurden die ersten Gesetze schon 1902 bzw. 1916 eingeführt. Auf der thermischen Energieseite kamen die ersten Steuerungsvorgänge während dem Ersten und Zweiten Weltkrieg. Denn während der Kriegsjahre führten die Kantone sogenannte Brennstoffämter ein, um die Versorgung der Industrie mit der knappen Importkohle sicherzustellen ^(V).
- Von 1973 bis 1991** Der Ölpreisschock im Jahr 1973 und die veröffentlichte Studie "The Limits to Growth" ein Jahr zuvor führte 1974 zur Gründung eines Komitees, das einen Gesamtenergiekonzept für die Schweiz erarbeiten sollte. In dieser Zeit fokussierte die Regierung vor allem auf den Aufbau von strategischen Reserven. Danach auf die Reduktion des Energieverbrauchs innerhalb des Landes. Bei Gebäuden machte sich diese Entwicklung bemerkbar, indem der Wärmeverbrauch pro m² im Jahr bei Neubauten von ca. 220 kWh/m²a (~1970) auf ca. 120 kWh/m²a (~1990) sank ⁽²⁾. 1991 wurde dann von der Bevölkerung das Energiegesetz angenommen, welches das Komitee ausgearbeitet hat ^(V).
- Ab 1991** Nach 1991 waren die Kantone die treibende Kraft für die Umsetzung des Energiegesetzes, während der Bund sich auf eine Energiestrategie fokussierte. 1992 kamen die ersten Richtlinien zur Energienutzung von Gebäuden. Diese Richtlinien wurden im Jahr 2000 von den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEN) ersetzt. Weiterentwickelte Versionen folgten 2008 und 2015. Der heutige Stand liegt darin, dass MuKEN 2014 in 10 Kantonen umgesetzt wurden, 14 Kantone in der Umsetzungsphase sind und 2 Kantone die Vorlage neu aufarbeiten müssen ^(VI, VII). Die Bevölkerung der beiden Kantone akzeptierte die vom MuKEN abgeleiteten Gesetzesentwürfe nicht ^(VIII).

Auswirkungen	Das Hauptziel der Energiepolitik ist der sparsame Umgang mit Energie. Dies führt dazu, dass energetische Systeme genauer betrachtet und durch verschiedene Grenzwerte eingeschränkt werden. Der thermische Speicher wird vor allem durch folgende Artikel beeinflusst: MuKEN Abschnitt C; Artikel 1.17 und Anhang 4 Der Artikel bestimmt die Dämmstärke von thermischen Systemen, um Energieverluste durch Wärmefluss zu reduzieren. MuKEN Abschnitt F; Artikel 1.29 und Artikel 1.31 Der Artikel bestimmt den Anteil an fossilen und erneuerbaren Quellen für die Energieerzeugung des Gebäudes. Je nach Energieanteil der Quellen wird die Form und Grösse des thermischen Speichers beeinflusst.
---------------------	--

3.2 Physikalische Grundlagen von thermischem Speicher

Physikalische Unterschiede	Bei den thermischen Speichern werden grundsätzlich drei verschiedene physikalische Typen unterschieden: sensibel thermische Speicher, latent thermische Speicher und thermochemische Speicher. Jeder der drei Speichertypen haben eigene Vorteile und Nachteile, können aber grundsätzlich mit zwei verschiedenen Hauptsätzen der Thermodynamik beschrieben werden.
-----------------------------------	--

3.2.1 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Definition	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass die vorhandene Energie in einem abgeschlossenen System konstant bleibt. Ein thermischer Speicher ist nach diesem Hauptsatz ein offenes System, welches allgemein wie folgt beschrieben werden kann: Energieakkumulation = Wärmefluss + Arbeit + Massenzufluss x (Enthalpie + potenzielle Energie + kinetische Energie) + Massenabfluss x (Enthalpie + potenzielle Energie + kinetische Energie).
-------------------	---

Formel 1: Energiebilanz eines offenen Systems

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i + \sum_j \dot{W}_{t,j} + \sum_e \dot{m}_e \times \left(h_e + g \times z_e + \frac{1}{2} c_e^2 \right) + \sum_a \dot{m}_a \times \left(h_a + g \times z_a + \frac{1}{2} c_a^2 \right)$$

Vereinfachungen	Die allgemeine Energiebilanz des offenen Systems kann je nach thermischem System vereinfacht werden. Beim thermischen Speicher können daher folgende Annahmen verwendet werden.
------------------------	--

Arbeit	Ein thermischer Speicher verrichtet keine Arbeit: $\sum_j \dot{W}_{t,j} = 0$ Arbeit führt in der Regel dazu, dass entweder das Volumen, der Druck oder die Geschwindigkeit des Massenstroms innerhalb eines Systems verändert wird. Dabei wird entweder Energie entnommen oder zugefügt. Das ist in einem thermischen Speicher nicht erwünscht.
---------------	--

Kinetische und potenzielle Energie Potenzielle und kinetische Energie ist in einem thermischen Speicher vernachlässigbar klein: $g \times z + \frac{1}{2} c_{e/a}^2 \approx 0$

Die Masse im thermischen Speicher soll die erhaltene Wärmeenergie speichern. Dies kann nur dann funktionieren, wenn die Masse im thermischen Speicher möglichst konstant bleibt. Veränderungen in der potenziellen und kinetischen Energie bedeuten in der Regel auch eine Massenveränderung im System. Das ist in einem thermischen Speicher nicht erwünscht. Daher kann im thermischen Speicher die Massenbilanz wie folgt beschrieben werden:

Masseakkumulation = Zufluss Masse + Abfluss Masse = 0

Formel 2: Massenbilanz thermischer Speicher

$$\frac{dm_{sys}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_a \dot{m}_a = 0$$

Thermodynamische Beschreibung Speicher

Mit den reduzierenden Faktoren und der aufgestellten Massenbilanz reduziert sich die offene Energiebilanz auf diese Form:

Energiegehalt = Wärmefluss + Massenströme $\times$ (Zufluss Enthalpie + Abfluss Enthalpie).

Der Energiegehalt eines thermischen Speichers wird damit durch den Wärmestrom und der Enthalpiedifferenz des Massenstroms bestimmt.

Formel 3: Energiebilanz thermischer Speicher

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i + \sum_e \dot{m}_e \times h_e + \sum_a \dot{m}_a \times h_a$$

Energie im Speicher

Die Energiebilanz im Speicher kann in drei verschiedene Phasen unterschieden werden: Ladevorgang, Speicherphase und Entladevorgang. Sowohl im Lade- wie auch im Entladevorgang ist die Energiebilanz zu- oder abnehmend. Hauptsächlich durch die Zufuhr von Energie durch die existierenden Massenströme. Bei der Speicherphase ist die Energiebilanz abnehmend aufgrund von Wärmeströmen an die Umgebung.

3.2.2 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Definition

Der zweite Hauptsatz sagt aus, ob ein System physikalisch möglich ist und ob das System sich in nur eine Richtung (irreversible) oder in zwei Richtungen (reversible) bewegen kann. Als Mass der Reversibilität wird Entropie verwendet und kann allgemein wie folgt beschrieben werden:

Entropie = Wärmefluss / Absolute Temperatur

Formel 4: Entropiedefinition

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Entropiebilanz

Analog zu der Energiebilanz kann mithilfe der Entropie eine Entropiebilanz erstellt werden. Diese Bilanz beschreibt dann, ob im System eine Entropiezunahme besteht oder nicht:

Entropieakkumulation = Entropie durch Wärmefluss + Entropie durch Massenzufluss + Entropie durch Massenabfluss + Entropiegeneration im System

Formel 5: Entropiebilanz

$$\frac{dS}{dt} = \sum_i \dot{S}_{Q,i} + \sum_e \dot{S}_{m,e} + \sum_a \dot{S}_{m,a} + S_{Gen}$$

Entropie im Speicher

Die Entropiebilanz im thermischen Speicher kann in drei Phasen unterschieden werden. Ladevorgang, Entladevorgang und Speicherphase. Beim Lade- und Entladevorgang wird Entropie einerseits generiert, andererseits durch den Massenstrom zugefügt und abgezogen. Bei der Speicherphase sind keine Massenströme vorhanden. Dadurch wird keine Entropie zugefügt oder abgezogen. Doch interner Wärmeaustausch kann dazu führen, dass weiterhin Entropie generiert wird.

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad des thermischen Speichers wird dadurch bestimmt, wie viel der zum Laden verwendeten Energie wieder zurückgewonnen werden kann. Je näher die Speichertemperatur an der Umgebung ist und je geringer die Wärmeverluste sind, desto höher ist damit der Wirkungsgrad des thermischen Speichers.

Formel 6: Wirkungsgrad thermischer Speicher

$$\eta = \frac{Q_L - Q_V}{Q_L}$$

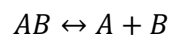
3.3 Stand der Technik

Entwicklungsstand Je nach thermischem Speichertyp sind Anwendungen und Ausführung der Speicher in realen Systemen unterschiedlich. Beim sensiblen thermischen Speicher sind z.B. verschiedene Bauarten, Grösse und Materialien im Einsatz. Demgegenüber werden latente thermische Speicher noch verhalten eingesetzt, haben aber Potenzial in vielen gebäudetechnischen Anwendungen. Bei thermochemischem Speicher gibt es noch wenige Anwendungen. Dies liegt daran, dass thermochemische Speicher noch in der Entwicklung und Forschungsphase liegen ^(3.).

3.3.1 Thermochemischer Speicher

Definition Unter thermochemischem Speicher wird ein thermischer Speicher verstanden, welcher bei Energiezufuhr ein chemisches Produkt (AB) durch eine endotherme Reaktion in zwei Reaktanten (A, B) aufspaltet. Die Energie kann dann zu einem späteren Zeitpunkt durch eine exotherme Reaktion wieder zurückgewonnen werden.

Formel 7: Stöchiometrie chemische Reaktion



Energiebilanz Die Energiebilanz von einem thermochemischen Speicher entspricht der Enthalpie-Zu- und Abnahme der chemischen Reaktion. Diese wird in der Regel wie folgt beschrieben:
Enthalpie Produkt + Wärmefluss = Enthalpie Reaktant A + Enthalpie Reaktant B + Aktivierungsenergie

Formel 8: Energiebilanz chemische Reaktion

$$H_{AB} + Q = H_A + H_B + H_{Aktiv}$$

Vorteile Der Vorteil des thermochemischen Speichers ist die hohe Energiedichte gegenüber von sensiblen und latenten thermischen Speichern. Des Weiteren gibt es durch die chemische Reaktion keine Energieverluste. Damit kann Energie über eine längere Zeitspanne (Monate bis Jahre) gespeichert werden, was die thermochemischen Speicher als geeignete Langzeitspeicher macht.

Nachteile Die Reaktanten des thermochemischen Speichers müssen während des Wärmeaustausches getrennt bzw. zugeführt werden. Die praktische Umsetzung im Speichersystem wird durch den zusätzlichen Massenstrom daher kompliziert. Was das System wirtschaftlich teuer macht ^(3.).

Anwendungen Mit Ausnahme von Sorptionsprozessen gibt es noch keine Anwendungen von thermochemischem Speicher. Der Grund liegt darin, dass einerseits das Speichersystem noch optimiert werden muss, andererseits auch nach weiteren geeigneten Stoffen gesucht wird.

3.3.2 Sensibler thermischer Speicher

Definition Unter sensiblen Wärmespeicher werden thermische Speicher verstanden, die durch eine Energiezufuhr mit einer Temperaturerhöhung des Speichermediums reagieren. Diese Temperaturerhöhung ist einerseits spürbar, andererseits auch mess- und, wenn die Temperaturerhöhung gross genug ist, sichtbar. Physikalisch können sensible Speicher wie folgt beschrieben werden:
Energieakkumulation = Wärmestrom + Massenstrom x Wärmekapazität x Temperaturdifferenz

Formel 9: Energiebilanz sensibler thermischer Speicher

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i + \sum_j \dot{m}_{j,WT} \times c_{p,j} \times (T_1 - T_2)$$

Massenstrom Der Massenstrom eines Speichers kann für mehrere Zwecke verwendet werden. Einerseits definiert der Massenstrom die zugeführte und abgezogene Energie ins Speichersystem, andererseits beschreibt der Massenstrom auch den möglichen Austausch der energetisch unterschiedlichen Speichermasse innerhalb des Speichersystems.

Wärmeströme Der Wärmestrom beschreibt die verschiedenen Verluste des Speichers durch die Temperaturunterschiede zwischen dem Speicher und der Umgebung und die Temperaturunterschiede innerhalb des Speichers. Wieviel Energie im Wärmestrom transportiert wird, liegt einerseits an der Fläche, der Dicke und der Leitfähigkeit des durchströmten Materials, andererseits auch am Temperaturunterschied zwischen dem Speicherinhalt und der Umgebung.

Formel 10: Wärmestrom sensibel

$$\sum_i \dot{Q}_i = \sum_i \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \times A_i \times (T_1 - T_2) dt$$

Vorteile Der Vorteil von sensiblen thermischen Speicher ist ihre einfache Integration in thermischen Systemen und ihre Flexibilität in Bezug auf Speicherkapazität. Wenn z.B. Wasser als Speichermedium eingesetzt wird, ist der sensible thermische Speicher auch wirtschaftlich günstig.

Nachteile Je nach Speichermedium ist der Einsatztemperaturbereich eingeschränkt. Des Weiteren steigt der Wärmeverlust mit der Temperatur. Um den Verlust einzudämmen benötigen sensible thermische Speicher entsprechend gute Dämmstoffe oder haben ein ausgeklügeltes System, um Temperaturschichten zu bilden.

Anwendungen Sensible thermische Speicher werden in sehr vielen Gebieten eingesetzt. Dies fängt bei der Gebäudetechnik an mit BWW-Speicher wie auch als Kältespeicher und endet als Hochtemperaturspeicher bei Hochöfen oder Kraftwerksanlagen. Der Einsatzzweck bestimmt hauptsächlich das Speichermedium, welches genauso vielfältig ist.

Speichermedien Als Speichermedium wird in vielen Anwendungen Wasser verwendet. Der Grund liegt darin, dass Wasser gleichzeitig auch als Wärmeträgermedium genutzt werden kann.

Bei hohen Temperaturen werden vor allem Feststoffe oder flüssige Salze als Speichermedium verwendet. Der Vorteil gegenüber Wasser liegt darin, dass Salze und Feststoffe keine grossen Volumenänderungen haben und damit auch keine hohen Druckveränderungen bei Temperaturänderungen erzeugen, was den Speicher konstruktive kostengünstiger macht. Der Nachteil von diesen Materialien ist, dass diese gegenüber Wasser teurer sind und oft nur als Kurzzeitspeicher verwendet werden können ⁽³⁾.

3.3.3 Latenter thermischer Speicher

Definition Unter latent thermischen Speicher wird ein thermischer Speicher verstanden, bei dem das Speichermedium einen Phasenwechsel vollzieht. Durch den Phasenwechsel wird der grösste Teil der Energiemenge gespeichert, ohne eine Erhöhung der Temperatur im Speichermedium zu erzeugen ^(3, IX). Die Energie ist damit weder mess- noch spürbar. Physikalisch wird der thermische Speicher wie folgt beschrieben:
Energieakkumulation = Wärmestrom + Massenstrom Wärmeträger x Wärmekapazität Wärmeträger x Temperaturdifferenz + Phasenübergangsenthalpie x Phasenwechselmasse + Wärmekapazität Solid x Speichermasse Solid + Wärmekapazität Fluid x Speichermasse Fluid

Formel 11: Energiebilanz latent thermischer Speicher

$$\frac{dE_{\text{Sys}}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i + \sum_j \dot{m}_{j,WT} \times c_{p,j,WT} \times (T_1 - T_3) + m_{PC,S} \times c_{p,PC,S} \times (T_1 - T_2) + H_{PC} \times m_{PCM} + m_{PC,L} \times c_{p,PC,L} \times (T_2 - T_3)$$

Massenstrom Der Massenstrom in einem latenten thermischen Speicher besteht hauptsächlich aus dem Wärmeträger, welcher in den Speicher eintritt und wieder verlässt. Dabei kann der Wärmeträger innerhalb des Speichersystems entweder die Speichermasse umströmen oder durchströmen.

Wärmeströme Die Wärmeströme innerhalb des latenten Speichersystems sind physikalisch gesehen die genau gleichen wie bei einem sensiblen thermischen Speicher. Der Unterschied wird hauptsächlich durch die Zeitperiode sichtbar. Aufgrund der einsetzenden Phasenwechsel bleibt die Temperatur im Speicher für eine gewisse Zeit konstant, bevor sie weiter absinkt.

Formel 12: Wärmestrom Latent

$$\sum_i \dot{Q}_i = \sum_i \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_i}{\lambda_{i,S}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \times A_i \times (T_1 - T_2) dt + \dot{Q}_{\text{Latent}} dt + \sum_j \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_j}{\lambda_{j,L}} + \frac{1}{\alpha_3} \right)^{-1} \times A_j \times (T_2 - T_3) dt$$

Vorteile Der latente thermische Speicher bringt den Vorteil, dass bei der gleichen geringen Temperaturdifferenz und Masse mehr Energie gespeichert werden kann als beim sensiblen thermischen Speicher. Des Weiteren ist diese Energie auch nach einer längeren Speicherperiode wieder abrufbar.

Nachteile	Das thermische System, welches den latent thermischen Speicher nutzt, muss um den Schmelzpunkt des Speichermaterials konfiguriert werden, um effizient zu sein. Des Weiteren muss auf das Lade- und Entladerverhalten geachtet werden, welches sonst zu Instabilitäten des thermischen Systems führt. Die Zykluszeiten des verwendeten Materials wiederum haben einen Einfluss auf die Amortisationszeit des Speichers. Zu kleine Zykluszeiten können z.B. teure Sanierungen auslösen ^(X) .
Anwendungen	Bekannt sind latente thermische Speicher vor allem als Hand- und Taschenwärmekissen. Sie werden aber auch in der Gastronomie als Warmhalteplatten, Wärmespeicher bei Fahrzeugen und für Funktionstextilien verwendet. In der Gebäudetechnik, Bauphysik werden integrierte Speichermedien verwendet, um die passiven Wärmespeicherkapazität zu vergrössern. Der Einsatz als thermischer Speicher ist noch hauptsächlich in der Forschungs- bzw. Umsetzungsphase. Es gibt aber doch Systeme, die auf dem Markt erhältlich sind.
Speichermaterialien	Wie bei dem sensiblen thermischen Speicher beeinflussen die Speichermaterialien den Einsatzbereich des Speichersystems. Die Bandbreite der Materialien ist entsprechend gross. Für Gebäudetechnik werden vor allem Wasser, Salzhydrate, Paraffine, Fettsäuren, Clathrate und Salzlösungen verwendet. Diese haben je nach Zusammensetzung einen Schmelzpunkt zwischen -100 bis 100 °C ^(3,4) .
PCM Lieferanten	Auf dem Markt sind verschiedene Materialien, sowohl homogene Stoffe wie auch Composite zu finden. Das Unternehmen PURETEMP LLC z.B. liefert Composite aus organischen Verbindungen, die durch verschiedene Mischungen eine grosse Bandbreite von PCMs liefern. Die typischen Eigenschaften dieser Composite sind Kapazitäten von 200 kJ pro kg und Phase-Change-Temperaturpunkten zwischen -40 °C und 151 °C mit hohen Zykluszeiten. Des Weiteren ist das Unternehmen stolz darauf, dass die Rohstoffe ihrer PCMs aus natürlichen Stoffquellen und biologisch abbaubar sind ^(XI) . PCM Products Ltd ist ein etabliertes Unternehmen in der PCM-Produktion. Die Produktpaletten reicht von eutektische PCMs, bei welchen die Phase-Change-Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt von Wasser liegen, über organische und Salzhydrate bis hin zu metallischen und Solid-Solid-Phase-Change-Materialien. Ein Verkaufsargument vom Unternehmen ist, dass sie die Wünsche und Bedürfnisse von den Kunden aufnehmen und einen entsprechenden technologischen Aufwand betreiben, um diese Wünsche und Bedürfnisse zu befriedigen ^(XII) .
Systemanbieter	Obwohl noch in einigen Bereichen Forschungen betrieben werden zu latent thermischem Speicher, sind inzwischen einige Speicherarten auf dem Markt. Sie sind aber noch Nischenprodukte. Cowa Thermal Solution ist ein Spinn-Off-Unternehmen von der Hochschule Luzern. Ihr latent thermischer Speicher basiert auf PCM-Kapseln, die innerhalb eines sensiblen Speichers liegen. Cowa Thermal Solution empfiehlt ihre Produkte mit einer Kombination von Wärmepumpe und Photovoltaik (PV) anzuwenden, um damit den Eigenverbrauch von PV-Energie zu erhöhen ^(XIII) . Sunamp Ltd ist ein englisches Unternehmen, welches auf die Produktion von kompaktem PCM-Speicher für Haushalte, Unternehmer, Fahrzeuge und Industrie spezialisiert ist. Ihre Produktpalette in Haushalten und Unternehmen reichen von 3.5 kWh-Speicher, welcher äquivalent zu einem 70 Liter sensiblen Speicher ist, bis zu 14 kWh-Speicher, der einen 280 Liter sensiblen Speicher ersetzen kann. Für höhere Energiebedarfe können die einzelnen Speicher flexibel kombiniert werden ^(XIV) .

3.4 Studien zu latent thermischem Speicher

Bandbreite Zu latent thermischem Speicher sind in den letzten Jahrzehnten hunderte Studien durchgeführt worden ⁽⁵⁾. Die Bandbreite dieser Studien gehen über Charakteristiken von PCMs, Anwendungen in diversen thermischen Systemen bis zu Komposit-Verbindungen im Bereich der Microtechnologie.

3.4.1 Charakteristiken

Hysterese Diverse Materialstudien zeigten auf, dass gewisse PCM zu Unterkühlung neigen. Diese Unterkühlung führt dazu, dass die Erstarrungsmasse zuerst wieder aufgewärmt wird und dabei ein Teil der gespeicherten thermischen Energie aufzehrt, statt diese an den Wärmeträger weiterzugeben. Salzhydrate z.B. haben eine hohe Energiedichte, neigen aber dazu, unter dem Erstarrungspunkt zu kühlen ^(6,7). Forschungen in diesem Bereich haben in der Regel den Zweck, diese Hysterese zu minimieren.

Phasentrennung Ein konstruktives Problem ist die Phasentrennung innerhalb des Speichers. Dies führt oft dazu, dass der latent thermische Speicher ein nicht lineares Lade- und Entladeverhalten hat. Dieses Verhalten kann oft nur dadurch entgegengesteuert werden, dass die Wärmetauscher Oberfläche vergrössert wird. Hier gibt es die Entwicklung, dass die PCM in Kapseln gefüllt werden und diese im eigentlichen Speicher mit dem Wärmeträger umströmt werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Tauschoberfläche vergrössert wird mit einem geringen technischen Aufwand. Der Nachteil liegt darin, dass jede Kapsel einen eigenen Zeitpunkt des Phasenwechsels durchläuft. Es ist damit nicht ganz klar, in welchem Zustand sich der Speicher in einem bestimmten Zeitpunkt befindet ^(8,9).

Kapselformen Die Kapselformen und Grössen wiederum beeinflussen die Gesamtmenge an Masse der PCM innerhalb des Speichers ⁽¹⁰⁾. Wenn PCM-Kapseln in einem bestehenden sensiblen Speicher geschüttet werden, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Kapseln in der optimalsten Packungsdichte geschichtet werden. Dies führt dazu, dass ein grösseres Leervolumen entsteht als wirklich notwendig ist. Zum Beispiel haben sphärische Packungen eine Packungsdichte, die über einem Verhältnis von 60 % des Gesamtvolumens liegen können ^(XV). Werden andere Kapselformen verwendet, die z.B. eher einem Rechteck gleicht, reduziert sich die Packungsdichte aufgrund der verschiedenen Kapseldimensionen gegenüber einer Kugel im Speicher ebenso ^(XVI).

Kapselmaterialien Das Material der Kapseln muss Eigenschaften haben, die den Wärmefluss vom Wärmeträger zum PCM begünstigt. Gleichzeitig muss es entsprechend flexibel sein, um mögliche Volumenänderungen mitzumachen und eventuelle chemische Reaktionen aushalten zu können. Zum Beispiel können gewisse Salzhydrate metallischen Behälter korrodieren und müssen dementsprechend in Kapseln aus Kunststoff gefüllt werden ⁽⁴⁾. Kunststoffe aber haben gegenüber Metallen einen schlechteren Wärmeleitwert und sind teilweise temperaturempfindlich, folgen aber der Volumenänderungen der PCM eher. Dieser Bereich ist momentan einer der Forschungs-Schwerpunkte ^(11,12).

3.4.2 Simulationen

- Numerische Simulation** In diversen Studien werden das Materialverhalten und / oder das Speicherverhalten studiert. Dabei werden auch oft numerische Simulationen durchgeführt und entweder die realen Werte mit der Simulation verglichen ⁽¹³⁾ oder es wird versucht, das reale Verhalten eines PCMs während dem Phasenwechsel zu simulieren ⁽¹⁴⁾. Daraus wird oft die Erkenntnis gezogen, wie der spätere latente Speicher konstruiert werden sollte, um ein optimales Lade-Entladeverhältnis zu bekommen. Numerische Simulationen werden auch durchgeführt, um das Verhalten des PCMs in verschiedenen Kapselformen darzustellen ⁽¹⁵⁾.
- Problematik** Obwohl numerische Simulationen inzwischen gute Resultate liefern, beziehen sie sich aber entweder nur auf einen kleinen Teil des Speichers ⁽¹⁴⁾ oder nur auf eine Kapsel ⁽¹⁵⁾. Was angewendet wird, ist hauptsächlich von der Fragestellung der Studie abhängig. Des Weiteren wird oft nur ein Phasenwechsel simuliert statt der komplette Lade- Entladezyklus. Obwohl dieses Vorgehen für das Verhalten des Speichers sinnvoll ist, stösst es bei Fragenstellungen, welche ein ganzes Energiesystem wie z.B. ein Gebäude betrifft, auf Grenzen. Denn die numerischen Simulationen benötigen für eine Simulation eine hohe Rechenkapazität, welche aus zeitlichen, ressourcentechnischen und Kostengründen nicht praktikabel ist.
- Simulationen von Gebäuden** Für die Simulation von Energiesystemen in Gebäuden gibt es einige Softwares auf dem Markt ⁽¹⁶⁾. Gegenüber von numerischen Simulationen liegt der Fokus aber nicht auf dem thermischen Speicher selber, sondern auf dem Zusammenspielen des thermischen Speichers mit den Energiequellen und den Verbrauchern im System. Obwohl zum Teil Vereinfachungen angenommen werden, sind diese Simulationen genau genug, um in der Praxis als Auslegungstools in z.B. Gebäudesanierungen oder Planung von Energiekonzepten für neue Gebäude verwendet zu werden. In der Regel werden zuerst eine Energiequelle und Verbraucher definiert und diese dann mit einem angepassten thermischen Speicher verbunden. Je nach Software muss entsprechend auch eine Steuerung im Simulationsaufbau ergänzt werden, um praxisnahe Ergebnisse zu liefern. Obwohl in dieser Software viele verschiedene Speicher definiert worden sind, sind latent thermische Speicher aufgrund von ihren speziellen Eigenschaften oft nicht vorhanden ⁽¹⁷⁾.

4 Aufgabenklärung

4.1 Anforderungen / Nutzungsvereinbarung

Polysun	Die Simulationssoftware Polysun für gebäudeintegrierte Energiesysteme wurde 1992 im Institut für Solartechnik (SPF) an der Hochschule für Technik in Rapperswil entwickelt und erfolgreich in diversen Projekten eingesetzt. Seit 2006 wird die Software von Vela Solaris weiterentwickelt und betreut.
Anwendung Speichersysteme	Dabei wurde die Software über die Jahre mit weiteren Anwendungsgebieten wie saisonale Energiespeicher durch Eisspeicher oder Erdsonden erweitert. Die thermischen Speichertypen sollen nun durch latente Speicher, sogenannte PCM-Speicher, ergänzt werden.

4.2 Ziel der Arbeit

Neuer Speichertyp	Ziel der Arbeit ist es ein Prototyp-Modell eines PCM-Speichers zu programmieren und in der Simulationssoftware Polysun anzuwenden.
Literaturrecherche	Die PCM-Speicher arbeiten mit verschiedenen PCMs als thermischer Träger. Die Eigenschaften dieser Materialien muss über eine Literaturrecherche zusammengefasst und dargestellt werden.
Physikalische Beschreibung und Modell	Während dem Laden und Entladen des PCM-Speichers laufen verschiedene physikalische Vorgänge ab. Diese sollten mithilfe der Literaturrecherche aufgezeigt werden und auf Polysun geeignete Form gebracht werden.

4.3 Rahmenbedingungen

Anwendungsgebiet	Die potentiellen Anwendungsgebiete für PCM-Speicher ist in industriellen wie auch gebäudetechnischen Anwendungen gross und übersteigt dadurch die Möglichkeiten dieser Arbeit. Hier wird auf die Verwendung der PCM-Speicher als thermischer Speicher für Heizunterstützung und Brauchwarmwasser in Wohnbauten fokussiert.
Bauform	Bei thermischen sensiblen Speichern gibt es verschiedene Bauarten und Formen. Dies gilt auch für den PCM-Speicher. In dieser Arbeit werden nur PCM-Speicher betrachtet, die PCM gefüllte Kapseln verwenden.

4.4 Nutzung

Erstellung Prototyp für Polysun	Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen lauffähigen Prototyp eines PCM-Speichers für die Simulationssoftware Polysun zu programmieren. Der Prototyp soll neben des realistischen Speicherverhaltens auch verschiedene PCM-Materialien und Kapseldimensionen simulieren und sauber darstellen können.
Integrierbarkeit	Des Weiteren sollte der Prototyp einfach in bestehende Polysun-Vorlagen als Speicher integriert werden können.

5 Vorgehen

5.1 Zusammenfassung

Der latent thermische Speicher ist ein System, in dem mehrere physikalischen Prozesse gleichzeitig ablaufen. Um diese klar aufzuzeigen, wurden die verschiedenen Grenzen innerhalb des Speichers schematisch dargestellt. Danach wurde in Polysun zuerst eine Parameterstudie im internen Fluidkatalog durchgeführt, um herauszufinden, welche Parameter zwingend Angaben benötigen, welche Parameter vereinfacht und welche weggelassen werden können. Der nächste Schritt war es, ein einfaches Versuchssystem in der Simulationsebene zu erstellen, um zu sehen, ob das PCM-Fluid auch in einem Energiesystem funktioniert. Danach erfolgte der Aufbau eines Versuchssystems im Polysun, um das Verhalten des PCM und die Kapazität des Speichersystems zu validieren. Zuletzt wurde dann das Speichersystem in einem Gebäudeenergiesystem integriert, um zu sehen, ob das Speichersystem auch in einem realen Energiesystem funktioniert.

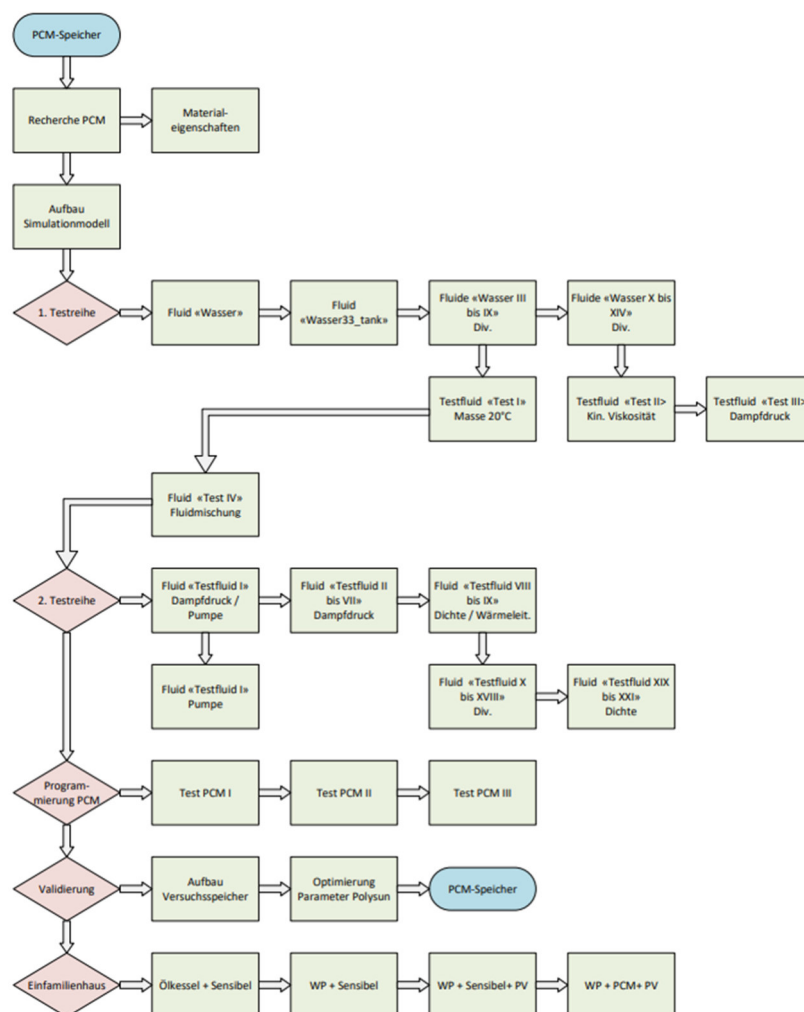


Abbildung 1: Flussdiagramm Vorgehen

5.2 Systemdefinition

Für die Arbeit wurde zuerst analysiert, wie der energetische Fluss eines latent thermischen Speichers mit makroverkapselter PCM aussieht und wie der Speicher in einem Gebäudeenergiesystem integriert werden kann.

5.2.1 Aufbau eines PCM-Speichers

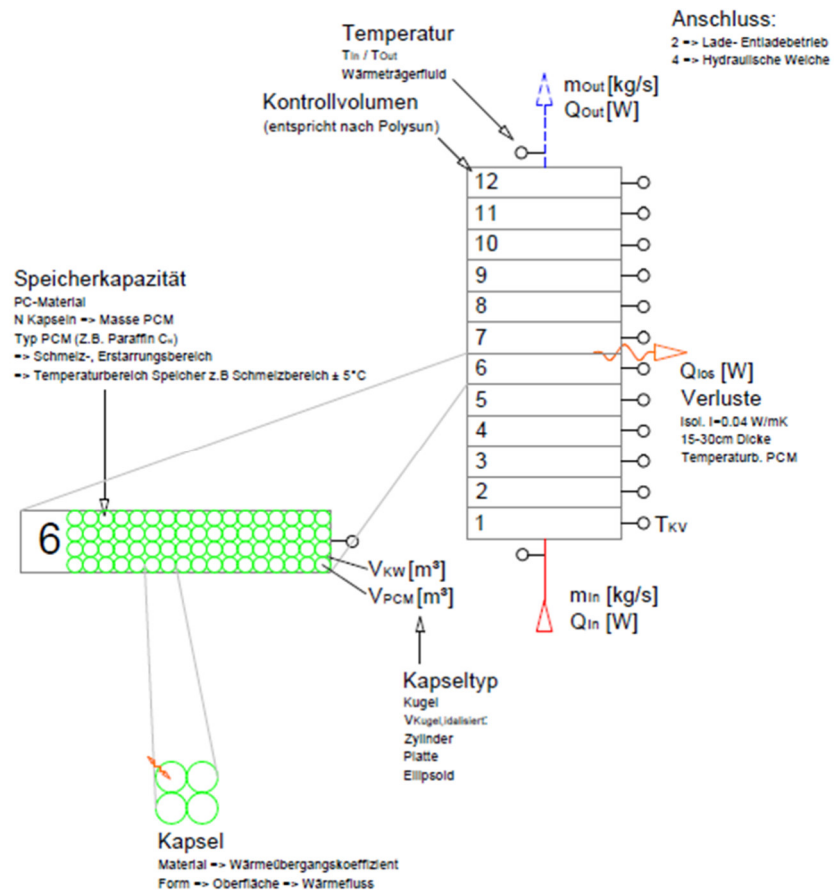


Abbildung 2: Schematische Aufbauanalyse einem latent thermischen Speicher mit Kapseln

Räumliche Eigenschaften

Ein latent thermischer Speicher mit makroverkapseltem PCM besteht aus mehreren Komponenten, die über verschiedenen physikalischen Eigenschaften in Verbindung stehen. Die erste Eigenschaft ist die räumliche Grösse des Speichers. Diese wird durch Bauform (Quader, Sphäre, Zylinder etc.) und die angestrebte Speichermenge bestimmt. Die Speichermenge und Bauform wiederum beeinflussen die Verbindungspunkte der einzelnen Anschlüsse für Rück- und Vorlauf Heizung, BWB und Wärmequelle und damit auch mögliche Strömungen innerhalb des Speichers.

Oberfläche Speicher

Die räumliche Grösse des Speichers und dessen Bauform hat einen grossen Einfluss auf die Oberfläche des Speichers und damit auch auf den Wärmefluss vom / zum Speicher oder der Umgebung. Idealerweise ist die Oberfläche im Verhältnis vom Volumen möglichst klein und wird nur von der Sphäre erreicht ^(xvii). In Gebäudetechnischen Anlagen werden aber meistens Zylinder verwendet, die gegenüber sphärischen

Konstruktionen einfacher herstellbar sind und damit eine vergrösserte Oberfläche besitzen.

- Wärmedämmung** Wie gross der Wärmefluss vom Speicher an die Umgebung ist, wird hauptsächlich durch die Temperaturdifferenz zwischen Speicher und der Umgebung bestimmt. Dieser kann dadurch beeinflusst werden, in dem Materialien verwendet werden, die eine möglichst niedrigen Wärmeleitzahl besitzen. In der Regel ist das Baumaterial vom Speicher ein Metall. Dieses besitzt eine hohe Wärmeleitzahl und muss entsprechend mit einer weiteren Materialschicht, welches eine tiefe Wärmeleitzahl besitzt, umkleidet werden. Die Wanddicke dieser Materialschicht wiederum muss anhand der Maximaltemperatur des Speichers abgeschätzt werden.
- PCM Kapsel** Wieviel PCM-Masse im Speicher gebunkert werden kann, wird einerseits durch die Kapselform beeinflusst, andererseits auch durch die Packungsdichte der Kapseln. Sphärische Kapseln können einen hohen Volumenanteil einnehmen, wenn diese optimal geschichtet wurden. Weicht die Kapselform weg von der Sphäre oder ist die Schichtung nicht optimal, reduziert sich der Volumenanteil an PCM innerhalb des Speichers entsprechend. Diese Volumenreduktion geht in der Regel mit einer Volumenzunahme der sensiblen Masse des Speichers einher.
Die Bauform des Speichers beeinflusst die PCM-Masse dadurch, dass einerseits die maximale Anzahl Kapseln beschränkt wird, andererseits durch zusätzliche Installationen innerhalb des Speichers weitere Volumenanteile weggenommen werden. Dies ist dann der Fall, wenn der Speicher als BWW-Speicher verwendet wird und die Kreisläufe aufgrund vom Lebensmittelgesetz her getrennt werden müssen. Auch hier gilt, dass eine Volumenabnahme beim PCM einer Volumenzunahme der sensiblen Masse einhergeht.
- Kapselmaterial** Die Auswahl des Kapselmaterials beeinflusst, wie schnell das PCM auf Temperaturänderungen auf der Seite der sensiblen Speichermasse reagiert. Idealerweise bestehen die Kapseln aus einem Material, die eine hohe Wärmeleitzahl wie z.B. Metalle haben. Das kann aber dazu führen, dass gewisse PCMs gar nicht mehr verwendet werden können aufgrund von elektro-chemischen Reaktionen.
Kunststoffe wiederum sind für viele PCMs geeignet, haben aber eine geringere Wärmeleitzahl als Metalle. Dies muss entsprechend kompensiert werden, in dem das Volumen der einzelnen Kapseln reduziert wird oder der Kunststoff mit einem Additiv ergänzt wird, welches eine höhere Wärmeleitzahl als der Kunststoff besitzt.
- Phasenwechselmaterialien** Die Auswahl des PCMs wird durch mehrere Faktoren bestimmt. Der wichtigste Faktor ist der Temperaturbereich, bei dem das Material die Phase wechselt. Einerseits bestimmt diese Temperatur den Einsatzbereich des Speichers, andererseits müssen die Temperaturbereiche der Ströme an den Speicher angepasst werden, um mögliche Überhitzung des Speichers bzw. des PCMs zu verhindern.
Der nächste Faktor ist die Wärmekapazität und die Schmelzenthalpie des Materials. Diese bestimmen einerseits den grössten Teil der Kapazität vom Speicher, andererseits die Grösse des Speichers. Je nach verwendeten Materialtyp wie z.B. Paraffine oder Salzhydrate können diese stark unterscheiden.
Ein weiterer Faktor ist die Hysterese des Materials. Je nach Einsatzzweck ist diese erwünscht oder nicht. Salzhydrate z.B. haben gegenüber Paraffinen eine höhere Hysterese, haben aber auch eine höhere Wärmekapazität.

5.2.2 Energiefluss in einem PCM-Speicher

Energetischer Fluss

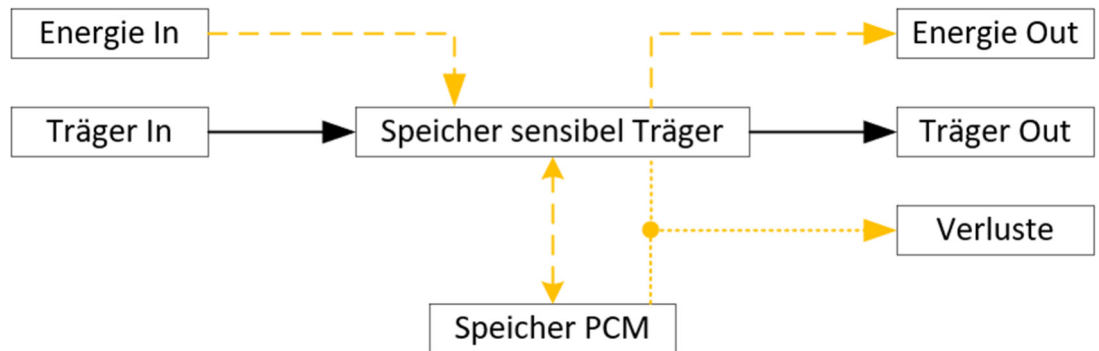


Abbildung 3: Energiefluss latent-thermischer Speicher

Massenfluss

Der Energiefluss beim latent thermischen Speicher wird, wie beim sensiblen thermischen Speicher, hauptsächlich durch die Zufuhr und Abfuhr von der Masse des Energieträgers bestimmt. Dabei wird beim Beladen der energetisch niedrige geladene Teil der Masse aus dem Speicher gestossen, während der energetisch höher geladene Teil der Masse in den Speicher gedrückt wird. Im Fall der Entladung wird der energetisch höher geladene Teil aus dem Speicher gezogen, während der energetisch niedrige Teil in den Speicher gedrückt wird. Damit bleibt die Masse im Speicher gleich, während der Energiegehalt innerhalb des Speichers steigt und sinkt.

Influenz vom PCM

Je nach Bauart des latent thermischen Speichers wird der energetische Fluss in verschiedener Weise beeinflusst. Bei mikroverkapseltem PCM können die Kapseln mit dem Wärmeträger zur Quelle bzw. Senke transportiert werden. Der Phasenwechsel wird damit am Einsatzort eingeleitet. Bei makroverkapselten PCM bleiben die Kapseln im Speicher. Dies führt dazu, dass innerhalb des Speichers zusätzlich einen Energiefluss entsteht mit einer thermischen Wechselbeziehung zwischen PCM und dem Energieträger. Dabei wird durch die Temperaturänderungen des Wärmeträgers bestimmt, ob Wärme zum PCM oder zum Wärmeträger übertragen wird.

Verlustströme

Wie beim sensiblen thermischen Speicher entstehen auch beim latent thermischen Speicher energetische Verlustströme. Dies sind einerseits Wärmeverluste durch den Wärmeträger, andererseits Wärmeflüsse durch das Kapselmateriale an der Speicherhülle. Die Wärmeflüsse entstehen dadurch, dass sich die Kapseln gegenseitig und an der Speicherhülle berühren und damit einen direkten Pfad zur Umgebung des Speichers öffnen. Wie gross diese Flüsse sind, hängt einerseits vom Material der Kapseln wie auch dem Material des Speichers, andererseits auch von der Temperatur und des Dämmmaterials des Speichers ab.

5.2.3 System Gebäude

Schema

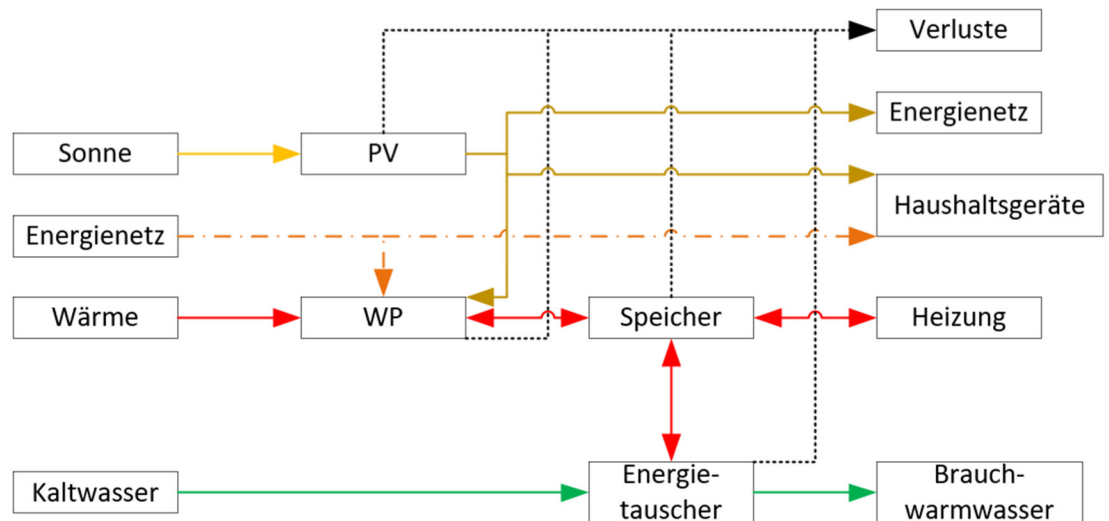


Abbildung 4: Energiefluss der technischen Einrichtungen im System "Gebäude".

Energiequellen

Obwohl innerhalb des Systems "Gebäude" komplexe Energieströme existieren, kann das System mit wenigen Strömen beschrieben werden. Das System "Gebäude" hat maximal zwei bzw. drei Energiequellen: die Sonne, das elektrische Energienetz und die Wärmeerzeugung. Die Sonne bringt einerseits unter dem Tag Licht ins Haus, andererseits auch Wärme. Das elektrische Energienetz wiederum stellt die Energie für alle elektrischen Geräte im Gebäude zur Verfügung. Ein Teil der verwendeten Energie kann aber durch Photovoltaik auch von der Sonne erzeugt werden. Um das System "Gebäude" für die Bewohner behaglich zu machen braucht es auch eine Wärmequelle. Diese kann durch fossilen Energieträger oder durch regenerative Quellen gespeist werden.

Energiesenken

Wie Wärmequellen gibt es im System "Gebäude" verschiedene Energiesenken. Diese sind einerseits die technischen Geräte im Gebäude, welche elektrische Energie benötigen und zum Teil Wärme ans Gebäude abgeben, andererseits die Luftmasse innerhalb des Gebäudes, die vor allem im Winter auf eine Temperatur von 20 bis 22 °C aufgeheizt werden muss, wie auch das BWW, welches täglich im Gebäude verbraucht wird. Schlussendlich sind auch die verschiedenen Wärmeströme, die vom System "Gebäude" an die Umgebung abfließen, die grösste Energiesenke überhaupt.

Umwandlungen

Zwischen den Energiequellen und den Energiesenken im System "Gebäude" liegen diverse verschiedene Übergabestationen und energetische Umwandlungen. Die Sonne z.B. kann genutzt werden um einerseits Wärme aber auch elektrische Energie zu erzeugen. Während die elektrische Energie gespeichert, genutzt oder an ein elektrisches Energienetz abgegeben werden kann, muss die generierte Wärme immer gespeichert werden, da beim Transport oft mit hohen Verlusten gerechnet werden muss. Je nach Temperatur des Wärmeträgers kann es direkt für die Erwärmung des Gebäudes oder von Wasser benutzt werden oder muss mithilfe von elektrischer Energie in eine höhere Temperatur gebracht werden, bevor es dann an die im Gebäude vorhandenen Luft oder Wasser abgegeben werden kann.

5.3 Fluiddefinitionen in Polysun

Polysun ist eine Simulationssoftware, mit der innert kurzer Zeit z.B. ein Heizungssystem für ein Gebäude aufgebaut werden kann, indem die wichtigsten Komponenten zusammengestellt, verbunden und mit diversen Nutzprofilen versehen werden. Zugleich ermöglicht die Software, für ein Projekt mehrere Varianten des Heizungssystems zu erstellen und zu vergleichen. Im Allgemeinen weist die Software die verschiedenen Fluide in den einzelnen Kreisläufen des Heizungssystems selbstständig zu. Wenn aber etwas Spezielles verlangt wird, können mit entsprechendem Wissen andere Fluide definiert und eingesetzt werden.

5.3.1 Einstellung der Fluideigenschaften

Zuweisung Fluide Fluide werden in Polysun einerseits durch Kreisläufe und andererseits durch verwendete Elemente definiert. Normalerweise werden diese Fluide automatisch zugewiesen. Ein Beispiel dafür ist die Solarthermie. Sobald ein Kollektor ausgewählt ist und dieser in den Energiekreislauf eingebunden wird, weist Polysun an diesem Kreislauf das Fluid "Ethanol-Mischung" zu. Dadurch werden die Energieerträge, Temperaturen etc. in dem Kreislauf mit den Werten der Ethanol-Mischung berechnet. Doch diese Fluidzuweisung kann auch durch den Anwender geändert werden. Dafür muss in Menü Ergebnisse bzw. im Menü Kataloge der Fluid-Katalog geöffnet werden.

Einstellbare Parameter Polysun definiert ein Fluid in zwei Stufen: Einerseits als Basisfluid und andererseits als Fluidmischung. Beim Basisfluid gibt es insgesamt zehn Hauptfelder, bei denen der Anwender etwas verändern kann. Ein elftes Feld wird von Polysun automatisch mit einer "Katalognummer" ergänzt zur Identifikation. Die ersten fünf Parameter sind einerseits als Information gedacht, andererseits wird mindestens ein Feld, nämlich atomares Gewicht, dazu gebraucht, um Fluidmischungen anhand von Molekülzahlen zu berechnen. Dies kann im Menü Fluidmischung im Feld "Konzentrationsstyp" angegeben werden.

Parameter	Beschreibung
Name	Name des Fluids
Hersteller	Hersteller des Fluids
Chemische Formel	Chemische Formel des Materials
Atomares Gewicht	Atomares Gewicht des Materialmoleküls
Dichte bei 20°C	Dichte des Fluids bei 20°C
Dichte	Berechnungsparameter für Dichte
Wärmeleitung	Berechnungsparameter für Wärmeleitung
Wärmekapazität	Berechnungsparameter für Wärmekapazität
Kinetische Viskosität	Berechnungsparameter für kinetische Viskosität
Dampfdruck	Berechnungsparameter für den Dampfdruck des Fluids

Tabelle 1: Parameterkategorien für die Definition von Basis-Fluiden

Die letzten fünf Parameter sind bis zu sechs Berechnungsparameter aufgeteilt. Diese Berechnungsparameter bilden zusammen ein Polygon, welches den entsprechenden Parameter des Fluids bei einer bestimmten Temperatur berechnet. Dieses Polygon entspricht etwa der Formel 13, wenn die einzelnen Parameter in Polysun studiert werden. Dabei sind die Faktoren "a" bis "d" die Berechnungsparameter, welche in Polysun eingegeben werden können.

Formel 13: Vermutliche Polynomfunktion für Parameterberechnung in Polysun. $A(T)$ entspricht Parameterkategorie (z.B. Dichte ρ).

$$A(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + fT^5$$

5.3.2 Homogene Fluide und Mischungen

Aufbau von Mischungen Der zweite Schritt in Polysun ist die Beschreibung von homogenen Fluiden oder Mischungen. Der Unterschied liegt darin, ob das Basisfluid zweimal verwendet wird und ob die sogenannten "Mischterm"-Parametern ausgefüllt werden. Um das Verhältnis der Mischung zu bestimmen, kann im Menü Fluidmischung die Einstellungen "Konzentrationstyp" verwendet werden. Die Auswahl ist dabei auf drei Mischungstypen beschränkt: Gewichtsanteil, Volumenanteil und Molenbruch.

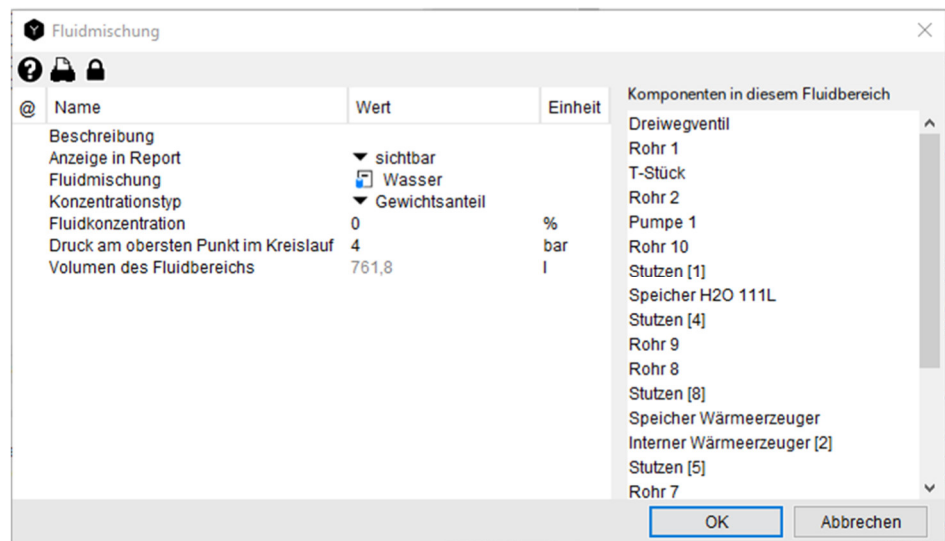


Abbildung 5: Menü Fluidmischung im Polysun

Berechnungsparameter Wie bei der Basisfluid werden Mischungen in 17 Parametern beschrieben. Eine 18tes Feld, "Katalognummer", wird wieder durch Polysun ausgefüllt. Im ersten Feld kann das Fluid beschrieben werden, während im zweiten und dritten Feld die Basisfluid ausgewählt werden können. Wird in beiden Feldern das gleiche Basisfluid ausgewählt, dann entspricht dies einem homogenen Fluid. Wird aber in einem Feld ein anderes Fluid ausgewählt, entsteht eine Mischung, die als Anteile im Fluidmischungs-menü genauer definiert werden müssen.

Parameter	Beschreibung
Name	Name des Fluids / Mischung
Wärmeträger 1	Auswahl Fluid 1
Wärmeträger 2	Auswahl Fluid 2
Schmelzpunkt	Berechnungsparameter Schmelzpunkt Fluid
Ausdehnung	Berechnungsparameter Ausdehnung Fluid
Siedepunkt	Berechnungsparameter Siedepunkt Fluid
Wärmeleit. Mischterm	Berechnungsparameter Wärmeleitung Mischung
Wärmekap. Mischterm	Berechnungsparameter Wärmekapazität Mischung
Kin. Vis.t Mischterm	Berechnungsparameter kinetische Viskosität Mischung
Dampfdruck Mischterm	Berechnungsparameter Dampfdruck Mischung
Dichte Eis	Dicht des Fluids als Solid
Wärmeleitung Eis	Wärmeleitung des Fluids als Solid
Wärmekapazität Eis	Wärmekapazität des Fluids als Solid
Schmelzenthalpie	Energiebedarf für den Phasenwechsel Solid-Fluid
Dampfdichte	Dichte des Fluid als Gas
Dampfwärmekapazität	Wärmekapazität des Fluids als Gas
Verdampfungsenthalpie	Energiebedarf für den Phasenwechsel Fluid-Gas

Tabelle 2: Parameterkategorien für Mischfluide in Polysun

Parameterkategorien Sieben von den 17 Parametern sind, wie im Basisfluid-Menü, Polynome mit insgesamt sechs verschiedene Berechnungsparametern. Diese Berechnungsparameter weisen, wie in der Basisfluid, auf das Polynom der Formel 13 hin und werden damit in Polysun nach Temperatur berechnet. Interessanter sind die letzten sieben Parameter. Vier davon definieren die thermischen Eigenschaften des Fluids, wenn es in die Solid-Phase ist und die anderen drei Parameter die thermischen Eigenschaften des Fluid, wenn es in die Gas-Phase ist.

Problematik Die PCM können durch die von Polysun definierten Parameter relativ gut beschrieben werden, da die benötigten Angaben etwa den Herstellerangaben entsprechen. Andererseits werden sechs Polynome mit insgesamt sechs Berechnungsparameter verwendet, um das Fluid genau nach Temperatur zu beschreiben. Zwar können diese Berechnungsparameter mithilfe von realen Messungen ermittelt werden, dafür muss aber das verwendete Polynom im Polysun genau bekannt sein.

5.3.3 Austestung der einzelnen Parameter

Mangelnde Dokumentation Im Benutzerhandbuch von Polysun werden die einzelnen Einstellungen der Fluid-Kataloge und die von Polysun benutzte Formeln nicht erwähnt. Dies liegt nach Angaben von Vela Solaris daran, dass diese Programmzeilen noch aus der Zeit stammen, als Polysun im Institut für Solarenergie (SPF) in Rapperswil entwickelt und damit nur ungenügend dokumentiert worden sind. Andererseits sind die wichtigsten Fluiden für Polysun auch zu dieser Zeit definiert worden, was dazu führt, dass diese Kataloge in der Industrie nur wenig bis gar nicht gebraucht werden.

Erstellung Versuchsmodell Um ein Gefühl der einzelnen Parameter der Fluidkataloge zu bekommen, wurde zuerst ein einfaches Versuchsmodell im Polysun erstellt. Das Versuchsmodell besteht aus einem Speicher, der einen inneren Wendeltauscher besitzt und mit einem elektrischen Durchlauferhitzer verbunden ist. Der Wendeltauscher ist wiederum mit einem Kaltwasseranschluss und Warmwasserbedarf verbunden. Die meisten Einstellungen sind vom Polysun vorgegeben mit einigen Ausnahmen:

Durchlauferhitzer: 4kW Leistung

Kreislaufpumpe: Volumenstrom nach Kreislaufdruckverlust

Speichergrösse: 120 L

Die Steuerung des Heizkreislaufs entspricht den Standard Bedingungen von Polysun.

Projekt Fluiduntersuchung - Variante Wasser

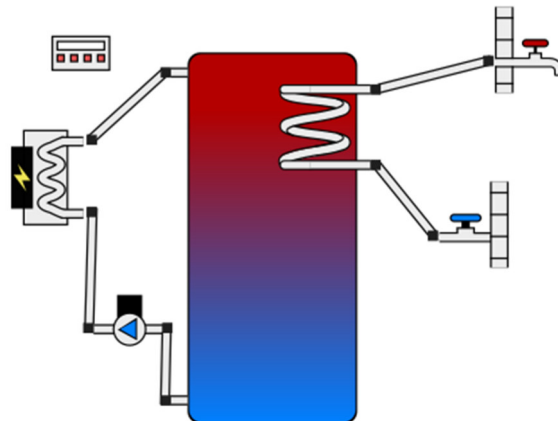


Abbildung 6: Versuchsaufbau für Parameterstudie in Polysun

Erste Testreihe Die erste Testreihe für die Parameterstudie in Polysun basiert auf dem Fluid Wasser. Dabei soll ein "Gefühl" entstehen, wie die Parameter im Fluid-Menü die Ergebnisse der Simulation beeinflussen und was die minimalste Anzahl von Parametern ist, um die Simulation zum Laufen zu bringen. Die Parameter im Menü "Fluidmischung" wurden dabei bewusst noch nicht verändert. Insgesamt gab es 14 Testfluide sowie drei "Spezialfluide" in der Testreihe. Die Benennung der einzelnen Testfluide wurde der Name des Referenz-Fluids genommen und mit einer fortlaufenden (römischen) Nummern versehen. Zwei der 14 Testfluide sind aber im Polysun schon Vorgegeben: "Wasser" welches als Referenz verwendet wird und "Wasser33(_tank)". Alle anderen

entstanden durch das Kopieren des Fluids "Wasser" und der Anpassung von vier der fünf Parametern.

Parameteranpassungen

Die ersten zwei Simulationen wurden mit dem Fluid "Wasser" und "Wasser33_tank" ausgeführt. Das Ergebnis der Testfluide "Wasser" wurde wiederum als Referenz für alle anderen Testfluide verwendet. In den Testfluiden drei bis zwölf wurden alle Berechnungsparameter mit Ausnahme des ersten Berechnungsparameters auf "Null" gesetzt. Bei den Testfluiden drei bis fünf wurde zusätzlich im Parameter "Dichte" die einzelnen Berechnungsparameter nach und nach eingefügt. Bei den Testfluiden sechs bis neun wiederum wurde jeweils ein einzelner Berechnungsparameter innerhalb der einen Parameterkategorie zugefügt. Ab Testfluid zehn wurden jeweils alle Berechnungsparameter innerhalb einer Parameterkategorie eingefügt mit Ausnahme des Parameters "Dampfdruck". Hier wurden auch alle Berechnungsparameter belassen, statt diese auf "Null" zu setzen.

	Wasser	Wasser33	Wasser IV	Wasser IX
Dichte	Alle	1 von 6	4 von 6	1 von 6
Wärmeleit.	Alle	1 von 6	1 von 6	1 von 6
Wärmekap.	Alle	1 von 6	1 von 6	1 von 6
Kin. Vis.	Alle	1 von 6	1 von 6	1 von 6
Dampfdruck	Alle	0 von 6	1 von 6	2 von 6

Tabelle 3: Auswahl von Testfluide "Wasser" und deren veränderte Werte gegenüber dem Referenzfluid "Wasser".

Testreihe "Test"

Bei der Testreihe "Test" wurde bewusst die Simulation ausgetestet, in dem gewisse Parameter in der Testfluide "Ausgeschaltet" wurden. Die Grundlage der vier Testfluide basiert auf dem Testfluid "Wasser IX", in der die minimalsten Angaben der Berechnungsparameter gegeben sind, bei der die Simulation noch läuft. Wie bei der ersten Testreihe wurde den Fluiden der Name "Test" gegeben und mit einer fortlaufenden Nummerierung versehen bei jeder Parameteränderung. Bei den Testfluide I bis II wurde die Berechnungsparameter in der Parameterkategorie "Dichte", "Kinetische Viskosität" auf "Null" gesetzt. Beim Testfluid "Test III" wurde in der Parameterkategorie "Dampfdruck" die Berechnungsparameter von zwei auf eine reduziert. Das Testfluid "Test IV" unterscheidet sich von den anderen Testfluiden dadurch, dass hier wieder auf den Parametern von Fluid "Wasser" zurückgegriffen wurde, dafür aber den Parametern im Menü "Fluidmischung" bei der Simulation miteinbezogen wurde, in den diese Parameter gegenüber "Wasser verändert" wurden. Dies diente als Vorbereitung für die zweite Testreihe.

	Test I	Test II	Test III	Test IV
Dichte	0 von 6	1 von 6	1 von 6	Angabe "Wasser"
Wärmeleitung	1 von 6	1 von 6	1 von 6	Angabe "Wasser"
Wärmekapazität	1 von 6	1 von 6	1 von 6	Angabe "Wasser"
Kin. Vis.	1 von 6	0 von 6	1 von 6	Angabe "Wasser"
Dampfdruck	2 von 6	2 von 6	1 von 6	Angabe "Wasser"
Schmelzpunkt	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	Alle auf 0
Ausdehnung	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	Alle auf 0
Siedepunkt	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung
Mischterm	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	Alle auf 0
Wärmeleitung	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	Alle auf 0
Kapazität	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	Alle auf 0
Viskosität	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	Alle auf 0
Dampfdruck	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	Alle auf 0
Dichte Eis	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	1
Wärmeleitung Eis	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	1
Wärmekapazität Eis	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	1
Schmelzenthalpie	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	1
Dampfdichte	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	1
Dampfkapazität	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	1
Verdampfungsenthalpie	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung	1

Tabelle 4: Angaben der Berechnungsparametereinstellungen der Testreihe "Test". Die ersten fünf Zeilen entsprechen den Parametern im Katalog "Basisfluid", die restlichen Zeilen den Parametern im Katalog "Fluidmischung"

Zweite Testreihe

Die zweite Testreihe basiert auf die gewonnenen Erkenntnisse der ersten Testreihe. Das Ziel war in dieser Testreihe herauszufinden, wie sensitiv die Simulation auf die einzelnen Parameter reagieren. Um die Berechnungen zu vereinfachen wurde dafür alle verwendeten Berechnungsparametern auf Werten von Zehnerpotenzen verändert. Zur Unterscheidung der Fluide wurde hier jedes Fluid als "Testfluid" bezeichnet und mit jeder Änderung der Berechnungsparameter mit einer fortlaufenden Nummer versehen.

	Wasser	Testfluid I	Testfluid X
Molzahl	18	10	10
Dichte 20 °C	998	100	100
Dichte	Alle	100	100
Wärmeleitung	Alle	0.01	1
Wärmekapazität	Alle	1000	2000
Kin. Vis.	Alle	1	1
Dampfdruck	Alle	0.01 / -0.01	0.1
Schmelzpunkt	0	0	-1
Ausdehnung	0	0	0
Siedepunkt	100	100	100
Mischterm (MT)	0	0	0
Wärmeleit. MT	0	0	0
Wärmekap. MT	0	0	0
Kin. Vis. MT	0	0	0
Dampfdruck MT	0	0	0
Dichte Eis	917	1	1
Wärmeleit. Eis	2.2	1	1
Wärmekap. Eis	2100	1	1
Schmelzent.	333800	1	1
Dampfdichte	0.804	1	1
Dampfkapazität	1401	1	1
Verdampfungsent.	2256000	1	1

Tabelle 5: Berechnungsparametereinstellungen der Referenz-Fluide der Testreihe 2 mit Gegenüberstellung der Berechnungsparametereinstellungen von Wasser

Dampfdruckkurve

Bei den ersten sieben Testfluiden wurden hauptsächlich die Berechnungsparameterwerte des Parameters "Dampfdruck" angepasst. Wobei jeweils nur der erste, zweite oder beide Werte der Berechnungsparametern gleichzeitig um eine Zehnerstelle angepasst worden sind. Des Weiteren wurde das Vorzeichen des zweiten Wertes von Minus auf Plus gewechselt sowie ein positiver Wert im zweiten Berechnungsparameter mit einem "Null" Wert im ersten Berechnungsparameter kombiniert. Ab dem achten Testfluid wurden für den Parameter "Dampfdruck" folgende Werte verwendet:
Wert Berechnungsparameter Eins: 0.1
Wert Berechnungsparameter Zwei: -1.

Zusätzlich kam ab der neunten Testfluid eine Wärmekapazität mit einem Berechnungsparameterwert von 2000 dazu. Die Testfluide neun bis 18 wurde je einen Berechnungsparameter um eine Zehnerpotenz verändert. Da bei den vorhergehenden Fluiden keine Veränderung der Simulationswerte wahrnehmbar waren, wurden bei der 19. Testfluid nochmals einen Berechnungsparameterwert der Dampfdruckkurve um ein Zehnerpotenz verändert.

Dichte

Da die Simulationenwerte in der 19. Testreihe wahrnehmbar veränderten, wurde nochmals für die letzten zwei Testfluide die Wärmekapazität von 2000 auf 1000 und auf 100 geändert. Der Parameter "Dichte" wurde darum ausgewählt, weil es einer der einflussreichsten Parameterkategorie für die Simulation ist.

	Wasser	Testfluid XIX	Testfluid XX	Testfluid XXI
Molzahl	18	10	10	10
Dichte 20 °C	998	100	100	100
Dichte	Alle	100	100	100
Wärmeleit.	Alle	1	1	1
Wärmekap.	Alle	2000	1000	100
Kin. Vis.	Alle	1	1	1
Dampfdruck	Alle	0.001 / -1	0.001 / -1	0.001 / -1
Schmelzpunkt	0	0	0	0
Ausdehnung	0	0	0	0
Siedepunkt	100	100	100	100
Mischterm (MT)	0	0	0	0
Wärmeleit. MT	0	0	0	0
Kapazität MT	0	0	0	0
Kin. Vis. MT	0	0	0	0
Dampfdruck MT	0	0	0	0
Dichte Eis	917	1	1	1
Wärmeleit. Eis	2.2	1	1	1
Wärmekap. Eis	2100	1	1	1
Schmelzent.	333800	1	1	1
Dampfdichte	0.804	1	1	1
Dampfkapazität	1401	1	1	1
Verdampfungent.	2256000	1	1	1

Tabelle 6: Werte der Berechnungsparametern der letzten drei Testfluide mit Gegenüberstellung der Werte der Berechnungsparameter von Fluid "Wasser"

5.4 Aufbau eines latent thermischen Speichers

Das Ziel dieser Arbeit war zu Beginn einen latent thermischen Speicher mit Hilfe einer Programmschnittstelle zu programmieren und diesen in Polysun zu integrieren. Im Verlauf der Arbeit wurde aber klar, dass die Schnittstelle nicht rechtzeitig fertig sein wird und eine entsprechende Alternative gesucht werden muss. Die thermischen Speicher in Polysun werden hauptsächlich durch sensible thermische Speicher repräsentiert. Diese Speicherelemente sind wiederum durch Konfigurationen in der Grösse, Anschlüsse, interne Elemente, Materialien und mit angeschlossenem Kreislauf auch das Speichermedium sehr anpassungsfähig. Mit der Erstellung eines neuen Fluids als PCM könnte daher über den vorhandenen Elementen in Polysun ein latent thermischer Speicher zusammengesetzt werden.

5.4.1 Aufteilung des Speichers in sensiblen und latenten Teil

Energiefluss als Grundlage	In Polysun wird thermische Energie von der Energiequelle über verschiedene Fluide bzw. Fluidkreisläufe zu den Energiesenken transportiert. Das bedeutet, dass nicht nur reine Energietransporte innerhalb eines Systems simuliert werden, sondern auch Energietransporte zwischen verschiedenen Systemen. Dies kann auch auf den latent thermischen Speicher angewendet werden. Denn energetisch betrachtet wird die Energie also von einem Fluid an ein anderes Fluid übertragen.
Ein Speicher	Um also einen latent thermischen Speicher zu erstellen genügt es eigentlich, einen Speicher in Polysun zu definieren, dessen Fluid aus einem PCM besteht und verschiedene interne Elemente hat, in denen der sensible Wärmeträger zirkulieren kann. Dies entspricht damit einem latent thermischen Speicher, bei dem z.B. Wasser in Rohren durch den Speicher geführt wird. Gleichzeitig darf nicht erwartet werden, dass der Speicher auch ein asymmetrisches Verhalten zeigt. Der Grund liegt darin, dass Polysun keine internen Ströme innerhalb des Speichers simuliert ⁽¹⁸⁾ , sondern nur Wärmeleitung zwischen den einzelnen Schichten.
Zwei Speicher	Um einen latent thermischen Speicher mit PCM-Kapseln zu simulieren, müssen innerhalb der Simulationsebene in Polysun zwei verschiedenen Speicher erstellt werden, die miteinander verbunden sind. Der eine Speicher wird wie üblich in das zu simulierende energetische System eingebunden, während der zweite Speicher aber nur mit dem ersten Speicher verbunden ist. Damit ist auch die Möglichkeit gegeben, das Fluid im Kreislauf des Speichers auf das definierte PCM zu ändern. Der erste Speicher simuliert damit den sensiblen "flexibleren" Anteil des Speichers, während der zweite Speicher den latenten "starren" Anteil des Speichers repräsentiert.
Verhältnis PCM-Energieträger	Die Aufteilung in zwei Speicher führt auch dazu, dass das Verhältnis zwischen latent und sensibel definiert und, wenn möglich, mit realem System abgeglichen werden muss. Um die Aufteilung abzuschätzen, kann auf zwei verschiedene Möglichkeiten zurückgegriffen werden. 1. Berechnung über Kapazität und Schüttvolumen 2. Literaturwerten
Berechnung	Durch Berechnungen können die Anteile relativ genau bestimmt werden. Die Schwierigkeit liegt aber darin, dass die Anzahl an Kapseln korrekt bestimmt werden kann. Der Grund liegt darin, dass mit der Grösse und Form der Kapseln unterschiedliche

Packungsdichten erreicht werden und diese, solange der Speicher nicht gebaut wird, nur theoretisch abgeschätzt werden können.

Formel 14: Gesamtkapazität Speicher

$$Q_{SP} = m_{WT} \times c_{WT} \times (T_2 - T_1) + H_{PC} \times m_{PCM} + c_{PC,S} \times m_{PCM} \times (T_3 - T_1) + c_{PC,L} \times m_{PCM} \times (T_3 - T_1)$$

Masseberechnung

Die Gesamtmasse von PCM und Wärmeträger wird durch die Speicherdimensionen sowie die Anzahl an Kapseln im Speicher bestimmt. Beim PCM muss aber darauf geachtet werden, dass die Dichte in der Fluidphase genommen wird, da diese in der Regel niedriger ist als in der Solid-Phase und damit auch mehr Raum benötigt.

Formel 15: Masse Wärmeträger

$$m_{WT} = \rho_{WT} \times \left(h \times \frac{d^2 \times \pi}{4} - N \times \frac{4 \times \pi \times d_k^3}{3} \right)$$

Formel 16: Masse PCM

$$m_{PCM} = \rho_{PCM,Fluid} \times N \times \frac{4 \times \pi \times d_k^3}{3}$$

Volumenberechnung

Die Volumenberechnungen in der Formel 15 und 16 entsprechen dem Kugelvolumen bzw. dem Volumen eines Zylinders. Diese Volumenberechnungen können durch entsprechende Volumenberechnungen der Kapselform bzw. Speicherform ersetzt werden. Um die Anzahl an Kapseln zu berechnen, ist ein Umweg über die Kugelform ratsam.

Formel 17: Kugeldurchmesser nach Kapselform

$$d_K = \sqrt[3]{\frac{6 \times X \times Y \times Z}{\pi}}$$

Jede Kapsel stösst entweder mit einer anderen Kapsel oder mit den Aussenwänden des Speichers an. Dabei entstehen Hohlräume, in dem der Wärmeträger zirkuliert. Je nachdem wie die Kapseln geschichtet werden, können mehr oder weniger Kapseln im Speicher verstaut werden und bestimmen damit den Anteil an PCM im Speicher. Um diesen Anteil zu bestimmen wurde über den d_K -Wert das Volumen einer kubischen Elementarzelle berechnet und danach das Gesamtvolumen des Speichers durch das Volumen der Elementarzelle geteilt. Das Ergebnis wiederum wurde auf die nächste volle Zahl gerundet. Obwohl das Verhältnis zu realen Versuchssystemen nahekommt, ist der Nachteil dieser Methode, dass der Speicher eher unterdimensioniert ist. Hier entspricht die Unterdimensionierung dabei, dass die Anzahl Kapseln in der Simulation gegenüber den realen Systemen niedriger ist.

Formel 18: Kapselanzahl

$$N \approx \frac{h \times \frac{d^2 \times \pi}{4}}{d_K^3}$$

Porosität	Ein anderer Weg zur Definition der PCM-Anteile im Speicher ist das Anwenden der Porosität bzw. der Packungsdichte. Die Porosität beschreibt das Verhältnis des Leervolumen zum Gesamtvolumen, während die Packungsdichte das "Feststoffvolumen" zum Gesamtvolumen beschreibt. In beiden Fällen wird dabei ausgegangen, dass der Feststoff eine sphärische Form besitzt und nur einen Teil eines festgelegten Elementarvolumens ausfüllt. Des Weiteren kann der Feststoff in verschiedene Gitterstrukturen geschichtet werden. Mit diesen Annahmen ergibt sich bei der dichtesten Schichtung eine Packungsdichte von ca. 76 % oder 24 % Porosität. Bei einer nicht definierten Packungslage verkleinert sich die Packungsdichte bis zu 40 % oder 60 % Leervolumen. Der Nachteil der Porosität ist, dass nicht bekannt ist, wie die Kapseln im Speicher geschichtet sind. Es muss daher immer von einer Annahme ausgegangen werden und kann zu Über- oder Unterdimensionierung des Speichers kommen.
Literatur	Verschiedene Universitäten und Hochschulen haben Versuchsspeicher aufgebaut und diverse Untersuchungen durchgeführt. Obwohl nur in kleinen Grössen, kann hier auf reale Verhältnisse von PCM zu Wärmeträgern herausgelesen werden. Diese Verhältnisse können auch für grössere Systeme verwendet werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass das simulierte System näher an der Realität und die Speicher nur geringfügig Über- oder Unterdimensioniert sein werden. Mit der zu erwarteten Zunahme an realen Systemen kann davon ausgegangen werden, dass das optimale Verhältnis von PCM und Wärmeträger empirisch festgelegt wird.
Zusätzliches PCM-Volumen	Im Polysun kommt zusätzliches PCM-Volumen aufgrund von Verbindungen, Wärmetauscher sowie Pumpen. Dies liegt daran, dass im Polysun kein System gebildet werden kann, bei dem der Speicher mit einem Fluid gefüllt ist, das nicht zirkuliert. Eine Ausnahme zu diesem System bildet der Eisspeicher und wird mit einem separaten Element repräsentiert.

5.4.2 Einstellung der Kapseloberfläche und Kapselmaterial

Wärmetauscher	Die Aufteilung des latent thermischen Speichers in zwei Unterspeicher führt dazu, dass in einem Speicher ein Energieaustausch stattfinden muss. Dies kann in Polysun durch das Einfügen von internen Wendeln in den sensiblen Speicher simuliert werden. Einerseits können diese Wendel nach den Kapsel Eigenschaften angepasst werden, andererseits werden diese Wendel vom Wärmeträger umströmt, was der Realität entspricht.
Oberfläche	Die Oberfläche der Wendel muss der Oberfläche der Kapseln entsprechen. Dies kann durch Berechnen der Aussenoberfläche einer Kapsel und dem Multiplizieren der Kapselanzahl geschehen.

Formel 19: Wendeloberfläche

$$A_{PCM} = z.B. A_{Kugel} \times N = d_{Kugel}^2 \times \pi \times N$$

Material	Neben der Oberfläche spielt auch das Material der Kapsel eine Rolle. Einerseits muss das Material mit dem PCM kompatibel sein, andererseits muss es eine gute Wärmeleitfähigkeit besitzen und bestimmt damit auch den Wärmefluss zum PCM oder Wärmeträger. Im Polysun kann das Material im Wendel bzw. Rohrkatalog unter der Eigenschaft Material verändert werden.
-----------------	---

5.4.3 Reduktion von Wärmeverlusten

Totales Volumen	Jeder Speicher besitzt vom Polysun aus zwölf verschiedene Kontrollvolumen. Diese sind mit Ausnahme der obersten und untersten Kontrollvolumen, volumenmässig gleichförmig im Speicher verteilt. Beim obersten und untersten Kontrollvolumen werden wiederum die Deckenausbuchtungen volumenmässig dazugezählt. Dadurch entstehen zwölf Schichten, die separat berechnet werden. Weiter müssen verschiedene Volumen von den Verbindungsrohren, Pumpe und internen Wendeln des Wärmeträgerspeichers miteinbezogen werden.
Interne Verluste	Polysun berechnet interne Verluste hauptsächlich durch Wärmeleitung zwischen den einzelnen Schichten. Mögliche interne Konvektionen werden dabei nicht miteingerechnet ⁽¹⁸⁾ .
Externe Verluste	Jeder Speicher und Rohre im Polysun haben eine bestimmte Dämmstärke automatisch eingestellt. Beim PCM-Kreislauf muss diese Dämmstärke verändert werden, da diese Verluste hauptsächlich über den Wärmeträger fließen. Des Weiteren muss bei diesem Kreislauf auch die einzelne Rohrlänge reduziert werden. Dies um zusätzliches Volumen an PCM zu reduzieren, sowie auch die Oberfläche des PCM-Kreislaufes zur Umgebung zu reduzieren.

5.5 Aufbau der Simulation in Polysun

Bevor ein Speicher in einer Gebäudesimulation eingesetzt wird, muss zuerst herausgefunden werden, ob der Speicher funktioniert und auch etwa den realen Systemen entspricht. Dafür wurden zuerst zwei Versuchssimulationen erstellt.

5.5.1 Aufbau PCM-Versuch

Speicher	Um zu testen, ob das PCM-Fluid funktioniert, wurde zuerst ein Speicher definiert, der zwei Wendeln, einen internen Tank mit Wendel und zwei Anschlüsse hat. Das Volumen wurde auf 400 Liter beschränkt. Weitere Anpassungen mit Materialien, Dämmstärke etc. wurden nicht gemacht.
Kreisläufe	Der Versuchsaufbau besitzt insgesamt drei verschiedene Kreisläufe: Der erste Kreislauf entspricht dem Heizkreislauf von der Wärmepumpe zu den zwei Wendeln und zurück. Das verwendete Fluid entspricht dem Fluid "Wasser" und die Nennleistung der Wärmepumpe ist auf 5 kW begrenzt. Der zweite Kreislauf ist der Brauchwarmwasserkreislauf. Der Bezug wurde auf 400 Liter pro Tag mit einem konstanten Verbrauchsprofil angepasst. Der dritte Kreislauf ist ein Zirkulationskreislauf des PCM-Fluids. Der Volumenstrom entspricht dabei etwa 120 l/h. Der Kreislauf ist nötig, da ohne Kreislauf Polysun die Simulation verweigert.
Steuerung	Der Versuchsaufbau hat insgesamt zwei separate Steuerung. Die erste Steuerung steuert die Zirkulationspumpe des PCM-Fluid-Kreislaufes. Realisiert wurde dies mit einer UND-ODER-Verknüpfung, die die Speichertemperatur in der

untersten Schicht misst und bei einer Temperatur von 10 °C einschaltet. Mit dieser Einstellung ist die Zirkulationspumpe in konstantem Betrieb.

Die zweite Steuerung steuert die Wärmepumpe und damit das Laden des Speichers. Die Messpunkte der Steuerung liegen beim Speicher in der elften bzw. zweiten Schicht. Der Ladebetrieb schaltet ein, wenn die Temperatur in der Schicht 11 unter 53 °C fällt. Der Speicher ist dann geladen, wenn die Temperatur in der Schicht 2 über 63 °C steigt. Die An- und Ausschaltemperatur des Heizkreislaufes ist abhängig von dem zu testenden PCM. Angesteuert wird dabei die Wärmepumpe mit integrierter Kreislaufpumpe.

Projekt Test PCM - Variante V3 PCM 26 Salzhydrat 400L

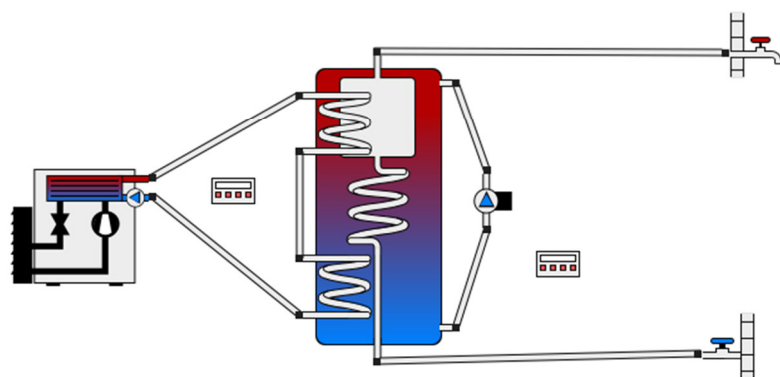


Abbildung 7: Versuchsaufbau für PCM-Test

Verwendete PCM

Für diesen Versuch wurden drei verschiedene PCMs definiert. Zwei PCMs haben einen Schmelzpunkt von 58 °C. Beim dritten PCM liegt der Schmelzpunkt bei 26 °C. Zwei dieser PCMs sind Salzhydrate nämlich Natriumacetat Trihydrat (Sodium acetate trihydrate, SAT) und Kalziumchlorid-Hexahydrat (Calcium chloride hexahydrate, CCH). Das dritte Material besteht aus einem organisch basierendem PCM und ist auf dem Handelsnamen PureTemp bekannt.

	PureTemp58	SAT	CCH
Dichte (Fluid) [kg/m³]	810	1280	1530
Dichte (Solid) [kg/m³]	890	1380	1710
Schmelzpunkt [°C]	~58	~58	~26
Schmelzenthalpie [kJ/kg]	225	210	192
C (Fluid) [kJ/kgK]	2.71	3.1	2.2
C (Solid) [kJ/kgK]	2.47	2.9	1.4
λ (Fluid) [W/mK]	0.15	~0.7 ^(21.)	0.54
λ (Solid) [W/mK]	0.25	~0.4 ^(21.)	1.09

Tabelle 7: In Versuch verwendete PCMs und deren Eigenschaften.

5.5.2 Aufbau Validierungssystem

- Validierungsprojekt** Um den latent thermischen Speicher-Systemaufbau in Polysun zu testen, wurde der Versuchsaufbau im Forschungsbericht "Latentwärmespeicher für die Sonnenenergienutzung: Lade- und Entladevorgänge" von Peter Egolf und Heinrich Manz nachgebaut. Die Wahl fiel auf diesem Bericht, weil einerseits der Versuchsaufbau von der Kapazität her gross genug war, in Polysun darzustellen, andererseits das verwendete PCM auch so beschrieben wurde, dass das PCM in Polysun ohne zusätzliche Quellen beschrieben werden konnte.
- Speichergrösse Versuchsaufbau** Der damalige Versuchsspeicher war ein Speicher mit PCM-Kapseln, welcher einer Dimension von 1.6 m Höhe und 0.35x0.35 m Grundfläche hatte. Darin befanden sich in einem Drahtgeflecht 241 PCM-Kapseln mit einer Gesamtmasse von 74 kg. Der restliche Raum nahm der Wärmeträger (Wasser) mit einer Masse von 111 kg ein. Damit hatte der gesamte Speicher eine Kapazität von ca. 28.6 MJ, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Beladen und Entladen 24 Kelvin betrug.
- Latent Speicher in Polysun** In Polysun übersetzt bedeutet das, dass der Versuchsaufbau einen latenten Speicher von ca. 48 L Inhalt hat und insgesamt zwei Anschlüsse besitzt. Durch diese Anschlüsse ist der latente Speicher mit dem sensiblen Speicher mithilfe zweier Wendel und einer Zirkulationspumpe verbunden. Die Dämmstärke am Speicher ist mit 160 mm doppelt so dick als die Standardeinstellung. Die verwendeten Rohre sind auf 0.1 m gekürzt und haben eine Dämmstärke von 40 mm. Die restlichen Parameter wurden in den Standardeinstellungen belassen mit Ausnahme der Speicherhöhe, die auf 1 m begrenzt wurde.
- Sensibler Speicher in Polysun** Der sensible Speicher wurde so ausgelegt, dass der Speicher ein Volumen von 111 L besitzt. Des Weiteren wurde der Speicher mit drei Anschlüssen (oberste, untersten sowie im zweituntersten Kontrollvolumen / Schicht) und zwei internen Wendel versehen. Die Wendeln sind direkt mit dem latenten Speicher bzw. zueinander verbunden. Des Weiteren wurde die Oberflächen der Wendel auf insgesamt 3.4 m² Oberfläche vergrössert und das Material auf Polyethylen geändert. Mit Ausnahme der Speicherhöhe von 1.6 m wurden sonst keine weiteren Speicherparametern von den Standardwerten verändert.

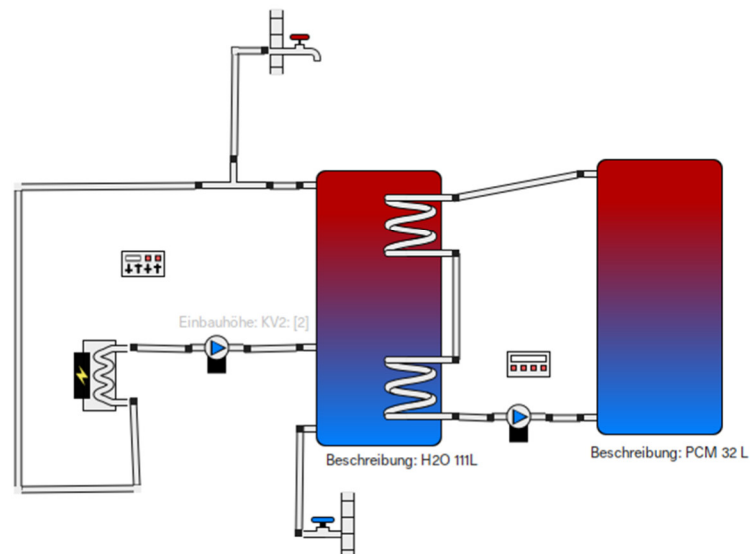


Abbildung 8: Hydraulischer Aufbau des Versuchsspeichers in Polysun. Der Rücklaufanschluss des Heizkreises wird in Polysun grafisch falsch dargestellt. Dieser befindet sich im 2. KV. Volumenangabe PCM: Nur Inhalt des Speicherelement. Zusätzliches Volumen in den Rohren, Wendel und Pumpe.

Quelle und Verbraucher	Im Bericht wurde zwar der Speicheraufbau erklärt aber nicht die hydraulische Anlage zu und weg vom Speicher. Klar ist aber, dass eine Energiequelle und eine Energie-senke gibt. Dies wird im Polysun durch den BWW und Kaltwasser-Anschluss sowie mit einem elektrischen Durchlauferhitzer simuliert. Der Durchlauferhitzer wird mit einem T-Rohrstück mit dem Speicher sowie mit dem BWW-Anschluss verbunden. Der Rücklauf vom Durchlauferhitzer wurde über eine Pumpe mit dem Anschluss auf der Höhe des zweituntersten Kontrollvolumen verbunden. Der unterste Speicheranschluss ist andererseits mit dem Kaltwasser-Anschluss verbunden.
Steuerung	Für den Versuchsaufbau muss für den Durchlauferhitzer, Heizpumpe und Zirkulationspumpe PCM eine Steuerung generiert werden. Des Weiteren muss das Verbraucherprofil des BWW-Anschlusses angepasst werden, damit dieser mit den beschriebenen Versuchen übereinstimmt.
Zirkulationspumpe PCM	Die einfachste Steuerung ist die Steuerung der Zirkulationspumpe. Diese kann im Polysun dadurch erreicht werden, indem die Steuerung "Und/Oder" ausgewählt und mit der Pumpe verbunden wird. Der Sensor für die Temperaturangaben wiederum sollte möglichst in einem Bereich des Speichers platziert werden, wo die Temperatur nicht unter die Einschaltbedingungen fällt. Dies ist nötig, damit keine unrealistisch grossen Temperaturunterschiede bei dem Lade- und Entlade-Betrieb sowie im Speichermodus im sensiblen und latenten Teil des Speichers entstehen können.
Durchlauferhitzer	Die Steuerung des Heizkreises kann eigentlich durch die Steuerung "Heizelement" zustande gebracht werden. Der Nachteil darin ist aber, dass die Steuerung keine zusätzliche Schaltbedingungen als eine Temperatur zulässt. Dies ist aber nötig, damit eine klare Unterscheidung zwischen Entlade- und Lade-Phase entsteht. Ansonsten Schaltet sich der Heizkreislauf ein, sobald die Temperatur beim Sensor unter der Einschaltbedingungen fällt. Daher muss auf eine programmierbare Steuerung

ausgewichen werden. Mit dieser Steuerung kann einerseits die Temperatur als Einschaltbedingung beschrieben werden, andererseits kann eine zusätzliche Bedingung dazu verknüpft werden. In dieser Simulation entspricht die zusätzliche Bedingung dem Volumenstrom im BWW-Anschluss. Dieser muss "Null" entsprechen, damit der Durchlauferhitzer und auch die Heizpumpe eingeschaltet werden können.

BWW-Profil

Im Bericht wurde der Speicher in einem Stück entladen. Bei Polysun wird im BWW-Anschluss ein stündliches Bezugssystem hinterlegt, welches den Tagesverbrauch an Warmwasser simuliert. Dieses Bezugssystem muss daher an den Versuchsaufbau angepasst werden und zwar so, dass ein kontinuierlicher Bezug über mehrere Stunden möglich ist. Der Bezug kann einerseits durch Tagesmenge definiert werden, andererseits auch durch Angabe des prozentualen Bezugs pro Stunde. Des Weiteren muss der Durchfluss so definiert werden, dass des prozentualen Bezugs genau das definierte Volumen pro Stunde übereinstimmt. Ansonsten können kurzzeitige Unterbrechungen des Bezugs erfolgen. Es wurden folgende Werte verwendet:

Nomineller Durchsatz: 250 l/h

Bezug pro Tag: 2500 l/Tag

Bezugsprofil: Zwei Entleerungsphasen mit 10 % Volumenbezug ab der 6. bis 10. Stunde sowie ab der 18. bis 22. Stunde.

5.5.3 Simulation Einfamilienhaus

- Gebäude** Die Bauart und Grösse eines Gebäudes bestimmen den Verbrauch an thermischer Energie für die Erwärmung der Luftmasse innerhalb des Gebäudes. Für die eine Simulation wurde daher ein Einfamilienhaus angenommen, das eine Wohnfläche von 150 m², eine Gebäudelänge / Breite von 15x10 m und eine Raumhöhe von 3 m hat. Die Soll-Temperatur in den Räumen ist bei Tag 20 °C und bei Nacht 18°C. Der durchschnittliche U-Wert des Gebäudes entspricht etwa 0.35 W/m²K und liegt damit im Bereich eines Niedrigenergiegebäude. Das Gebäude ist nach Süden ausgerichtet und wird im Sommer abgeschattet. Es gibt keine längeren Abwesenheiten der Bewohner.
- Heizelemente** Das Gebäude wird über eine Fussbodenheizung beheizt. Die Temperaturspreizung beträgt 5 Kelvin mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C. Die Leistung pro Element beträgt bei Normbestimmungen 1000 W/m² und besitzt eine durchschnittliche Fläche von 11 m². Die Anzahl Elemente wird durch Polysun berechnet.
- Brauchwarmwasser** Das Verbraucherprofil von Brauchwarmwasser entspricht einem typischen Haushalt mit ca. 50 l/Person/d. Die Durchschnittstemperatur des BWW liegt dabei um die 50 °C. Das Verbraucherprofil ist so weit ausgelegt, dass der höchste Verbrauch zwischen 8 bis 10 Uhr, 13 bis 15 Uhr und 18 bis 20 Uhr entsteht. Es bewohnen insgesamt vier Personen das Gebäude.
- Wärmequelle** Als Wärmequelle für Heizung und Brauchwarmwasser wurde zuerst ein Gaskessel verwendet, welcher eine Leistung von 10 kW und einen Wirkungsgrad von 0.9 besitzt. Dieser wird im Verlauf des Systemvergleiches mit einer Luft/Wasser Wärmepumpe ersetzt. Dieser besitzt eine gleichwertige Leistung von 10.1 kW mit einer Elektrizitätsbedarf von ca. 3.3 kW. Als Wärmequelle wird Aussenluft verwendet.

Projekt Einfamilienhaus PCM - Variante Ölkessel+Sensibel

POLYSUN®

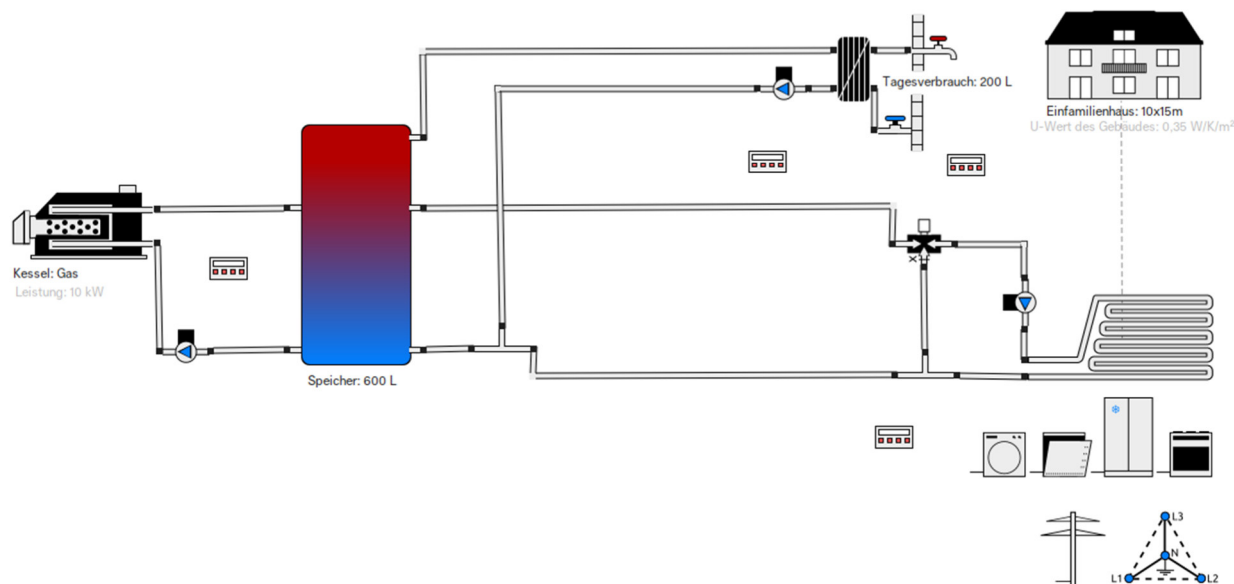


Abbildung 9: Hydraulischer Aufbau des Einfamilienhauses mit Gaskessel als Wärmequelle und sensibler thermischer Speicher.

Steuerung

Es sind vier bzw. fünf Steuerelemente vorhanden:

1. Heiz/Kühlsteuerung des Gebäudes. Standardaufbau nach Polysun.
2. Steuerung Mischventil für Heizungselement. Standardaufbau nach Polysun
3. Steuerung drehzahlgesteuerte Pumpe für den externen Wärmetauscher für BWW. Standardaufbau nach Polysun.
4. Wärmeerzeugersteuerung für Gaskessel bzw. Wärmepumpe. Einschalt bzw. Ausschaltensor bei der 10. und 9. Speicherschicht. Bei der Variante mit dem latent thermischen Speichersystems liegen die Sensoren auf der 10. und 3. Speicherschicht des Wärmeträgerspeichers.
5. Zirkulationssteuerung für den PCM-Kreislauf des latent thermischen Speichersystem. Position des Sensors im PCM-Speicher auf höhe 11. Schicht.

Erweiterung elektrische Verbraucher

Neben der Wärmepumpe gibt es weitere elektrische Verbraucher im Gebäude. Auch diese werden, um den Eigenverbrauch zu erhöhen, mit dem Strom einer Photovoltaik betrieben. Das Verbraucherprofil der elektrischen Verbraucher im Gebäude entspricht dem Standardprofil eines Haushaltes von 3'500 kWh.

Erweiterung Photovoltaik

Die Photovoltaik-Anlage besteht aus 40 polykristallinen Modulen mit einer Nennleistung von 180 W. Gesamtnennleistung ist 7.2 kW bei einer Fläche von 56 m². Der Anstellwinkel der Module beträgt 45° mit Ausrichtung nach Süden. Die Anlage besitzt zwei Wechselrichter, die durch zwei Stränge mit 20 Photovoltaikmodulen verbunden sind.

Projekt Einfamilienhaus PCM - Variante WP+Latent+PV 53

POLYSUN®

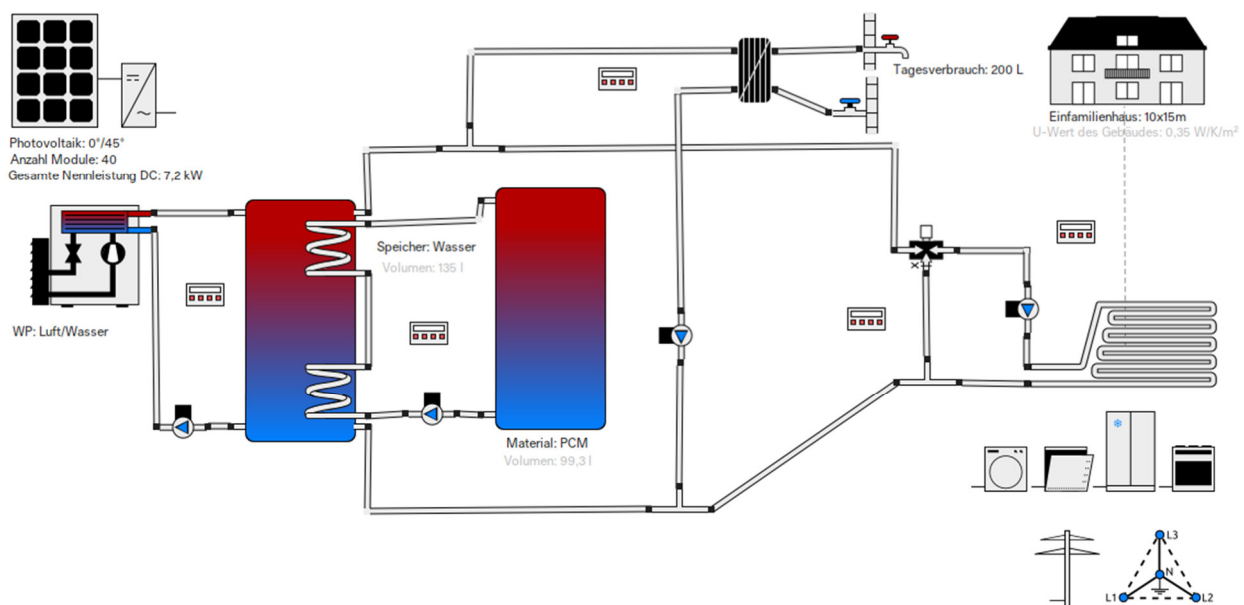


Abbildung 10: Hydraulischer Aufbau des Einfamilienhauses mit WP, Photovoltaik und latent thermischer Speicher.

6 Ergebnisse

6.1 Parameterstudie Fluiddefinition

6.1.1 Erste Testreihe

	Wasser	Wasser33	Wasser IV	Wasser IX
Simulation	Ja	Abbruch Pro- gramm	Fehlermeldung 4001/0	Ja
E_{Wärmeerzeuger}	4320			4337
E_{Nutz}	3455			3471
E_{Defizit}	108			100
Stromver- brauch	4629			4647

Tabelle 8: Auszug von Ergebnissen aus der Testreihe 1 durch Anpassungen innerhalb des Parameters "Dampfdruck". Fluid "Wasser" als Referenz. Werte in kWh.

Sensibilität

In der ersten Testreihe zeigte sich, dass die Simulation sehr empfindlich auf die Berechnungsparameter der Parameterkategorie "Dampfdruck" reagiert. Die ersten Testfluide, Wasser33 bis Wasser VIII, reagierten zumindest bei jeder Berechnungsparameteränderung mit einer Fehlermeldung bzw. das Programm Polysun fror sich fest (Wasser33) und musste dadurch neu gestartet werden. Erst mit der Ergänzung eines zweiten bzw. dritten Berechnungsparameters wurde die Simulation vollständig durchgerechnet. Es zeigten sich aber keine nennenswerte Veränderung zu den originalen Werten bzw. sichtbare Veränderung der Simulationswerten können durch andere Parameterkategorien plausibler erklärt werden.

	Ref.	Dichte	Wärme- leit.	Kapazität	Viskosi- tät	Dampfdr.
Simulation	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
E_{Wärmeerzeuger}	4337	4341	4336	4326	4307	-
E_{Nutz}	3471	3476	3470	3460	3442	-
E_{Defizit}	100	96.2	101	106	114	-
Stromver- brauch	4647	4651	4645	4635	4616	-

Tabelle 9: Auswahl an Ergebnisse von Testreihe 1 mit Veränderten Parameter zur Referenzreihe. Werte in kWh.

Ergebnisse

Die nachfolgenden Testfluide zeigten, dass die Parameter unterschiedlichen Einfluss haben zu den Ergebniswerten. Zum Beispiel hat die Änderung im Parameter "Viskosität" einen höheren Einfluss auf die Ergebniswerte als die Änderungen in dem Parameter "Kapazität" oder "Dichte". Die Ergebniswerte wurden aber zur Referenz eher reduziert als erhöht. Die Änderungen der Parameter "Dichte" wiederum zeigen einen Einfluss, der die Ergebniswerte eher erhöht als reduziert. Anhand dieser Werte können folgende Berechnungswege vermutet werden:

Formel 20: Reibungswärme

$$Q_{\text{Reibung}} = \rho(T) \times v(T) \times \frac{A_R}{d_R} \times v^2$$

Formel 21: Kapazität

$$Q_{\text{Masse}} = \rho(T) \times V \times C(T) \times (T_2 - T_1)$$

Formel 22: Wärmetransport

$$Q_{\text{Transport}} = \frac{\lambda(T) \times A \times t \times (T_2 - T_1)}{l}$$

Berechnungsparameter Des Weiteren weist die Aufteilung der Parameter in bis zu sechs Berechnungsparameter darauf hin, dass die Berechnung der Parameter durch eine Polynomfunktion besteht. Diese entspricht in etwa der Form der Formel 23 und ist für die Berechnung des Parameters "Dichte" relativ genau. Wie weit die Polynomfunktion auch in den anderen Parametern entspricht ist durch die Testreihe nicht klar geworden.

Formel 23: Polynomfunktion

$$A(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + fT^5$$

Literaturwerte Bei dem Parameter "Dichte" wurde die Polynomfunktion getestet und die Ergebnisse mit Literaturwerten verglichen. Dabei zeigte sich, dass Polysun bei der Dichteangaben leicht von der Literaturwerten abweichen:

Temperatur	Polysun	Kuchlin	Internetchemie	Wissenschaft-technik-ethik
0 °C	999.539	999.84	999.843	999.84
20 °C	998	998.206	998.207	998.2

Tabelle 10: Vergleich der Dichtewerte von Polysun mit Literaturwerten. Werte in kg/m³.

Dies führt auch dazu, dass in der Polynomfunktion die berechneten Werte von der Literaturwerten abweichen. Einerseits ist die Abweichung in den unteren Temperaturbereichen eher geringfügig, andererseits sind die Abweichungen bei den hohen Temperaturen signifikant. Hier muss die Frage gestellt werden, ob die Polynomfunktion wirklich mit der Polysun-Berechnung übereinstimmt. Dafür müssten aber die betreffenden Programmierzeilen angesehen werden, da nur über die Simulation geringfügige Hinweise geben werden können.

T [°C]	Polynom	Virialgleichung	Kuchlin
0	999.539	999.840	999.840
10	999.636	999.700	999.700
20	998.374	998.204	998.206
30	995.983	995.646	995.650
40	992.641	992.213	992.220
50	988.482	988.031	988.040
60	983.589	983.192	983.200
70	977.997	977.760	977.760
80	971.696	971.786	971.790
90	964.624	965.306	965.300
100	956.675	958.346	958.350

Tabelle 11: Vergleich der Berechnung der Dichte mit Literaturwerten. Werte in kg/m³

6.1.2 Zweite Testreihe

Must Have-Werte

Bei der zweiten Testreihe zeigte sich, dass einige Berechnungsparameter Grenzwerte besitzen, die nicht überschritten bzw. unterschritten werden dürfen. Dies kann als Indiz angesehen werden, dass diese Parameter für eine Berechnung verwendet werden und der Wert nicht höher oder tiefer als der in der Tabelle 12 stehende Grenzwert fallen darf. Zum Beispiel wird die scheinbare Molzahl benötigt, um Mischverhältnisse zu definieren. Zumindest gibt es dafür im Polysun eine eigene Einstellung. Auch beim Parameter "Dichte bei 20 °C" gibt es einen Grenzwert und wird möglicherweise als Referenzwert für die Dichteberechnung miteinbezogen. Zumindest zeigte das Testfluid "Test I", dass die Simulation läuft, wenn beim Parameter "Dichte 20 °C" ein Wert steht und beim Parameter "Dichte" alle Werte gleich "Null" sind.

Parameter	Wert
Scheinbare Molzahl	min. 1
Dichte 20 °C	min. 1
Dichte	Keine
Wärmeleitfähigkeit	min. 0.01
Wärmekapazität	min. 100
Kin. Viskosität	Keine
Dampfdruck	max. 0.1

Tabelle 12: Angabe von Sollwerten des Basisfluid-Parametern

Dampfdruck

Beim Parameter "Dampfdruck" zeigt sich aber, dass ein Berechnungsparameter einen maximale Wertgrösse hat. Andererseits darf der Wert auch nicht "Null" sein, denn sonst friert das Programm ein und darf neu gestartet werden. Insgesamt zeigt sich auch bei dieser Testreihe, dass der Parameter "Dampfdruck" sehr sensibel auf Veränderungen der Berechnungsparameter reagiert. Sind die einzelnen Werte zu hoch, zu weit auseinander oder haben das falsche Vorzeichen kann es dazu kommen, dass

entweder eine Fehlermeldung generiert wird, die Simulation läuft aber die Temperatur im Speicher sowie im BWW konstant verhält oder das Programm wieder einfriert.

	Testfluid I	Testfluid III	Testfluid X	Testfluid XIX	Testfluid XX	Testfluid XXI
Änderung	Reverenz	Dampfdruck	Kapazität	Kapazität	Kapazität	Kapazität
		I<III	I<X	I<XIX	I=XX	I>XXI
		-	Wärmeleitung	Dampfdruck	Dampfdruck	Dampfdruck
		-	I<X	I>XIX	I>XX	I>XXI
Simulation	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Q_{Entnahme}	88786	-	83158	-2915	-2013.9	-544594.7
E_{Wärmeerzeuger}	33298	-	33287	3584	2665	-1252.4
E_{Nutz}	0	-	0	2885	1996	0
E_{Gesamt}	3395	-	3395	3395	3395	3395
Q_{Abwärme}	16.9	-	15.6	-0.1	0.4	-137.2
Q_{Verluste}	0	-	0	963	920	0
E_{Wärmeerzeuger}	35040	-	35040	3843	2910	-
E_{Pumpe}	52.6	-	52.6	5.8	5.7	-
E_{Verbrauch}	35092	-	35092	3849	2916	-
T_{Speicher}	2°C Kon.	-	11°C Kon.	Fluktuierend	Fluktuierend	1015°C Kon.
T_{BWW}	144°C Kon.	-	144°C Kon.	Fluktuierend	Fluktuierend	144°C Kon.

Tabelle 13: Auswahl an Ergebnisse der Testreihe 2 und Angabe der veränderten Parameter gegenüber der Reverenz-Fluid. E und Q-Werte in kWh.

Simulationsgrenze Im Gegensatz zu der ersten Testreihe brachte die zweite Testreihe die Software an ihre Simulationsgrenzen. Obwohl die Simulation an sich lief, zeigten viele Testfluide nur die gleichen Ergebnisse trotz Veränderungen an den verschiedenen Parametern. Erst mit einer weiteren Anpassung des Parameters "Dampfdruck" unterschieden sich die Resultate der darauffolgenden Testfluide.

Mangelhafte Ergebnisse Obwohl auch die Parameter der Fluidmischung in dieser Testreihe miteinbezogen wurden, sind die Ergebnisse der Reihe nur mangelhaft brauchbar. Einerseits weil viele Testfluide ein gleiches Simulationsergebnis geliefert haben, andererseits auch weil die Berechnungsparameter der Parameterkategorie "Dampfdruck" mit zu hohen Eigenwerten variierende Ergebnisse blockiert haben.

6.3 PCM-Fluide

6.3.1 Verhalten von Wasser in der Simulation

Speicherschichten Polysun simuliert den Speicher in 12 Schichten. Dadurch ist es möglich, einerseits Speicher mit verschiedenen Temperaturschichten zu simulieren, andererseits auch internen Energieaustausch ohne Konvektion zu simulieren.

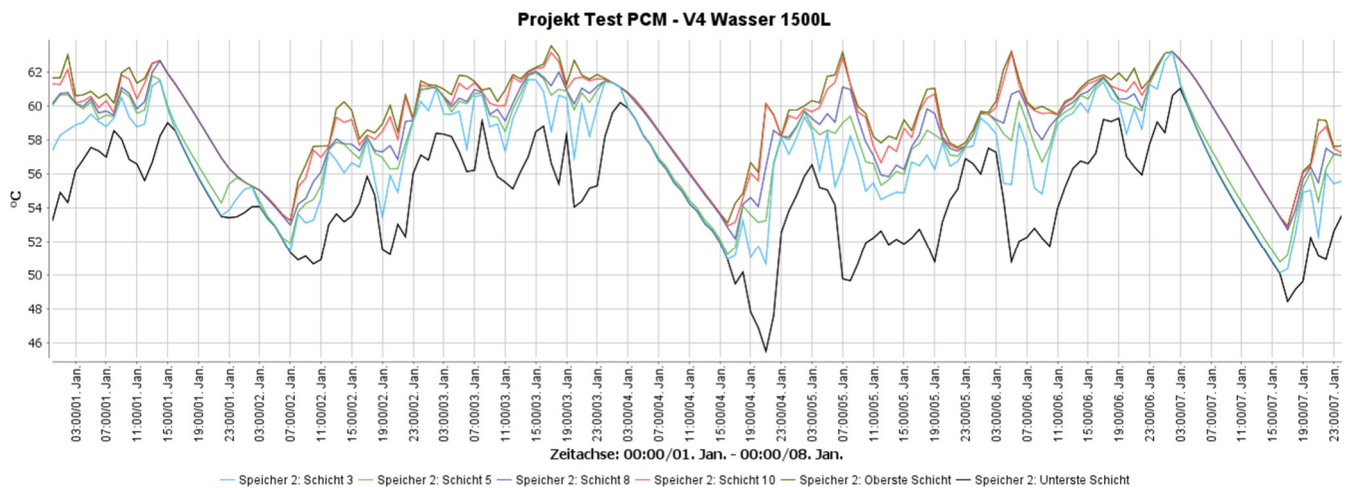


Abbildung 11: Temperaturverlauf Wasser von einer Woche.

Temperaturunterschiede Die Abbildung 11 zeigt den Temperaturverlauf von sechs Schichten eines in Polysun simulierten 1'500 Liter sensiblen thermischen Speichers in einem Zeitraum von einer Woche. Sie zeigt, dass für zwischen jede Schicht oft ein Temperaturunterschied vorhanden sind. Diese Temperaturunterschiede sind in der Ladephase besonders ausgeprägt und gleichen sich in der Entladephase an.

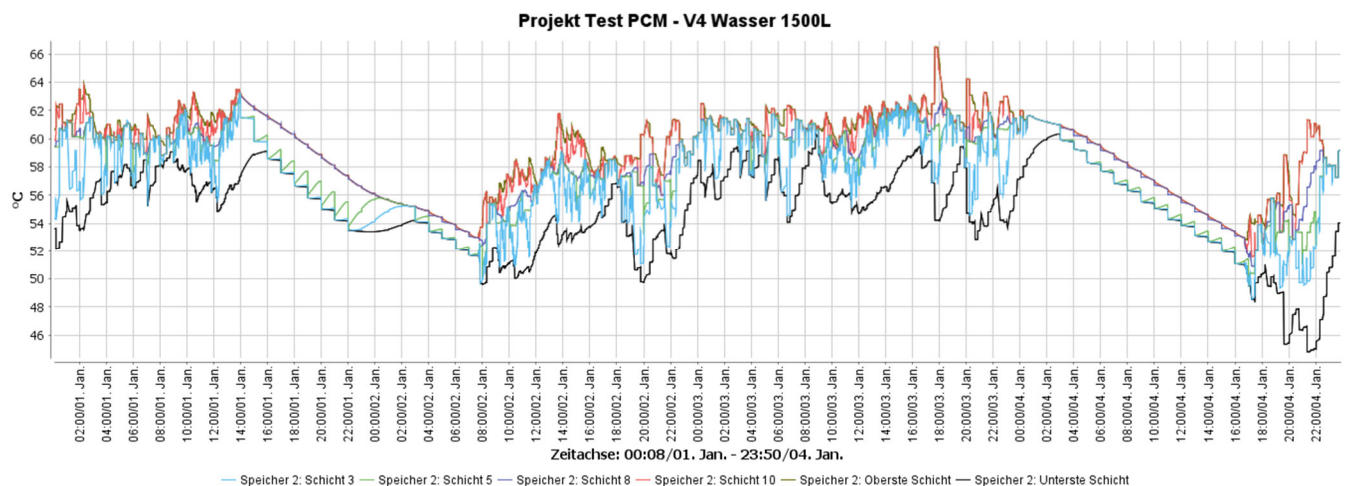


Abbildung 12: Detaillierter Temperaturverlauf Wasser über vier Tage.

Störeinflüsse Wird der Temperaturverlauf über vier Tage betrachtet wie in der Abbildung 12 können die Kurven detaillierter dargestellt werden. Hier zeigen sich z.B. die Einflüsse durch den BWW-Bezug. In der Lade-Periode führt der BWW-Bezug dazu, dass alle

Schichten mehr oder weniger gestört werden. Dies passiert in der Simulation durch zwei verschiedene Ströme. Erstens wird in den oberen Schichten warmes Wasser entzogen, während gleichzeitig in den unteren Schichten kaltes Wasser dazukommt. Zweitens drückt die Heizungspumpe dieses kalte Wasser in den Kessel, mit dem Resultat, dass in den oberen Schichten wiederum mit kälterem Warmwasser gespeist wird.

Ladedauer

Der Speicher ist mit 1'500 Liter Inhalt für diese Simulation eigentlich zu gross, entspricht aber der Kapazität mit dem kleineren PCM-Speicher. Dies führt dazu, dass der Speicher eine lange Ladeperiode hat, die durch den BWB-Bezug noch verlängert wird.

6.3.2 Verhalten von PCM in der Simulation

Sensibilität

Ein latent thermischer Speicher zeigt gegenüber einem sensiblen thermischen Speicher ein anderes Verhalten. Der Speicher ist während der Phasenwechselphase weniger sensibel auf kurzfristige Veränderungen in der Wärmeträgertemperatur, kann aber, wenn die Temperatur des Wärmeträgers zu stark verändert, unterbrochen werden.

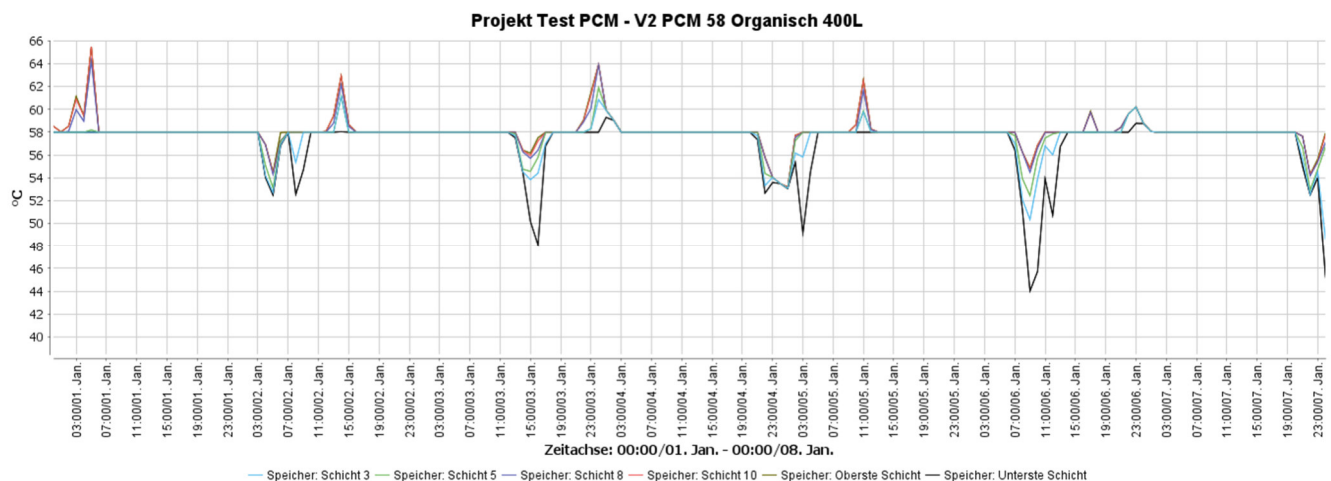


Abbildung 13: Temperaturverlauf Lade-Entlade-Zyklus vom PCM: PURETEMP58

Lineares Verhalten

Das programmierten PCM in Polysun zeigt ein klares gegenteiliges Verhalten gegenüber vom Wasser auf. Erstens zeigt die Temperaturkurve in der Abbildung 13 ein hauptsächlich lineares Verhalten an, aufgrund des durchlaufenden Phasenwechsels. Zweitens sind die Spitzen und Vertiefungen dort, wo das Material klar in der Fluid- bzw. Solid-Phase befindet.

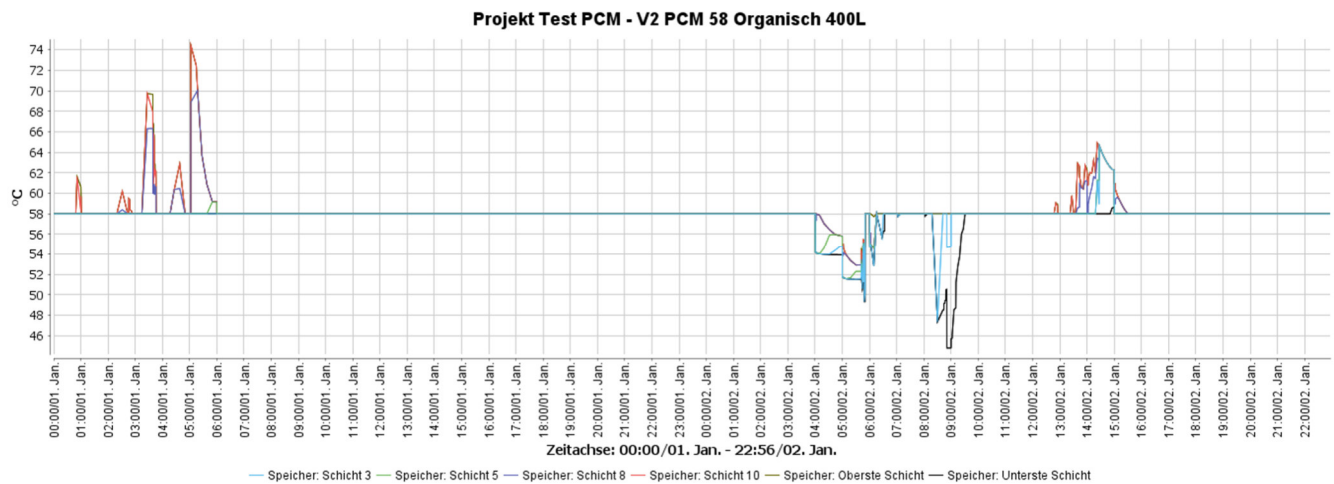


Abbildung 14: Detaillierte Temperaturverlauf Lade-Entlade-Zyklus vom PCM: PURETEMP58

Unterbrüche

In der detaillierten Temperaturkurve der Abbildung 14 zeigt sich, dass es auch in dieser Simulation zum Teil Unterbrüche des Phasenwechsels wie z.B. um 8 bis 10 Uhr am 2. Januar in einigen Speicherschichten gibt. Dies kann dadurch erklärt werden, dass zu diesen Zeitpunkten einerseits ein Bezug an BWW bestand, andererseits auch der Wärmefluss vom Wärmeträger zum PCM nicht optimal war. Dies liegt daran, dass bei diesem Testaufbau nur die Speichergrösse geändert wurde und alle anderen Speicherparameter noch nicht an das PCM angepasst wurden.

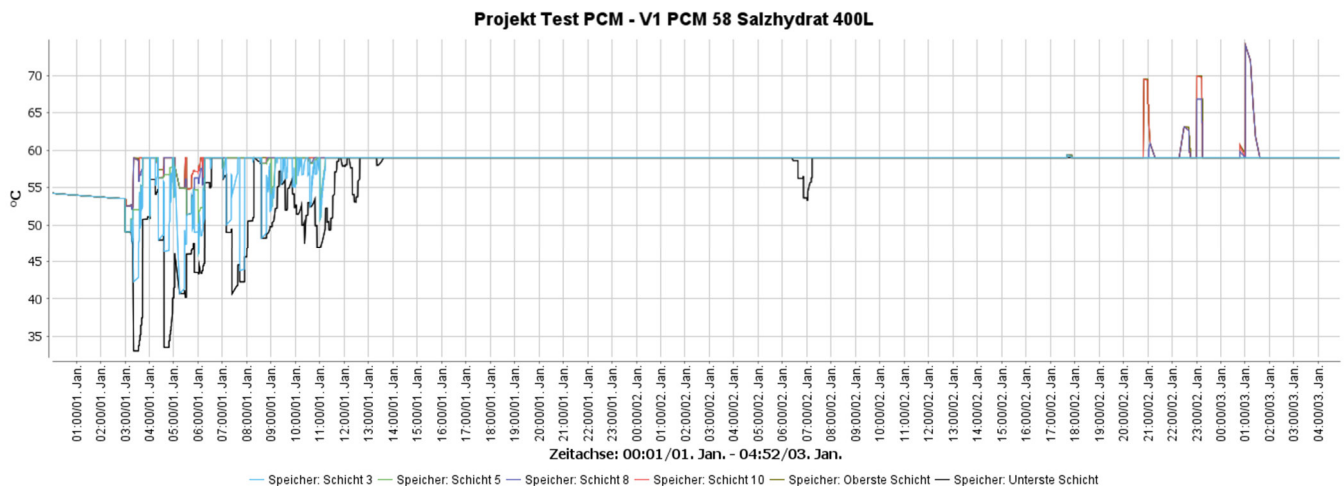


Abbildung 15: Temperaturverlauf Lade-Entlade-Zyklus vom PCM: SAT

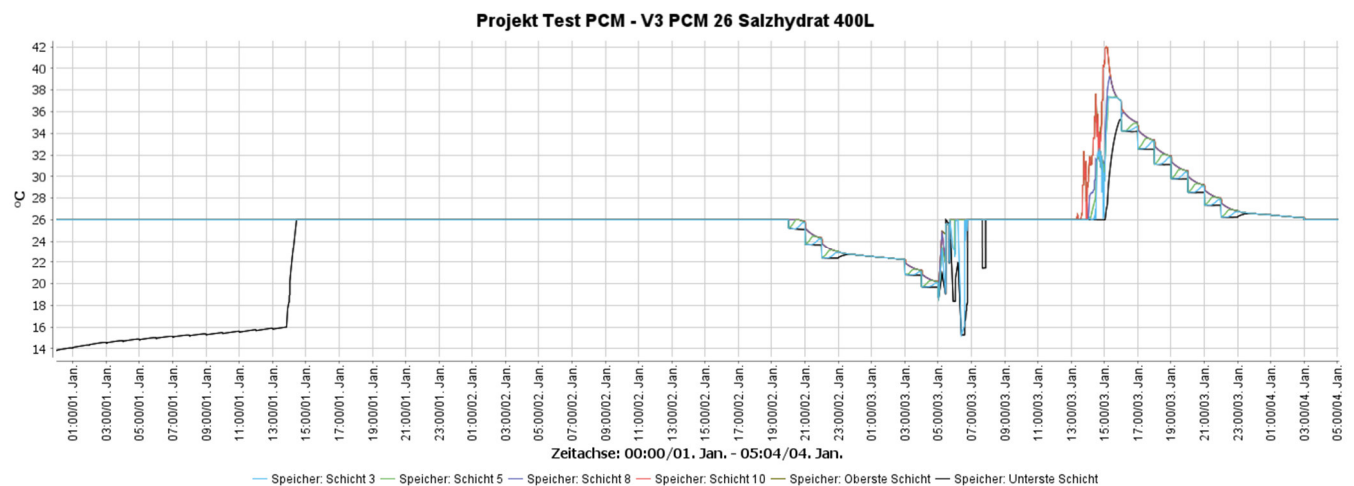


Abbildung 16: Temperaturverlauf Lade-Entlade-Zyklus vom PCM: CCH

Andere PCMs

Das Programmieren und Testen von zwei weiteren PCMs (Salzhydrate) zeigten, dass Polysun die PCMs, wenn auch vereinfacht, doch gut simulieren kann. Das zeigen die Abbildungen 15 und 16 mit den verschiedenen Speicherschichten. Während beim Salzhydrat generell ein Unterschied vom Ladeverhalten gegenüber dem organischen PCM sichtbar ist, zeigt das Salzhydrat, welches den Phasenwechsel bei einer tieferen Temperatur vollzieht (Abbildung 16), ein schnelleres Angleichen der Temperatur der einzelnen Schichten, aber auch Unterkühlung in den untersten Schicht. Dies liegt wahrscheinlich an der Wärmeleitung des PCMs und der künstlich hergestellten Zirkulation des "PCM-Fluids".

Konklusion

Die programmierten PCMs zeigen, dass es innerhalb der Polysun mitgegeben Mitteln möglich ist, einen PCM-Speicher zu erstellen. Diese müssen aber durch entsprechende Einstellungen am Speichermodule weiter verfeinert werden, damit die Speichersimulationen an realen Systemen sowohl an Kapazität wie auch an die Temperaturverläufe annähern.

6.4 Validierung Versuchsaufbau

Die Validierung des Polysun PCM-Speichers an einem realen Speicher ist die beste Möglichkeit, mögliche Unterschiede zu finden und zu analysieren. Des Weiteren hilft dies auch, eine genauere Anleitung für die Erstellung von PCM-Speicher in Polysun zu definieren.

6.4.1 Temperaturverlauf der Ladephase

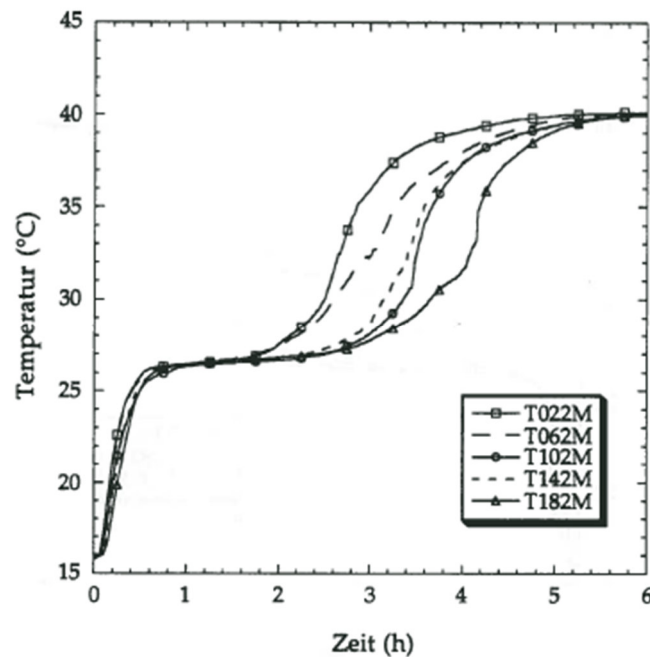


Abbildung 17: Temperaturverlauf des PCM in unterschiedliche Lage beim Ladevorgangs des Versuchsaufbaus ⁽²⁰⁾.

Kurvenverlauf Versuchsaufbau

Die Abbildung 17 zeigt den gemessenen Temperaturverlauf von verschiedenen PCM-Kugeln in unterschiedlicher Höhe im Versuchsspeicher. Es ist klar erkennbar, dass jede Kugel zuerst einen starken Anstieg der Temperatur haben, in der Nähe der Phasenwechseltemperatur abflacht um danach wieder anzusteigen bis zur Ladetemperatur. Wie lange die Plateau-Phase dauert, ist abhängig von der Lage innerhalb des Speichers. Da der Speicher von unten nach oben geladen wird, sind daher die längsten Plateau-Phasen in den oberen Lagen zu finden.

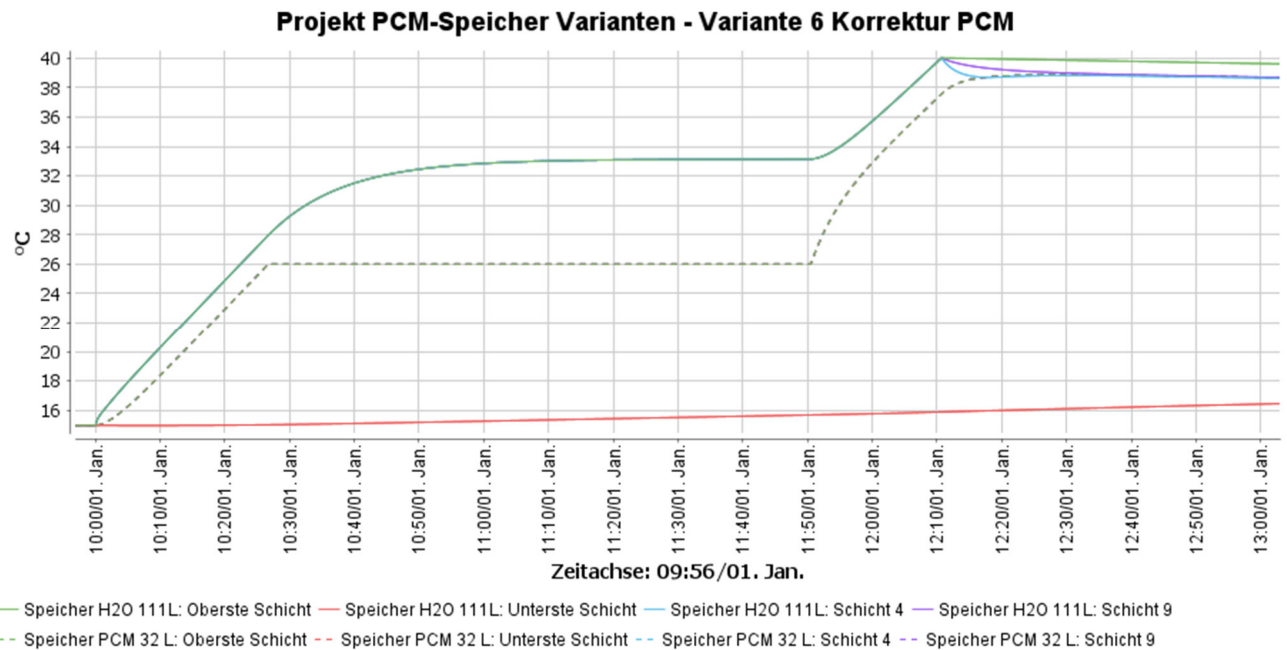


Abbildung 18: Temperaturverlauf des Ladevorgangs in der Simulation inkl. PCM.

Kurvenverlauf

Mit korrekten Parametern zeigt die Temperaturkurve in Polysun einen klaren Anstieg, Plateau-Phase und Wiederanstieg bis zur "Ladetemperatur" wie die Abbildung 18 darstellt. Wobei die Ladetemperatur im PCM (gestrichelte Linie) um ca. ein Grad tiefer ist als im Forschungsbericht. Dies kann dadurch erklärt werden, dass der Ausschaltungs- punkt des Heizkreislafs im Wasser-Speicher (durchgezogene Linie) und die Ausschalttemperatur auf 40 °C liegt. Des Weiteren sind die Wechsellpunkte beim PCM nicht abgerundet. Dies liegt daran, dass bei der Berechnung der Temperatur des PCM in Polysun nur auf einen Berechnungsparameter zurückgegriffen werden kann. Zusätzliche Berechnungsparameterdaten können die Wechsellpunkte der Temperatur abrunden. Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass in der Polysun-Simulation alle Kontrollvolumen des PCM-Speichers zeitgleich in den Phasenwechsel gehen, was im Versuchsaufbau nicht gegeben ist. Hier müsste das Zirkulationsvolumen des PCM-Kreislaufes angepasst werden, um ein ähnliches Temperaturverhalten hervorzurufen.

Einspeisetemperatur

Ein weiterer Unterschied zeigt die Temperaturkurve des Wärmeträgers. Im Gegensatz zum Versuchsaufbau (Abbildung 19) zeigt Polysun auch beim Wärmeträger eine Plateau-Phase in der Temperatur. Das liegt wahrscheinlich daran, dass im Polysun der Heizkreislauf nicht optimal aufgebaut worden ist. Im Versuchsaufbau wurde der Speicher mit konstanter Temperatur geladen, während im Polysun ein geschlossener Kreislauf zwischen Speicher und Energiequelle besteht. Dadurch dass die Energiequelle eine begrenzte Leistung besitzt und das Fluid in einem Kreislauf zirkuliert, führt in der Simulation dazu, dass die Einspeisetemperatur mit der Speichertemperatur ansteigt.

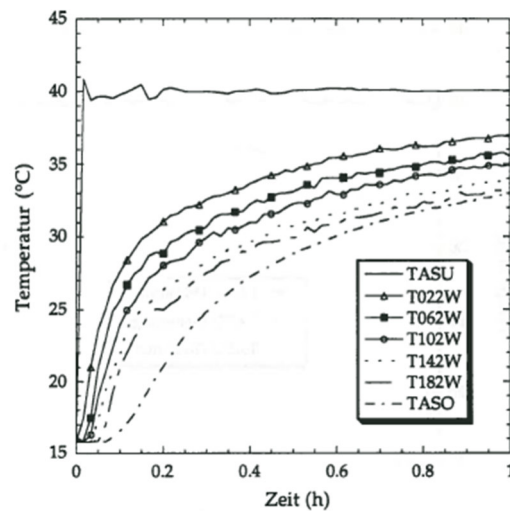


Abbildung 19: Temperaturverlauf des Wärmeträgers beim Ladevorgang des Versuchsaufbaus ⁽²⁰⁾

6.4.2 Temperaturverlauf der Entladungsphase

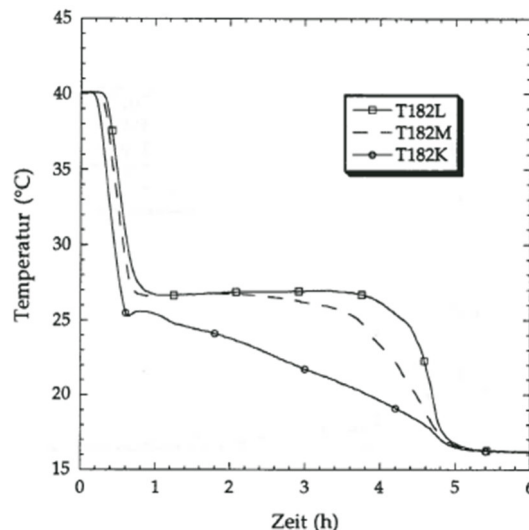


Abbildung 20: Temperaturverlauf innerhalb einer PCM-Kugel beim Entladen ⁽²⁰⁾

Temperaturverlauf PCM-Kugel

Gegenüber der Ladephase des Speichers wurden im Forschungsbericht bei der Entladephase des Speichers nur die Daten einer PCM-Kugel veröffentlicht. Dadurch kann kein direkter Vergleich mit der Polysun-Simulation gemacht werden. Es ist aber möglich, das Verhalten des Speichers anhand der Daten der PCM-Kugel abzuleiten. Die Abbildung 20 zeigt den Temperaturverlauf innerhalb des PCM in drei verschiedenen Tiefen. Die Linie T182K zeigt die Temperatur nahe an der Kugelmittle, während T182L den Temperaturverlauf nahe an der Kugeloberfläche misst. Sie zeigen, dass etwa bis zur Hälfte der Kugelmasse ein Temperatur-Plateau besteht und erst nahe am Zentrum ein linearer Verlauf entsteht. Wird bedacht, dass jede PCM-Kugel einen eigenen Zeitpunkt des Phasenübergangs hat, kann davon Ausgegangen werden, dass die Temperaturkurve des PCM über den gesamten Speicher ein ähnliches Bild ergibt wie bei der Ladephase. Dies gilt entsprechend auch für die Temperatur des Wärmeträgers.

Projekt PCM-Speicher Varianten - Variante 6 Korrektur PCM

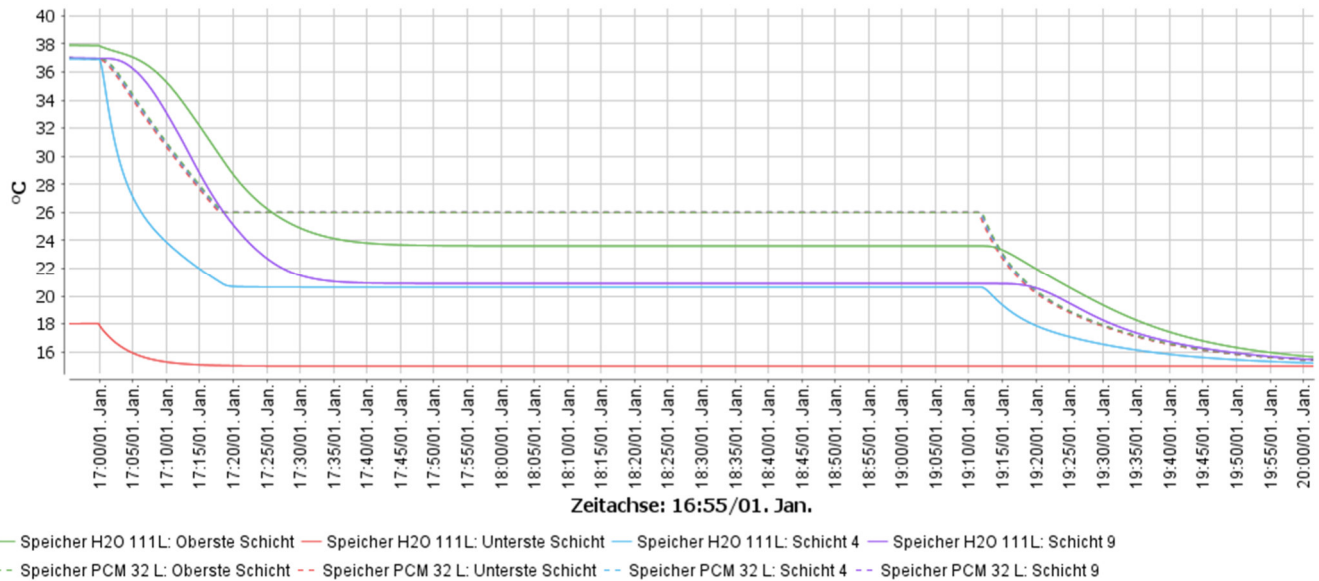


Abbildung 21: Temperaturverlauf während der Entladevorgangs in der Simulation

**Temperaturverlauf
Wärmeträger**

Bei der Entladungsphase innerhalb der Simulation zeigen die Temperaturverläufe innerhalb der verschiedenen Kontrollvolumen des Wärmeträger-Speichers klare Unterschiede (durchgezogene Linien). Wobei das oberste Kontrollvolumen die Temperatur erst bei der Temperatur-Plateau-Phase des PCMs unter die PCM-Temperatur (gestrichelte Linie) fällt, wie die Abbildung 21 zeigt. Hier muss gefragt werden, ob das Bezugsvolumen gegenüber dem Versuchsaufbau zu klein war oder die Simulation hier teilweise an ihre Grenzen stösst. Gleichzeitig ist auch hier beobachtbar, dass die Temperatur des Wärmeträgers für eine gewisse Zeit stagniert statt weiter abzusinken, wie es in den publizierten Daten des Versuchsaufbaus (Abbildung 22) sichtbar ist. Es ist denkbar, dass in gewissen Kontrollvolumen die Temperaturen weiter sinken würden aber aufgrund der vereinfachten Berechnungen der Simulation dies gar nicht machen, wie die Temperaturkurve des vierten Kontrollvolumens (blau durchgezogene Linie) zeigt. Hier ist ein klarer Knick im Plateau sichtbar, statt wie im neunten Kontrollvolumen (violett durchgezogene Linie) mit einem gerundeten Übergang.

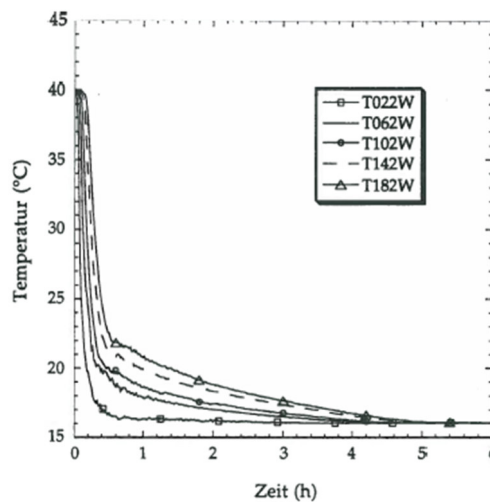


Abbildung 22: Temperaturverlauf des Wärmeträgers während der Entladevorgangs im Versuchsaufbau in unterschiedlicher Höhe ⁽²⁰⁾

6.4.3 Nachberechnung Kapazität

Kapazität Versuchsaufbaus

Im Forschungsbericht wird die Kapazität des Versuchsspeichers auf 31.8 MJ oder ca. 8.8 kWh angegeben. Diese teilen sich auf in 17.4 MJ bzw. 4.8 kWh PCM und 14.4 MJ bzw. 4 kWh Wärmeträger inklusiv den Stahlteilen im Speicher. Des Weiteren wurde in der Berechnung angenommen, dass Wasser genau eine Dichte von 1 kg/Liter hat sowie eine Wärmekapazität von 4.2 kJ/kgK. Daher muss von den Ergebnissen in Polysun und den Nachrechnungen mit Differenzen gerechnet werden. Die Ergebnisse aber sollten sich in einem ähnlichen Rahmen bewegen.

Anteil	Berechnung	Energie [MJ / kWh]	
Schmelzenthalpie	74 kg x 192 kJ/kg	14.2	3.9
Festkörperbereich	74 kg x 1.4 kJ/kgK x 11 K	1.1	0.3
Flüssigbereich	74 kg x 2.2 kJ/kgK x 13 K	2.1	0.6
Wärmeenergie in den Kugeln	-	17.4	4.8
Wasser	111 kg x 4.2 kJ/kgK x 24 K	11.2	3.1
Stahl	264 kg x 0.5 kJ/kgK x 24 K	3.2	0.9
Wärmeenergie im Speicher	-	31.8	8.8

Tabelle 14: Berechnung und Werte aus dem Forschungsbericht

Berücksichtigung Stahlteile

In wie weit Polysun die Stahlteile des Speichers berücksichtigt, ist zum Zeitpunkt des Schreibens dieses Abschnitts nicht bekannt. Daher wird bei der folgenden Nachberechnung der Kapazität in Polysun davon ausgegangen, dass die Kapazität der Stahlteile nicht berücksichtigt wurde. Im Versuchsaufbau entspricht dies einer Kapazität von 28.6 MJ oder 7.9 kWh.

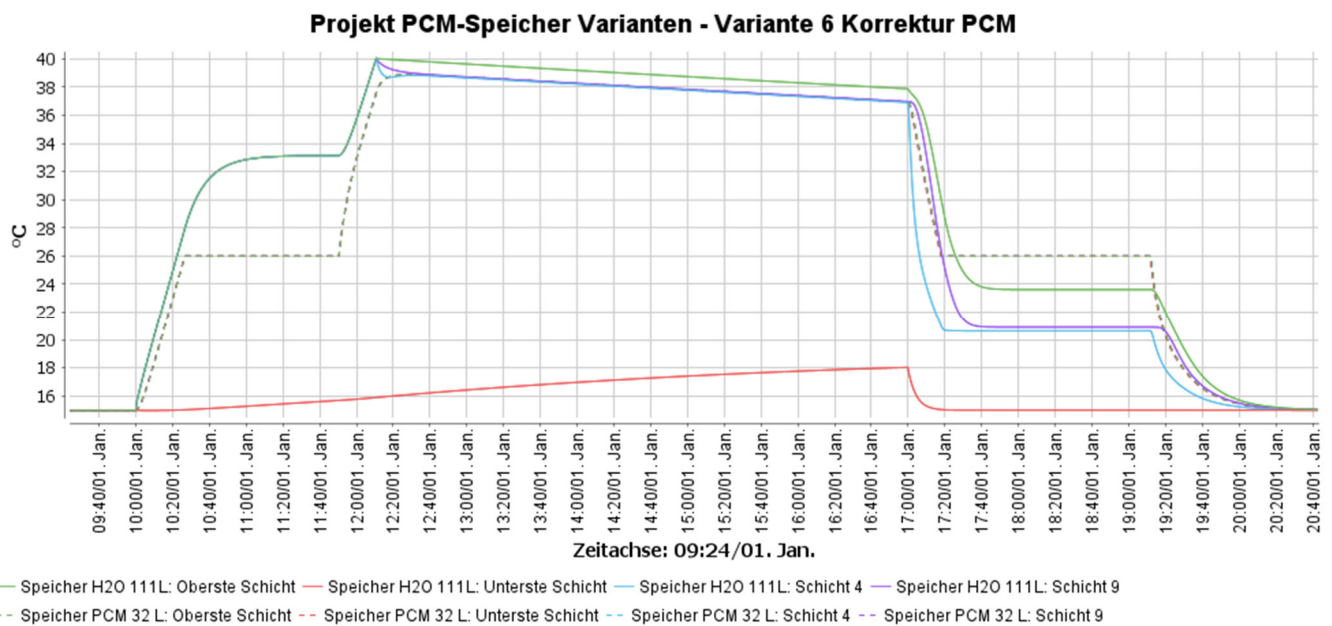


Abbildung 23: Ein simulierter Zyklus des PCM-Speichers in Polysun und damit auch die berechneten Maximal- und Minimaltemperaturen.

Kapazität anhand Temperatur

Die erste Überprüfung von der Kapazität kann anhand der erreichten Maximaltemperatur im Speicher und der Minimaltemperatur im Speicher berechnet werden. Die dafür notwendigen Temperaturen können entweder aus der Grafik wie der Abbildung 23 oder durch den Export der Komponentenergebnisse bezogen werden. Mit den gegebenen Angaben zum PCM, Kreislaufvolumen und durch Auswerten der berechneten Temperaturen können entsprechende Energieberechnungen nachvollzogen werden. Dabei zeigt sich, aufgrund von leichten Temperaturunterschieden zwischen dem Versuchsaufbau und Simulation, dass die Kapazität wie erwartet variiert. Der Unterschied ist aber mit 0.2 kWh nur gering und hat hauptsächlich mit den unteren Temperaturen zu tun. In der Simulation wurde der Speicher von 15 °C auf 40 °C erwärmt, während im Forschungsbericht von 16 °C auf 40 °C erwärmt wurde.

Anteil	Berechnung	Energie [MJ / kWh]	
Schmelzenthalpie	74 kg x 192 kJ/kg	14.2	3.9
Festkörperbereich	74 kg x 1.4 kJ/kgK x (26 °C-15 °C) K	1.1	0.3
Flüssigbereich	74 kg x 2.2 kJ/kgK x (39 °C-26 °C) K	2.1	0.6
Wärmeenergie in den Kugeln	-	17.4	4.8
Wasser	110.8 kg x 4.218 kJ/kgK x (40 °C – 15°C) K	11.7	3.2
Wärmeen. im Speicher	-	29.1	8.1

Tabelle 15: Kapazitätsberechnung anhand der Temperatur

Werte aus Polysun

Ein direkter Vergleich kann mit den berechneten Werten von Polysun nicht durchgeführt werden. Der Grund liegt darin, dass in Polysun das zusammengestellte System für ein Jahr durchsimuliert. Die daraus ergebenden Werte sind entweder Jahreswerte oder Monatswerte, je nachdem ob die Werte aus der Gesamtwertung oder

Komponentenbewertung stammen. Daher müssen die Werte wieder auf Einzelladungen heruntergerechnet werden.

	Energie Wärmeerzeuger [kWh] Gesamt / Zyklus		Energie Bezug [kWh] Gesamt / Zyklus	
Jahr	5993	8.21	5617	7.69
Jan	513	8.27	464	7.48
Feb	462	8.25	421	7.52
Mär	511	8.52	471	7.85
Apr	493	8.22	461	7.68
Mai	507	8.18	484	7.81
Jun	490	8.17	472	7.87
Jul	506	8.16	490	7.90
Aug	506	8.16	489	7.89
Sep	491	8.18	468	7.80
Okt	509	8.21	478	7.71
Nov	494	8.23	455	7.58
Dez	512	8.26	465	7.50

Tabelle 16: Kapazitätswerte aus Polysun. Monatswerte linke Spalte, Zykluswerte rechte Spalte

Wertevergleich

Für den Speicher gibt es keine direkten Werte für die Kapazität, kann aber durch die Energiezufuhr über der Wärmequelle und den Energiebezug über Brauchwarmwasser abgeleitet werden. Die Wärmequelle gab über das simulierte Jahr pro Ladezyklus zwischen 8.16 bis 8.52 kWh Wärme ab. Bezogen wurde aber pro Entladezyklus zwischen 7.48 bis 7.9 kWh übers Jahr. Der Durchschnitt ist im Ladezyklus etwa 8.23 kWh während des Durchschnitts des Entladezyklus bei 7.71 kWh liegt. Werden die Durchschnittswerte zusammenaddiert und durch zwei geteilt ergibt sich ein Wert von 7.97 kWh, was etwa dem Werten der Berechnungen in der Tabelle 14 und 15 entspricht.

6.4.4 Vergleich mit Wasser

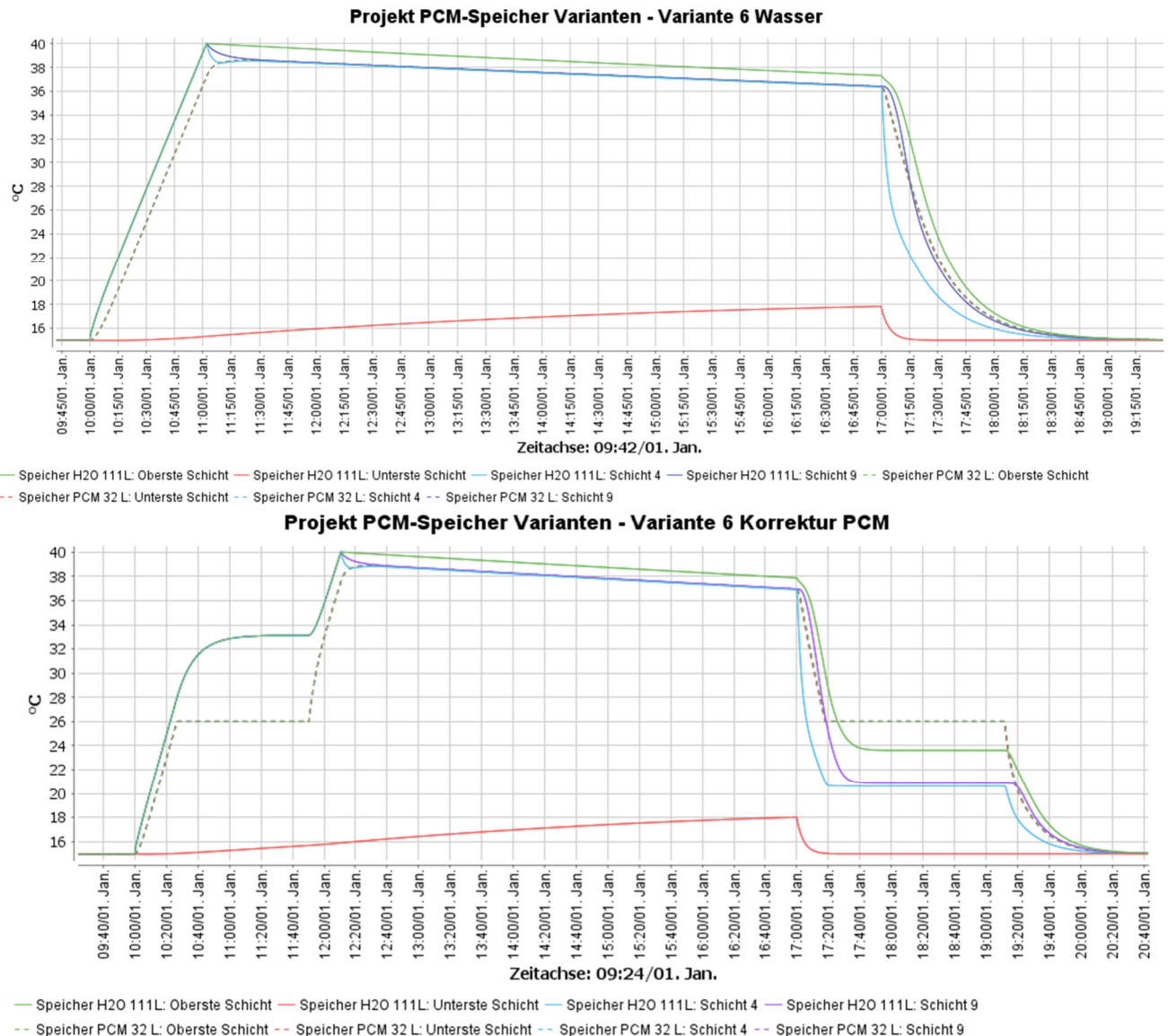


Abbildung 24: Zyklusvergleich Wasser / PCM

Wasser / PCM

Ein direkter Vergleich der Speicherkapazität kann durchgeführt werden, wenn das PCM mit Wasser ausgetauscht wird. Werden dann die Lade-Entladezyklen verglichen, sollten gewisse zeitliche Unterschiede sichtbar sein. In der Abbildung 24 zeigt die obere Grafik ein Zyklus mit Wasser, während die untere Grafik ein Zyklus mit PCM darstellt. Das System mit Wasser benötigt etwa $1\frac{1}{4}$ Stunden, um vollständig zu laden. Das System mit PCM im Vergleich benötigt etwa $2\frac{1}{2}$ Stunden zum vollständigen Laden des Speichers und damit etwa $1\frac{1}{4}$ Stunden länger als das System mit Wasser. Die Entladedauer in einem reinen Wassersystem liegt bei etwa $2\frac{1}{4}$ Stunden, während beim PCM-System die Entladedauer etwa bei $3\frac{3}{4}$ Stunden liegt und damit etwa $1\frac{1}{2}$ Stunden länger als das System mit Wasser. Die Unterschiede der Zeitdauer zeigen damit, dass das System mit PCM etwa eine zweifach höhere Kapazität besitzt als das System mit Wasser.

6.5 Simulation Einfamilienhaus

6.5.1 Verhalten des Speichers mit einem Ölkessel

Ein Versuchsspeicher widerspiegelt nur selten das Verhalten eines thermischen Speichers in einem Gebäude. Je nach System versorgt der Speicher nur Brauchwarmwasser, Heizungssysteme oder beides. Des Weiteren kann zu jedem Zeitpunkt ein BWW-Bezug kommen, was eventuell zur Störung des Ladeprozesses führen kann.

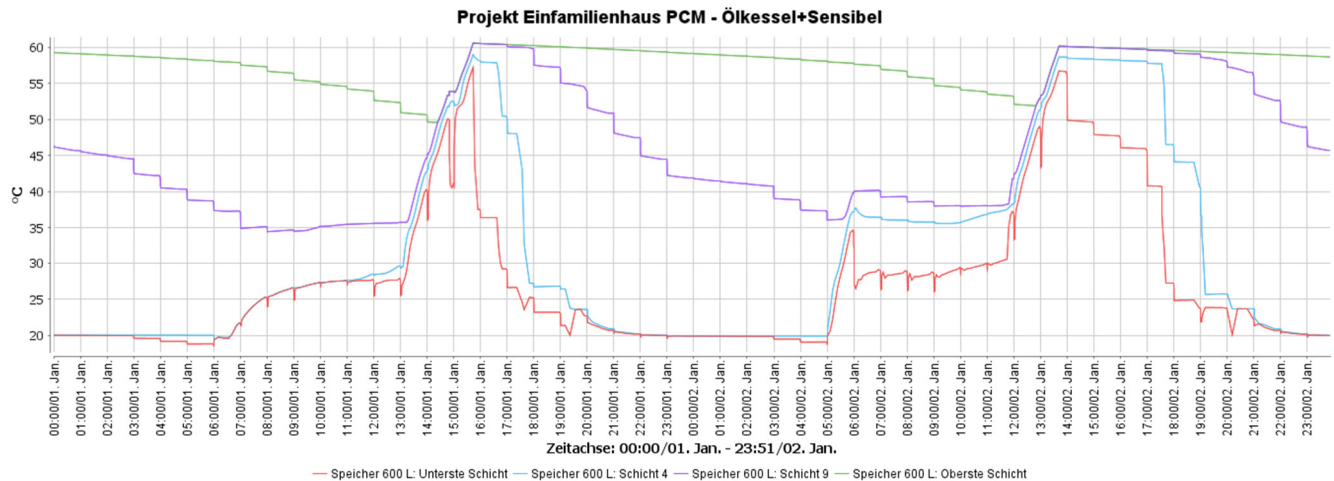


Abbildung 25: Temperaturkurven des thermisch sensiblen Speichers über zwei Tage

Temperaturschichtbildung Die Abbildung 25 zeigt vier verschiedene Temperaturschichten eines thermischen sensiblen Speichers, welches sowohl Wärme für BWW wie auch für die Heizung bereitstellt. Sie zeigt sowohl die entstehenden Temperatur-Schichten im Speicher, Betriebsphase des Kessels wie auch BWW-Bezug und Betrieb der Heizung.

Ladephase Speicher Die Lade-Phase zeigt sich, indem bei allen Temperaturschichten die Temperatur gegenseitig annähern und auf Temperaturen von 50 bis 60 °C steigen. In der Abbildung 25 ist dies zu folgenden Zeiten erkennbar: zwischen 13 und 17 Uhr am ersten Januar, zwischen 5 und 6 Uhr und zwischen 12 und 14 Uhr am zweiten Januar. Die kleineren Spickeln nach unten bei der roten Temperaturlinie zeigen auf, dass während der Lade-Phase BWW bezogen wurde.

Heizungsbetrieb Der Bezug von Wärme für die Heizung ist dadurch zu erkennen, dass die unteren Schichten des Speichers ein erhöhtes stabiles Temperaturniveau von über 25 °C bilden aufgrund des Warmwasser-Rücklaufs (WW-Rücklauf) von den Heizelementen des Gebäudes. Dies ist in der Abbildung 25 zwischen 7 und 13 Uhr des ersten Januars und zwischen 6 und 12 Uhr des zweiten Januars erkennbar. Ansonsten sinken die Temperaturen der unteren Schichten auf 20 °C zurück.

6.5.2 Verhalten des Speichers mit einem 58 °C PCM

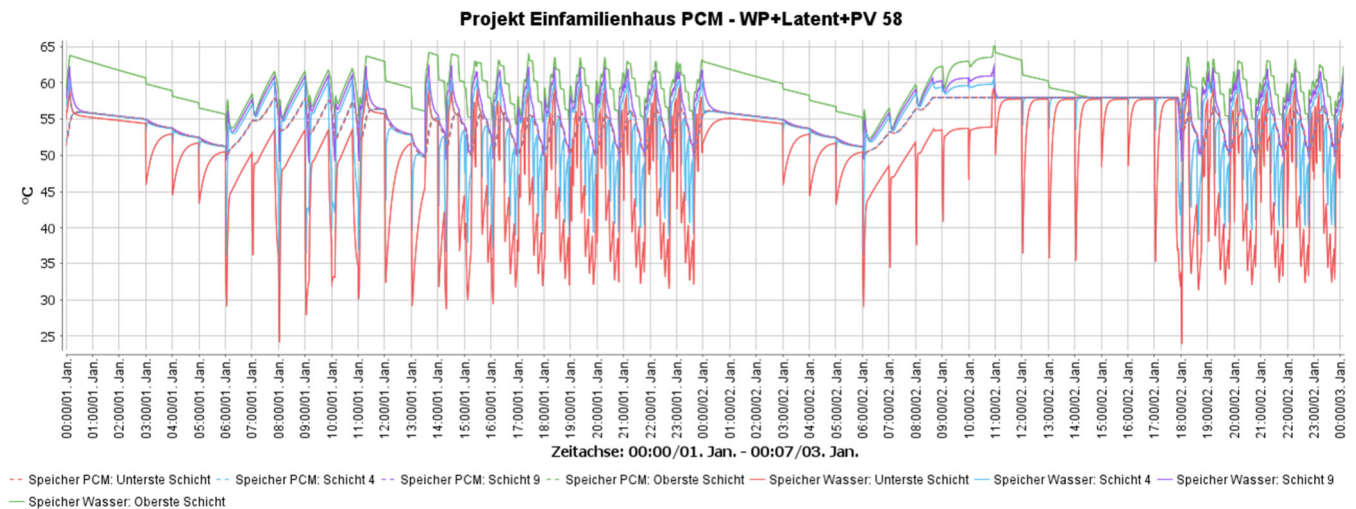


Abbildung 26: Temperaturverlauf bei einem latenten thermischen Speicher mit Wechseltemperatur von 58 °C über zwei Tage

Verwendete Temperaturkurven Die Abbildung 26 zeigt nun einen latent thermischen Speicher, der mit einem PCM befüllt ist, welcher einen Phasenwechsel bei einer Temperatur von 58°C durchzieht. Die angezeigten Schichten entsprechen den gleichen Schichten wie beim sensiblen thermischen Speicher. Insgesamt sind es aber acht Temperaturlinien gegenüber von vier, da sowohl der PCM-Anteil wie auch der Wärmeträger-Anteil (Wasser) miteinbezogen wurde.

Temperaturschichten Im Gegensatz zur Ölkesselvariante können keine klaren Temperaturschichtungen beim Wärmeträgeranteil (durchgezogene Linien) mehr erkannt werden. Dies kann dadurch erklärt werden, dass das PCM die Schichten ausgleicht. Dafür ist umso klarer der BWB-Bezug zu erkennen, da die vom Bezug ausgelösten Temperaturspikeln der untersten Schicht zu jederzeit klar erkennbar sind.

Bezug Heizung Der Bezug an Wärme durch die Heizung ist in diesem Speicher gegenüber dem Bezug an BWB dadurch zu erkennen, dass die unterste Schicht (rote Linien) für eine gewisse Zeit ca. fünf Kelvin kühler ist als die restlichen Schichten aufgrund des zurückfliessenden kälteren Wärmeträgers aus den Heizkreisläufen. Dass die Temperatur der untersten Schicht beim Betrieb der Heizung nicht unter 35 °C fällt hat damit zu tun, dass ein grosser Teil des vom Heizkörper zurückkehrenden Volumenstroms benötigt wird, um die Vorlauftemperaturen von 55 bis 64 °C auf die Solltemperaturen von 35 °C hinunter zu regulieren.

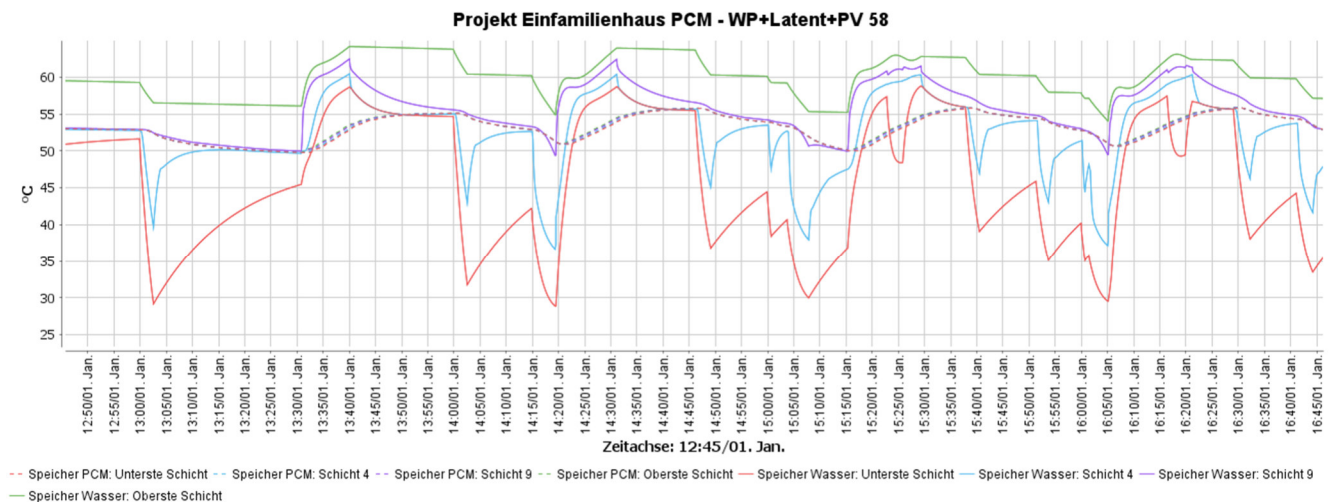


Abbildung 27: Detailliertere Ansicht der unterbrochenen Ladephase.

Lade-Phase

Im Gegenzug der Ölkesselversion wurde diese Version mit einer Wärmepumpe als Wärmequelle ausgeführt. Diese haben die Eigenschaften, dass sie sich abschalten, wenn die Rücklauftemperaturen zu hoch sind. Dies ist in der Abbildung 26 durch mehrfache Temperaturschwankungen in allen dargestellten Schichten angedeutet. Die Abbildung 27 zeigt das genauere Bild. Die Temperaturen des Wärmeträgers in den unteren Schichten steigen über 55 °C. Damit sind auch die Rücklauftemperaturen zur WP zu hoch und schaltet die Pumpe entsprechend aus. Andererseits gibt es Zeitpunkte, bei der die Ladephase konstante Temperaturen haben wie die Abbildung 28 zeigt. Dies kann dadurch erklärt werden, dass gleichzeitig auch der Heizkreislauf in Betrieb war und damit die Rücklauftemperatur signifikant gesenkt hat. Erst als die Temperatur in den oberen Schichten des Speichers über 60 °C erreicht haben, schaltete sich die WP aufgrund der Ausschalbedingungen aus. Unabhängig davon zeigte sich, dass die Temperaturkurven (gestrichelte Linien) des PCMs nie über 58 °C hinausgestiegen sind. Dies weist darauf hin, dass während der Ladephase die PCM-Masse nur partial geschmolzen wurde und damit der Speicher selber zu jedem Zeitpunkt nicht durchgeladen wurde. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass das PCM mit einer Phasenwechseltemperatur von 58 °C für diesen Speicher zu hoch ist.

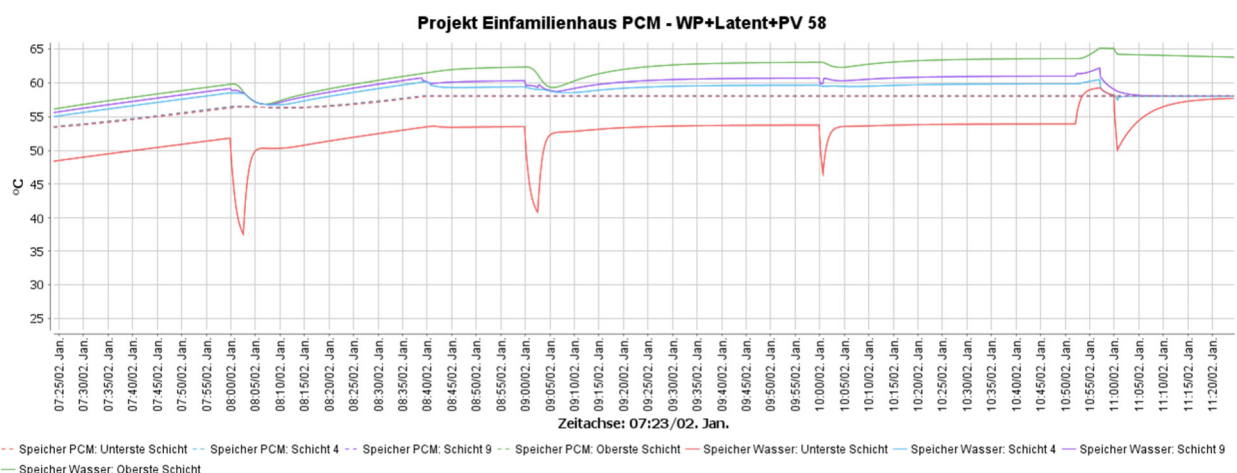


Abbildung 28: Ladephase ohne Wärmepumpenausfall

6.5.3 Verhalten des Speichers mit einem 53 °C PCM

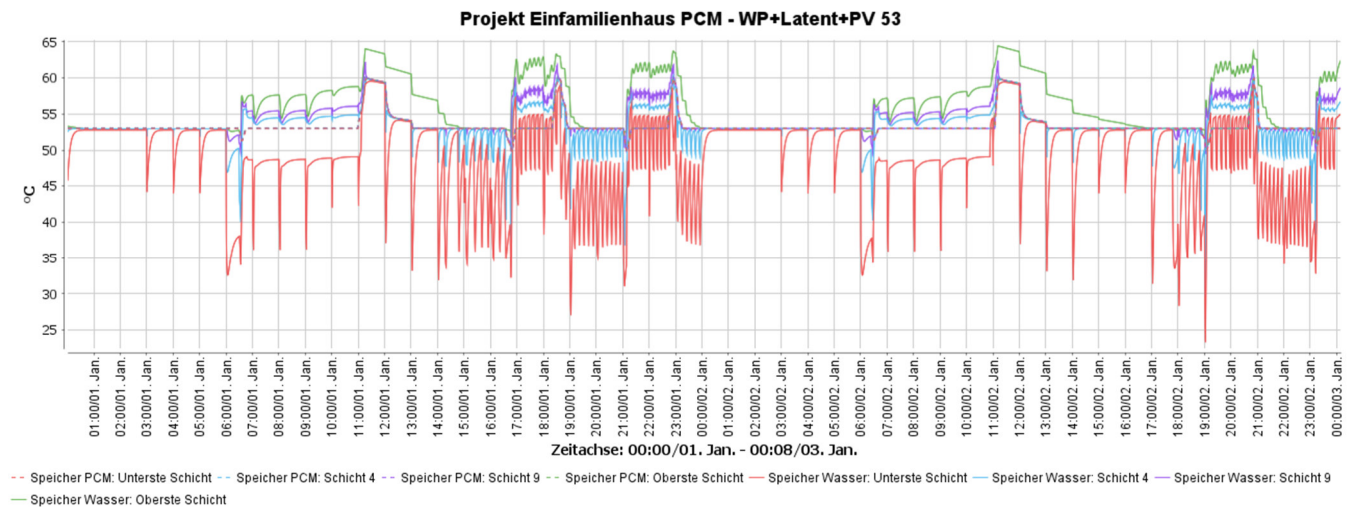


Abbildung 29: Temperaturverlauf eines latenten thermischen Speichers mit Phasenwechseltemperatur von 53 °C über zwei Tage.

PCM-Wechsel

In dieser Variante wurde auf ein PCM gewechselt, welches eine Phasenwechseltemperatur von 53 °C besitzt und damit gegenüber dem ersten PCM auch den Phasenwechsel vollständig durchziehen könnte. Ein weiterer Unterschied ist das Material des PCMs, da in dieser Variante das PCM auf ein organisches Material basiert statt auf ein Salzhydrat.

Temperaturschichten

Mit dem Wechsel des PCM sind auch die lineare Temperaturphasen der Phasenwechsel sichtbar, wie die Abbildung 29 zeigt. Wie beim vorhergehenden PCM sind nur Schichten vorhanden, wenn der Speicher geladen wird bzw. wenn der Heizungskreislauf in Betrieb ist und zu gleichen Zeitpunkt ein BWW-Bezug besteht.

Bezug Heizung

Der Bezug der Heizung dadurch erkennbar, dass die Temperatur in der untersten Schicht des Speichers um etwa fünf Kelvin tiefer liegt und damit dem Verhalten der vorhergehenden PCM folgt. Interessanterweise zeigen die Temperaturkurven am späten Nachmittag grössere Schwankungen auf, die nicht durch BWW-Bezug erklären lassen. Denn nach der Programmierung von Polysun wird BWW nach Bezugsprofil immer zur Stundenanfang simuliert. Die Schwankungen entstehen aber zum Teil innerhalb einer Stunde. Die Abbildung 30 zeigt ein genaueres Bild der Schwankungen. Es stellte sich heraus, dass diese Schwankungen durch den Betrieb des Heizungskreislaufs verursacht wird. Dieser schaltet sich im Verlauf des späten Nachmittags immer wieder ein und aus, um die Solltemperatur des Gebäudes von 20 °C zu erhalten. Um dies zu verhindern, müsste nochmals die Steuerung des Heizkreislaufes genauer analysiert werden. Speziell die Ein- und Ausschaltbedingungen der Steuerung.

Projekt Einfamilienhaus PCM - WP+Latent+PV 53

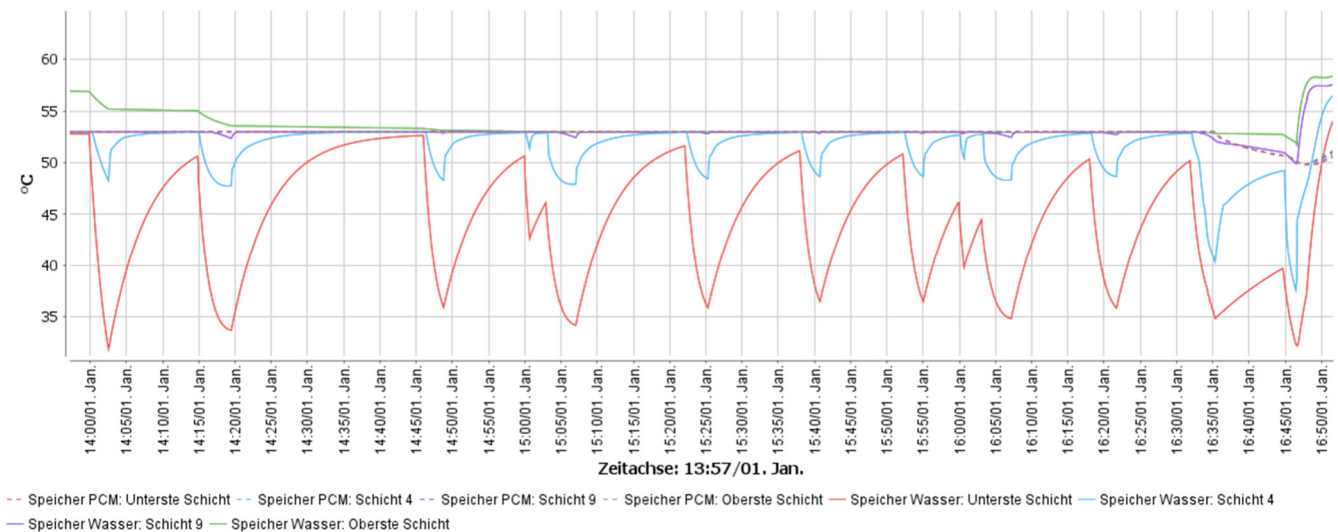


Abbildung 30: Detailliertes Bild der Temperaturschwankungen am Nachmittag im Speicher. Gut erkennbar sind die BWW-Bezüge zur vollen Stunde. Auch gut erkennbar ist das regelmässige Einschalten des Heizkreislaufes um die Solltemperatur von 20 °C im Gebäude zu erhalten.

Lade-Phase

Im Gegensatz zur Salzhydratvariante ist in dieser PCM-Speichervariante eine klare Lade und Entladephase des PCMs sichtbar. Die Temperatur des Wärmeträgers blieb beim Rücklauf immer unter 55 °C und verhinderte damit das Abschalten der Wärmepumpe. Die Temperatur des Wärmeträgers blieb in $\frac{3}{4}$ der Schichten über der Phasenwechseltemperatur des Speichers, womit mit einem vollständigen Laden des PCMs in diesen Schichten ausgegangen werden kann. Im Gegenzug sieht es im untersten Viertel des Speichers so aus, dass hier mit einer unvollständigen Ladevorgang des PCM ausgegangen werden muss. Die Temperatur des Wärmeträgers sank immer wieder unter der Phasenwechseltemperatur des PCMs und unterbrach damit den Ladevorgang. Speziell dann, wenn auch der Heizungskreislauf in Betrieb war.

Projekt Einfamilienhaus PCM - WP+Latent+PV 53

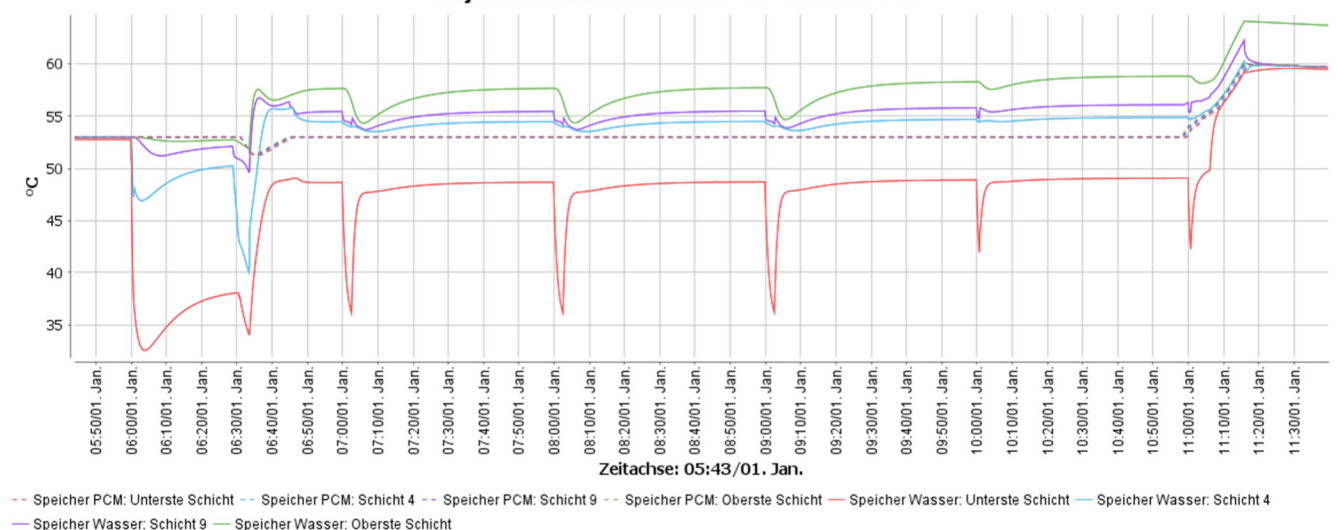


Abbildung 31: Temperaturverlauf des Speichers beim Laden.

7 Schlussfolgerungen, Ausblicke und Empfehlungen

Ergebnisse	Die ausgeführten Polysun-Simulationen zeigen, dass es möglich ist, mit den gegebenen Komponenten in Polysun einen latent thermische Speicher zusammenzustellen und zu simulieren. Durch das Aufbauen eines realen Systems in Polysun zeigte sich auch, dass Temperaturen und Kapazitäten des simulierten Systems dem reportierten Verhalten mit wenigen Ausnahmen entsprachen. Zuletzt konnte noch ein Energiesystem mit einem latent thermischen Speicher an einem Beispiel eines Einfamilienhauses simuliert werden, wobei sich zeigte, dass die korrekte Auswahl des PCM für das Energiesystem eine wichtige Rolle spielt.
Probleme / Offene Punkte	Der in der Simulation aufgebaute latent thermischen Speicher führt bei Polysun zu einer relativ langen Simulationsdauer. Der Grund liegt darin, dass Polysun kleine Zeitschritte von 6 bis 12 Sekunden durchführt. Der PCM-Kreislauf zirkulierte bei der Simulation mit 3600 l/h. Dies führt dazu, dass in allen Kontrollvolumen des PCM-Speichers die gleichen Temperaturen herrschen. In der Realität sollte es zwischen den Kontrollvolumen leichte Temperaturunterschiede geben. Ein weiterer Punkt ist das Verhältnis zwischen der Speichergrosse vom Wärmeträger und den Einstellungen der Wendel für den PCM-Kreislauf. Im Simulationsaufbau kam es immer wieder zu Fehlermeldungen, welche besagen, dass ein eventuell berechneter Wert unter dem gegebenen Minimumwert gefallen ist. Die Simulation mit dem Einfamilienhaus bezieht die Wärmepumpe momentan auch Energie vom Elektrizitätsnetzwerk. Der latent thermische Speicher und das Energiesystem müssen noch soweit optimiert werden, dass die Wärmepumpe nur noch mit der Photovoltaik betrieben werden kann. Die Interpretation der Temperaturkurven wurden hauptsächlich in den Wintermonaten gemacht. Das Problem der hohen Rücklauftemperaturen zur Wärmepumpe kann damit in den Sommermonaten noch bestehen.
Weiterführende Fragen	In dieser Arbeit wurden zwar intensiv die Parameter der Fluide untersucht, aber die weiteren Einflüsse durch Parametereinstellungen der Speicher wenig bis gar nicht. Hier müssten weitere Untersuchungen durchgeführt werden. In der Arbeit wurden keine Simulationen mit einem Mehrfamilienhaus oder mit einem System, welches Kälte bereitstellt, erstellt. Um zu sehen, wie das latent thermischen Speichersystem auf solche Energiesysteme reagiert muss daher mit einer weiteren Studie beantwortet werden. Die Simulation mit dem Einfamilienhaus ist momentan nicht so programmiert, dass der Speicher nur über den Tag geladen wird. Dafür müssen noch weitere Stunden investiert werden.
Empfehlungen	Der simulierte Speicher sollte mit weiteren realen Systemen abgeglichen werden, um das System zu ratifizieren und die Schwachpunkte sowie mögliche Programmierfehler und deren Lösungswege zu dokumentieren. Die PCMs zeigen ein klares lineares Verhalten beim Laden und Entladen an. Die dafür zuständigen Fluidparameter sollten mit weiteren Parameterstudien untersucht werden, um die Berechnungsformel genauer zu bestimmen.

8 Literatur und Quellenverzeichnis

Herkunft der Vorlage	Das Dokument wurde auf der Basis einer Vorlage für Technische Berichte erstellt. Die Vorlage ist ein Element des „Werkzeugkastens Technische Berichte“ der Hochschule für Technik Rapperswil. Sie orientiert sich an Prinzipien des Strukturierten Schreibens.
Verwendete Software	Microsoft Word Microsoft Excel Microsoft Visio Trimble Nova Vela Solaris Polysun
Internet	I. https://de.wikipedia.org/wiki/Thermische_Energie; 05.10.2020; 14:56 Uhr II. https://de.wikipedia.org/wiki/Warmwasser; 25.10.2020; 08:29 Uhr III. https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%96lpreiskrise; 25.10.2020; 09:15 Uhr IV. https://jenni.ch/nullenergiehaus.html; 25.10.2020; 10:17 Uhr V. https://hls-dhs-dss.ch/de/articles/013794/2012-08-16/; 25.10.2020; 10:49 Uhr VI. https://www.endk.ch/de/energiepolitik-der-kantone/muken; 26.10.2020; 07:55 Uhr VII. https://de.wikipedia.org/wiki/Mustervorschriften_der_Kantone_im_Energiebereich; 26.10.2020; 07:54 Uhr VIII. https://www.energie360.ch/magazin/de/erneuerbare-energien-nutzen/muken-2014-so-setzen-die-kantone-sie-um/; 26.10.2020; 07:55 Uhr IX. https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmespeicher; 21.11.2020; 10:15 Uhr X. https://www.thermondo.de/info/rat/vergleich/latentwaermespeicher/; 21.11.2020; 10:27 Uhr XI. https://www.puretemp.com/stories/about-puretemp-llc; 21.11.2020; 10:32 Uhr XII. https://www.pcmproducts.net/PCM_Products_Background.htm; 21.11.2020; 13:34 Uhr XIII. https://cowa-ts.com/de; 21.11.2020; 10:36 Uhr XIV. https://www.sunamp.com/; 21.11.2020; 10:38 Uhr XV. https://de.wikipedia.org/wiki/Dichteste_Kugelpackung; 21.11.2020; 11:12 Uhr XVI. https://de.wikipedia.org/wiki/Porosit%C3%A4t; 21.11.2020; 11:15 Uhr XVII. https://de.wikipedia.org/wiki/A/V-Verh%C3%A4ltnis; 21.11.2020; 12:50 Uhr - XVIII. https://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/w/wasser-dichtetabelle.php; 22.12.2020; 10:25 Uhr

- XIX. http://www.wissenschaft-technik-ethik.de/wasser_dichte.html; 22.12.2020;
10:20 Uhr
- XX. <https://de.wikipedia.org/wiki/Dichteanomalie>; 22.12.2020; 10.30

Literatur

1. Schweizerische Gesamtenergiestatistik, BFE, Ittigen 2019
2. C. Wemhöner, Vorlesung Gebäudetechnik Bauphysik, Rapperswil 2014
3. M. Sterner, I. Stadler.: Handbook of Energy Storage, Springer-Verlag, Berlin 2019
4. V. Wesselak et al.: Regenerative Energietechnik, Springer-Verlag, Berlin 2013
5. C. Elias, V. Stathopoulos: A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage, Science Direct, 2019
6. Lu Liu et al.: The research progress on phase change hysteresis affecting the thermal characteristics of PCMs: A review, Journal of Molecular Liquids, 2020
7. L. Mongibello et al.: Experimental test of a hot water storage system including a macro-encapsulated phase change material (PCM), 34th UIT Heat Transfer Conference, 2016
8. A. Sharma et al.: Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Science Direct, 2009
9. S. Sumathi et al.: Heat transfer characteristics in latent heat storage system using paraffin wax, Springer-Verlag, Berlin 2012
10. D. Yu, Z. He.: Shape-remodelled microcapsule of phase change materials for thermal energy storage and thermal management, Applied Energy, 2019
11. D. Feng et al.: Using mesoporous carbon to pack polyethylene glycol as a shape-stabilized phase change material with excellent energy storage capacity and thermal conductivity, Microporous and Mesoporous Materials, 2021
12. X. Dai et al.: Melting heat transfer characteristic of encapsulated composite phase change material, Fresenius Environmental Bulletin Volume 28, 2019
13. K. Kumarasamy et al.: Novel CFD-based numerical schemes for conduction dominant encapsulated phase change materials (EPCM) with temperature hysteresis for thermal energy storage applications, Energy, 2017
14. M. Soni et al.: Numerical simulation and parametric analysis of latent heat thermal energy storage system, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020
15. D. Dzhonova-Atansova et al.: Numerical study of heat transfer in macro-encapsulated phase change material for thermal energy storage, Bulgarian Chemical Communications, Volume 48, 2016
16. D. Neyer, M. Hauer.: Überblick zu Simulationstools zur Auslegung und Optimierung von Anlagen zum solaren Kühlen, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Universität Innsbruck
17. M. Hunziker.: Optimierungsmöglichkeiten in einem Heizungssystem mit Sole/Wasser-Wärmepumpe und PVT Kollektoren (Polysun Simulationsstudie), Bachelorarbeit ZHAW, 2018

18. Vela Solaris AG: Benutzerhandbuch Polysun Software, Version 2019
19. H. Kuchling.: Taschenbuch der Physik, Hanser Verlag, München 2011
20. P. Egolf und H. Manz: Latentwärmespeicher für die Sonnenenergienutzung: Lade- und Entladevorgänge, EMPA, Dübendorf 1994
21. C. Rudolph: Entwicklung einer Methode zur Suche nach Kristallisationsinitiatoren für Salzhydratschmelzen mittels High-Throughput-Screening, Dissertation TU Freiberg, 2002

9 Verzeichnisse

9.1 Abbildungen

Abbildung 1: Flussdiagramm Vorgehen	25
Abbildung 2: Schematische Aufbauanalyse einem latent thermischen Speicher mit Kapseln.....	26
Abbildung 3: Energiefluss latent-thermischer Speicher	28
Abbildung 4: Energiefluss der technischen Einrichtungen im System "Gebäude".....	29
Abbildung 5: Menü Fluidmischung im Polysun	31
Abbildung 6: Versuchsaufbau für Parameterstudie in Polysun	33
Abbildung 7: Versuchsaufbau für PCM-Test	42
Abbildung 8:Hydraulischer Aufbau des Versuchsspeichers in Polysun. Der Rücklaufanschluss des Heizkreislaufes wird in Polysun grafisch falsch dargestellt. Dieser befindet sich im 2. KV. Volumenangabe PCM: Nur Inhalt des Speicherelement. Zusätzliches Volumen in den Rohren, Wendel und Pumpe.	44
Abbildung 9: Hydraulischer Aufbau des Einfamilienhauses mit Gaskessel als Wärmequelle und sensibler thermischer Speicher.	46
Abbildung 10: Hydraulischer Aufbau des Einfamilienhauses mit WP, Photovoltaik und latent thermischer Speicher.	47
Abbildung 11: Temperaturverlauf Wasser von einer Woche.....	52
Abbildung 12: Detaillierter Temperaturverlauf Wasser über vier Tage.....	52
Abbildung 13: Temperaturverlauf Lade-Entlade-Zyklus vom PCM: PURETEMP58.....	53
Abbildung 14: Detaillierte Temperaturverlauf Lade-Entlade-Zyklus vom PCM: PURETEMP58	54
Abbildung 15: Temperaturverlauf Lade-Entlade-Zyklus vom PCM: SAT	55
Abbildung 16: Temperaturverlauf Lade-Entlade-Zyklus vom PCM: CCH.....	55
Abbildung 17: Temperaturverlauf des PCM in unterschiedliche Lage beim Ladevorgangs des Versuchsaufbaus ⁽²⁰⁾	56
Abbildung 18: Temperaturverlauf des Ladevorgangs in der Simulation inkl. PCM.....	57
Abbildung 19: Temperaturverlauf des Wärmeträgers beim Ladevorgang des Versuchsaufbaus ⁽²⁰⁾	58
Abbildung 20: Temperaturverlauf innerhalb einer PCM-Kugel beim Entladen ⁽²⁰⁾	58
Abbildung 21: Temperaturverlauf während der Entladevorgangs in der Simulation.....	59
Abbildung 22: Temperaturverlauf des Wärmeträgers während der Entladevorgangs im Versuchsaufbau in unterschiedlicher Höhe ⁽²⁰⁾	60
Abbildung 23: Ein simulierter Zyklus des PCM-Speichers in Polysun und damit auch die berechneten Maximal- und Minimaltemperaturen.	61
Abbildung 24: Zyklusvergleich Wasser / PCM.....	63
Abbildung 25: Temperaturkurven des thermisch sensiblen Speichers über zwei Tage	64
Abbildung 26: Temperaturverlauf bei einem latenten thermischen Speicher mit Wechseltemperatur von 58 °C über zwei Tage	65
Abbildung 27: Detailliertere Ansicht der unterbrochenen Ladephase.	66
Abbildung 28: Ladephase ohne Wärmepumpenausfall	66
Abbildung 29: Temperaturverlauf eines latenten thermischen Speichers mit Phasenwechseltemperatur von 53 °C über zwei Tage.....	67
Abbildung 30: Detaillierteres Bild der Temperaturschwankungen am Nachmittag im Speicher. Gut erkennbar sind die BWB-Bezüge zur vollen Stunde. Auch gut erkennbar ist das regelmässige Einschalten des Heizkreislaufes um die Solltemperatur von 20 °C im Gebäude zu erhalten.	68

Abbildung 31: Temperaturverlauf des Speichers beim Laden.	68
--	----

9.2 Tabellen

Tabelle 1: Parameterkategorien für die Definition von Basis-Fluiden.....	30
Tabelle 2: Parameterkategorien für Mischfluide in Polysun	32
Tabelle 3: Auswahl von Testfluide "Wasser" und deren veränderte Werte gegenüber dem Referenzfluid "Wasser"	34
Tabelle 4: Angaben der Berechnungsparametereinstellungen der Testreihe "Test". Die ersten fünf Zeilen entsprechen den Parametern im Katalog "Basisfluid", die restlichen Zeilen den Parametern im Katalog "Fluidmischung"	35
Tabelle 5: Berechnungsparametereinstellungen der Referenz-Fluide der Testreihe 2 mit Gegenüberstellung der Berechnungsparametereinstellungen von Wasser	36
Tabelle 6: Werte der Berechnungsparametern der letzten drei Testfluide mit Gegenüberstellung der Werte der Berechnungsparameter von Fluid "Wasser"	37
Tabelle 7: In Versuch verwendete PCMs und deren Eigenschaften.	42
Tabelle 8: Auszug von Ergebnissen aus der Testreihe 1 durch Anpassungen innerhalb des Parameters "Dampfdruck". Fluid "Wasser" als Referenz. Werte in kWh.	48
Tabelle 9: Auswahl an Ergebnisse von Testreihe 1 mit Veränderten Parameter zur Referenzreihe. Werte in kWh.....	48
Tabelle 10: Vergleich der Dichtewerte von Polysun mit Literaturwerten. Werte in kg/m ³	49
Tabelle 11: Vergleich der Berechnung der Dichte mit Literaturwerten. Werte in kg/m ³	50
Tabelle 12: Angabe von Sollwerten des Basisfluid-Parametern	50
Tabelle 13: Auswahl an Ergebnisse der Testreihe 2 und Angabe der veränderten Parameter gegenüber der Reverenz-Fluid. E und Q-Werte in kWh.	51
Tabelle 14: Berechnung und Werte aus dem Forschungsbericht	60
Tabelle 15: Kapazitätsberechnung anhand der Temperatur.....	61
Tabelle 16: Kapazitätswerte aus Polysun. Monatswerte linke Spalte, Zykluswerte rechte Spalte.....	62

9.3 Formeln

Formel 1: Energiebilanz eins offenen Systems	15
Formel 2: Massenbilanz thermischer Speicher.....	16
Formel 3: Energiebilanz thermischer Speicher.....	16
Formel 4: Entropiedefinition	17
Formel 5: Entropiebilanz	17
Formel 6: Wirkungsgrad thermischer Speicher	17
Formel 7: Stöchiometrie chemische Reaktion	18
Formel 8: Energiebilanz chemische Reaktion	18
Formel 9: Energiebilanz sensibler thermischer Speicher.....	19
Formel 10: Wärmestrom sensibel	19
Formel 11: Energiebilanz latent thermischer Speicher	20
Formel 12: Wärmestrom Latent.....	20
Formel 13: Vermutliche Polynomfunktion für Parameterberechnung in Polysun. A(T) entspricht Parameterkategorie (z.B. Dichte ρ)).	31
Formel 14: Gesamtkapazität Speicher	39

Formel 15: Masse Wärmeträger.....	39
Formel 16: Masse PCM	39
Formel 17: Kugeldurchmesser nach Kapselform.....	39
Formel 18: Kapselanzahl	39
Formel 19: Wendeloberfläche	40
Formel 20: Reibungswärme	49
Formel 21: Kapazität.....	49
Formel 22: Wärmetransport	49
Formel 23: Polynomfunktion	49

10 Erklärung zur Urheberschaft

Danksagung	Diese Arbeit wäre ohne die Unterstützung von einigen Personen nicht in dieser Form zu Stande gekommen. Herr M. Berger danke ich für die fachliche Unterstützung und Beratung während des Projektverlaufes. Frau P. Püntener danke ich für Ihre Unterstützung während der Literaturrecherche zu Phasenwechselmaterialien. Herr R. Waser danke ich für die zu Verfügungstellung von aktuellen Versuchsdaten eines latent thermischen Speichers und der Zustellung eines Forschungsberichtes, welche ich für diese Arbeit als Validierungsobjekt genommen habe. Des Weiteren möchte ich dem Supportteam von Vela Solaris danken für ihre Unterstützung zu den Problemen welche ich in den verschiedenen Simulationen hatte und ihre geduldigen Erklärungen zu verschiedenen Einstellungsoptionen in Polysun. Zuletzt möchte ich mich noch bei Frau K. Zalac danken, die so geduldig war, meine Arbeit nach grammatikalischem Fehler zu suchen.
Erklärung	Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter angefertigt habe. Ich habe nur die Hilfsmittel benutzt, die ich angegeben habe. Gedanken, die ich aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommen habe, sind kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.
Ort/Datum	Pfäffikon, 21. Januar 2021
Unterschrift	 Student: Markus Lacher

Anhang

- I Aufgabenstellung**
- II Pflichtenheft**
- III Projektplan**
- IV Anleitung PCM-Speicher für Polysun**
- V Elektronische Daten**