

MODELLIERUNG EINES PROTOTYPES EINES NEUARTIGEN SOLARTHERMIKOLLEKTORS MIT INTEGRIERTEM LATENTWÄRMESPEICHER IN TRNSYS

Jonas Spiegel, Birke Schröter, Svenja Carrigan, Oliver Kornadt

Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, E-Mail: jonas.spiegel@rptu.de

Kurzfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird ein Prototyp eines innovativen pfahlförmigen Solarthermiekollektors mit integriertem Speicher erforscht, der es ermöglichen soll, vor allem in der Winter- und Übergangszeit möglichst effizient solare Wärmeenergie zu sammeln und zu speichern. Dabei sollen die solaren Erträge aufgrund der vertikalen Ausrichtung und einer rundherum angebrachten Absorberfläche gerade bei niedrigem Sonnenstand optimiert werden. Der integrierte Latentwärmespeicher dient der verbesserten zeitlichen Bereitstellung der Wärmeenergie.

Um belastbare Voraussagen zur Energieeffizienz verschiedener Varianten des Pfahls bei unterschiedlichen Randbedingungen treffen zu können, wurden thermische Simulationen durchgeführt. Neben der Modellierung des zylinderförmigen Absorbers stellt die korrekte Berechnung des Verhaltens des Latentwärmespeichers eine besondere Herausforderung dar, die in diesem Paper näher beleuchtet wird.

Abstract

As part of a research project, a prototype of an innovative pile-shaped solar thermal collector with integrated storage is being investigated, which should make it possible to collect and store solar thermal energy as efficiently as possible, especially in the winter and transitional periods. Solar thermal yields are to be optimized due to the vertical orientation and an all-round absorber surface, especially when the sun is low. The integrated latent heat storage serves to improve the temporal provision of thermal energy.

In order to make reliable predictions about the energy efficiency of different variants of the pile under different boundary conditions, thermal simulations are essential. In addition to the modeling of the cylindrical absorber, the correct calculation of the behavior of the latent heat storage is a particular challenge, which will be examined in more detail in this paper.

Einleitung

In Zeiten des fortschreitenden anthropogenen Klimawandels und vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele der Bundesregierung für den Gebäudesektor, bekommt die Bewirtschaftung von Gebäuden mit erneuerbaren Energien immer mehr Relevanz. Dabei spielt die Versorgung mit Heiz-, aber auch in steigendem Maße mit Kühlenergie eine wichtige Rolle (Schröter, et al. 2023) (Blum, et al. 2023).

Im Projekt EffKon (EffKon 2023) (Friedrich 2023), wird zu diesem Zweck ein neuartiger Solarthermiekollektor mit integriertem thermischen Speicher entwickelt. Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit den Unternehmen Innogration GmbH, Panco GmbH, CuroCon GmbH und Betonwerk Büscher GmbH & Co.KG bearbeitet und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Im Unterschied zu flächig ausgestalteten Systemen, die seit langer Zeit am Markt verfügbar sind, wird hier eine andere Herangehensweise gewählt. Ein bis zu zehn Meter hoher, sogenannter "Energiepfahl" soll aufgrund seiner vertikalen Ausrichtung und rundherum angebrachten Absorberfläche vor allem bei niedrigem Sonnenstand effizient Solarenergie sammeln. Der integrierte Latentwärmespeicher ermöglicht eine Speicherung der gesammelten thermischen Energie für mehrere Stunden bis Tage und ermöglicht somit zeitverzögert die Bereitstellung von Wärmeenergie.

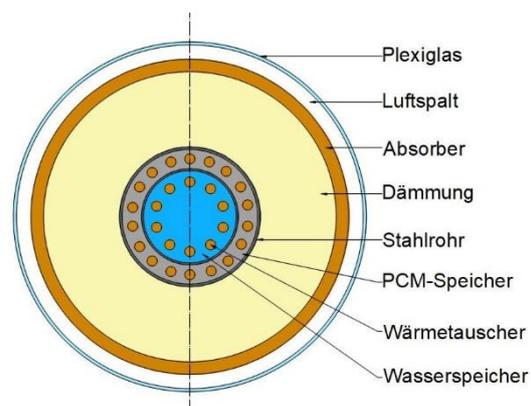


Abbildung 1: Schnittzeichnung des Energiepfahls

Der hier vorgestellte Prototyp wurde bereits früh in der Projektlaufzeit als Labordemonstrator an der RPTU in Kaiserslautern errichtet. Abbildung 1 zeigt den Aufbau des im Querschnitt. Der Labordemonstrator wurde als zylindrischer Pfahl ausgestaltet, der von einer Plexiglasröhre, zur Erzeugung eines Treibhauseffekts sowie zum Schutz vor der Witterung, ummantelt ist. Als Solarabsorber dient ein mattschwarz lackiertes Kupferrohr, welches spiralförmig um den gedämmten Pfahlkern gewickelt ist. Als Transportmedium für die gesammelte Wärmeenergie wird Wasser verwendet. Den tragenden Kern des Labordemonstrators und gleichzeitig thermischen Speicher bildet ein doppelwandiges Stahlrohr, in dessen äußerer Schicht ein Paraffinwachs als Phasenwechselmaterial (PCM) im Latentwärmespeicher eingebracht wurde. Im inneren Rohr dient Wasser als zusätzlicher sensibler Wärmespeicher. Die Wärmeübertragung erfolgt im Speicher ebenfalls über wasserführende Kupferrohre. Nähere Informationen zur Funktionsweise des Pfahls sind in (Schröter, et al. 2023) zu finden.

Simulation in TRNSYS

Simulationsansatz

Neben umfangreichen Messungen sind für die Entwicklung des Energiepfahls thermische Simulationen von besonderer Bedeutung. Damit sollen belastbare Voraussagen der Energieeffizienz verschiedener Entwürfe des Gesamtsystems unter variierenden Randbedingungen im Jahresverlauf sowie Untersuchungen von Anpassungen im Entwurf möglich werden. Hierfür wurde das Simulationsprogramm TRNSYS (Thermal Energy System Specialists 2019) gewählt. Es zeichnet sich dadurch aus, dass damit detaillierte thermische Gebäudesimulationen mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand möglich sind, wobei aufgrund der umfangreichen Modulbibliothek nahezu beliebige Szenarien in der Anlagentechnik abbildbar sind. Weiterhin bieten verschiedene Schnittstellen die Möglichkeit völlig eigene Module ("Types") zu programmieren.

Da der Labordemonstrator aufgrund seines Aufbaus hinsichtlich Geometrie und Verknüpfung mit dem Speicherkern nicht mit Hilfe der Standardbibliothek abgebildet werden kann, wurden hierfür mehrere neue Module für TRNSYS erstellt. Dafür wurde der Labordemonstrator in je ein Modul für Absorber, Speicher und Leitungen unterteilt, wobei in diesem Paper der Fokus auf dem Speicher liegt. Als besondere Herausforderung stellte sich hierbei die korrekte Modellierung des Temperaturverhaltens des PCM heraus.

Bei der Verwendung von PCM in thermischen Speichern wird ausgenutzt, dass sie bei einem Wechsel des Aggregatzustandes ohne nennenswerte Temperaturänderung große Mengen Energie

aufnehmen bzw. abgeben können. Für spezifische Temperaturbereiche sind sie daher mitunter deutlich effizienter als ein sensibler Temperaturspeicher, wie hier im Vergleich zu Wasser deutlich sichtbar ist (siehe Abbildung 2). Aus technischen Gründen wird dabei idR. der Wechsel zwischen fester und flüssiger Phase genutzt. Das hier verwendete Paraffinwachs hat seinen Schmelzpunkt bei $\sim 27-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Rubitherm Technologies GmbH 2020) bei einer gesamten Wärmespeicherkapazität von 250 kJ/kg im Bereich von $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naturgemäß ist die Verteilung der Enthalpie für das Erwärmen und Abkühlen des PCM versetzt, Energie wird also erst bei einer niedrigeren Temperatur freigesetzt als jene bei der sie aufgenommen wurde. Für die Modellierung der Speichertemperatur wurde hier eine mittlere Enthalpiekurve verwendet (siehe Abbildung 2). (Krohn, et al. 2022)

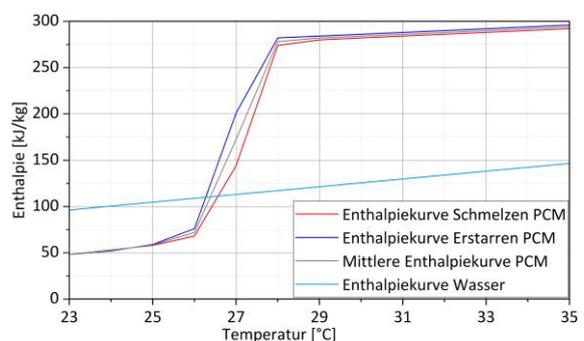


Abbildung 2: Temperaturabhängige Enthalpieverteilung vom verwendeten PCM sowie von Wasser

Umsetzung

Grundlegend besteht eine Simulation in TRNSYS aus einer Verbindung von mehreren Modulen. Diese repräsentieren jeweils eine Komponente des abzubildenden Systems und werden analog zum realen Aufbau des System miteinander verknüpft. Dafür hat jede Komponente unterschiedliche zeitabhängige Input- und Output-Größen sowie statische Parameter. In jedem Simulationsschritt berechnet TRNSYS für jede Komponente auf Basis der angegebenen Input-Werte und statischen Parameter neue Output-Werte, die dann ggf. an die nächste Komponente weitergegeben werden und dort für die Berechnung als Input verwendet werden. So wird das gesamte Systemverhalten im zeitlichen Verlauf simuliert.

Für die Berechnung des Speicherkerns wurde ein Berechnungsmodul in Python geschrieben, welches durch Type-3157 in TRNSYS integriert wird (Bernier, Marcotte und Kummert 2022). Dies hat den Vorteil, dass alle Prozesse innerhalb des Speichers in einem Simulationsschritt berücksichtigt werden und zudem eine Portierung in andere (TRNSYS-)Simulationen

einfach umsetzbar ist. Weiterhin ist eine Implementierung von ähnlichen Pfahlprototypen auf diese Weise mit wenig Aufwand möglich. Das Ziel war dabei ohne den Einsatz von FEM oder ähnlich rechenaufwändigen Methoden eine ausreichend genaue Modellierung des Speicherverhaltens zu erreichen.

Zunächst wurde dafür der Speicher in mehrere Bereiche unterteilt. Kopf- und Fußbereich des Speichers werden stark von Wärmebrücken beeinflusst, die vor allem durch die provisorische Natur des Prototypen bedingt sind. Für die Modellierung wird also der mittlere, weitestgehend ungestörte Bereich des Labordemonstrators verwendet. Entsprechend Abbildung 3 stehen die beiden Speichermaterialien PCM und Wasser untereinander, mit den angrenzenden Speicherbereichen sowie mit dem vor der Dämmung liegenden Absorber im Energieaustausch. Die modellierten Temperaturen im PCM und im Wasser können mit gemessenen Daten verglichen werden.

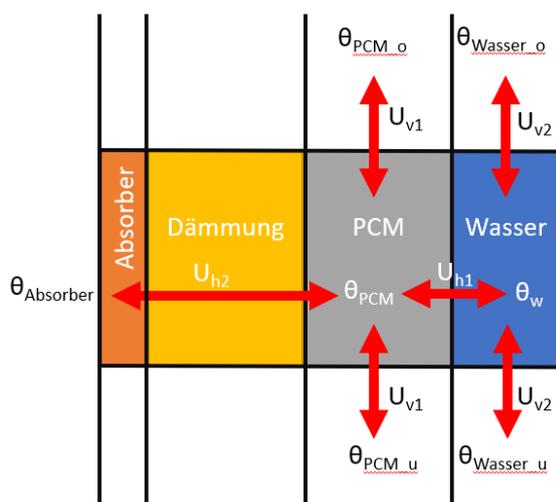


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Energieströme im modellierten Speicher mit zugehörigen Bezugstemperaturen und U-Werten (Wärmedurchgangskoeffizienten)

Grundsätzlich wird nun für jeden Zeitschritt (1 Minute) der Simulation unter der Annahme von stationären Bedingungen eine neue PCM- sowie Wassertemperatur ermittelt. Dafür wird zunächst auf Basis der zuletzt ermittelten Temperatur die aktuell im PCM gespeicherte Energie aus der gemittelten Enthalpiekurve abgelesen. Anschließend wird entsprechend untenstehender Gleichung 1 die im Zeitschritt transferierte Energie durch den Wärmetauscher (WT) berechnet.

$$dQ = q \cdot c_w \cdot dT \cdot \eta \quad [\text{kJ}] \quad (1)$$

Mit:

q = Durchflussrate im WT [kg/min]

c_w = spez. Wärmekapazität Wasser [4,185 kJ/kgK]

dT = Temperaturdifferenz zwischen WT und Speicher [K]

η = Faktor übertragbare Energie (0,25)

Der Übertragungsfaktor η stellt eine erste Näherung dar, die sich aus der Auswertung der bisherigen Messwerte ergeben hat. Im weiteren Verlauf der Forschungsarbeiten ist geplant, diesen Faktor näher zu untersuchen und anzupassen.

Mit Hilfe gemessener Werte der Absorbertemperatur, PCM-Temperatur im Kopf- und Fußbereich sowie der zuletzt errechneten Wassertemperatur im Mittelteil wird anschließend der Energieaustausch mit der Umgebung und den angrenzenden Speicherbereichen berechnet:

$$dQ = U_{vi} \cdot A \cdot dT \cdot \frac{60}{1000} \quad [\text{kJ}] \quad (2)$$

$$dQ = U_{hi} \cdot h \cdot dT \cdot \frac{60}{1000} \quad [\text{kJ}] \quad (3)$$

Mit:

U_{vi} = Wärmedurchgangskoeffizient vertikal [W/m²K]

U_{hi} = Wärmedurchgangskoeffizient horizontal [W/m²K]

A = Übertragungsfläche vertikal [m²]

h = Betrachtete Abschnittslänge vertikal [m]

dT = Temperaturdifferenz zwischen jeweiliger Speicher- und Bezugstemperatur [K]

Der Faktor 60/1000 resultiert aus der Einheitenumrechnung von W in kJ für die Simulationszeitschritte von einer Minute.

Die Summe aus gespeicherter, ab- und zugeführter Energie ergibt die aktuelle gespeicherte Energie, mit welcher die aktuelle Temperatur des PCM abgelesen wird. Analog dazu wird im Anschluss die Temperatur des Wasserspeichers berechnet.

Ergebnisse

Für eine Validierung der Berechnungen wurde zunächst der in Abbildung 4 dargestellte Zeitraum simuliert. In dieser Zeit wurden verschiedene Betriebszustände des Labordemonstrators durchgeführt. Zunächst wurde er im Rahmen von Abkühlversuchen künstlich aufgeheizt und abgekühlt um die Entladegeschwindigkeit des Speicherkerns zu untersuchen (25.04 – 28.04.23). Die Wasser- und PCM-Speicher (blau, grau) wurden hier durch einen Bypass angesteuert, das Wasser im Absorber stand still. Die Temperaturschwankungen im Absorber (gelb) sind daher ausschließlich auf die solare Einstrahlung und Außenlufttemperatur (türkis) zurückzuführen.

Nach den Abkühlversuchen lief der Labordemonstrator für mehrere Tage im Dauerbetrieb, d. h. die Pumpe lief Tag und Nacht bei konstanter Leistung. Absorber und Speicher wurden kontinuierlich nacheinander durchflossen, daher

hängen ihre Temperaturen eng miteinander zusammen.

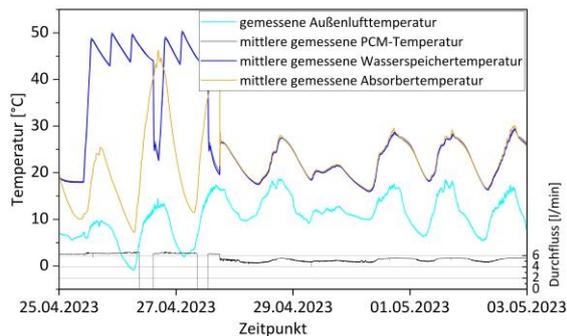


Abbildung 4: gemessene Temperatur in den beiden Speichermaterialien, an der Absorberoberfläche und in der Außenluft, sowie die Durchflussrate

Wie ausschnittsweise in Abbildung 5 dargestellt, zeigen die simulierten Temperaturen des PCM- wie auch Wasserspeichers im Dauerbetrieb bereits eine sehr gute Übereinstimmung. Die Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Werten der PCM-Temperatur schwanken zwischen 0,30 K und 0,55 K mit vereinzelt Spitzen bis 1,2 K. In diesem Betriebszustand dominiert die Energieübertragung durch das Wasser in den Wärmetauscherrohren das Temperaturverhalten der Speichermaterialien. Da die Abweichungen sowohl der berechneten Wasser- wie auch PCM-Temperaturen verhältnismäßig gleichmäßig sind, liegt die Vermutung nahe, dass hier die Energieaufnahme über- und/oder die Energieverluste unterschätzt werden.

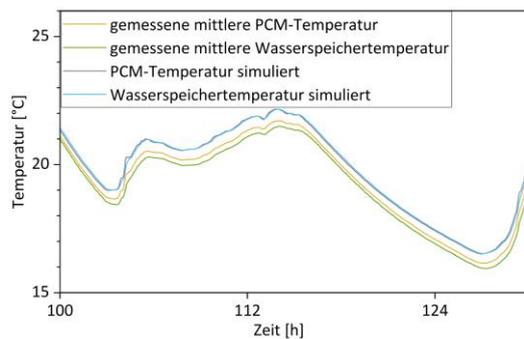


Abbildung 5: gemessene und simulierte Temperaturen in den beiden Speichermaterialien sowie zugehörige Durchflussrate – Ausschnitt 30.04.2023

Größere Diskrepanzen sind in den Zeiträumen mit ausgeschalteter Pumpe aufgetreten. Hier findet keine Energieübertragung durch den Wärmetauscher statt und der Wärmeaustausch der einzelnen Komponenten mit der Außenluft dominiert somit. In Abbildung 6 ist gut erkennbar, wie die Simulationswerte von den

Messwerten abweichen, sobald die Pumpe abgeschaltet wurde (Durchflussrate = 0).

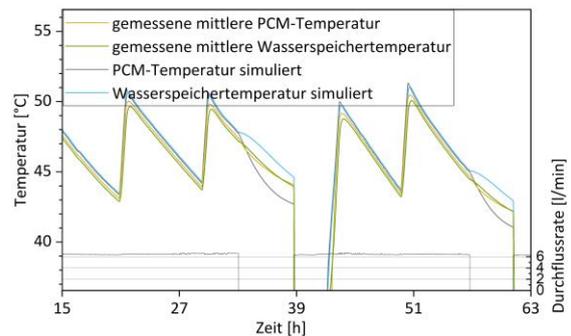


Abbildung 6: gemessene und simulierte PCM- und Wassertemperaturen sowie jeweilige Durchflussrate im Wasserkreislauf – Ausschnitt 26. – 27.04.2023

Zur genaueren Untersuchung dieser Zusammenhänge wurde ein weiterer Zeitraum nachsimuliert. In diesem wurde der Labordemonstrator zunächst künstlich auf über 40 °C erwärmt und danach die Pumpe ausgestellt und der Pfahl über mehrere Tage auskühlen gelassen. Während dieses natürlichen Abkühlvorganges werden die simulierten Speichertemperaturen ausschließlich durch die angrenzenden Speicherbereiche sowie die Temperaturen des an der Dämmung anliegenden Absorbers beeinflusst.

Abbildung 7 zeigt die gemessene und simulierte Temperatur im Wasserspeicher. Es ist zu erkennen, dass die Simulationswerte bereits sehr gut zu den gemessenen Werten passen und den Absorbertemperaturen, die als Referenztemperaturen für die Verlustberechnung angesetzt wurden, ähnlich stark folgen. Während der Aufheizphase zeigt sich eine kurzzeitige Überschätzung der Energieaufnahme des Speichers durch das Wasser im Wärmetauscher. Die Simulation des natürlichen Abkühlvorganges stimmt anschließend sehr gut mit den gemessenen Werten überein. Die durchschnittliche Abweichung beträgt 0,24 K.

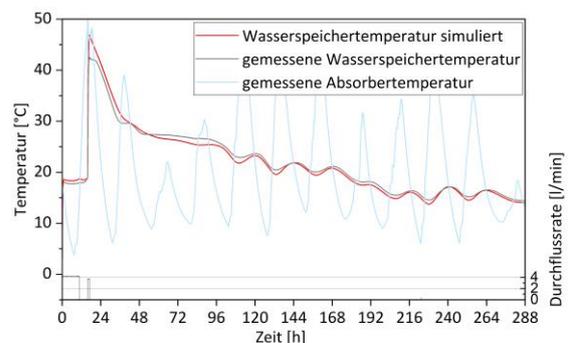


Abbildung 7: gemessene und simulierte Wassertemperatur während mehrtägiger Abkühlung

Die Überschätzung der Energieaufnahme im PCM-Speicher ist deutlich geringer, siehe Abbildung 8. Die simulierten Temperaturwerte zeigen im Abkühlvorgang jedoch eine größere Abweichung als die Werte des Wasserspeichers. Insgesamt scheinen die simulierten PCM-Temperaturen noch zu stark von den Absorbertemperaturen beeinflusst zu werden. Die durchschnittliche Abweichung beträgt für das PCM 0,70 K.

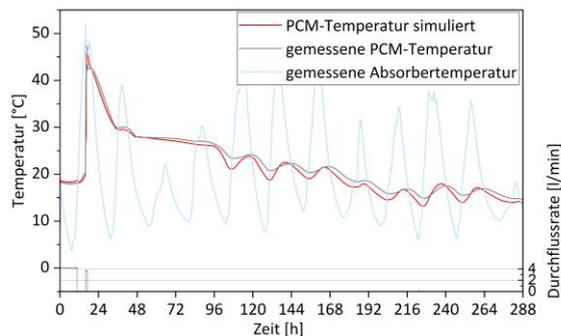


Abbildung 8: gemessene und simulierte PCM-Temperatur während mehrtägiger Abkühlung

Zusammenfassung

Um belastbare Voraussagen hinsichtlich des thermischen Verhaltens und energetischer Effizienz des hier vorgestellten Prototypen eines neuartigen Solarthermiekollektors mit Latentwärmespeicher treffen zu können, wurde mittels TRNSYS und Python ein Simulationsmodell entwickelt. Durch minutenweise stationäre Berechnung der Energiebilanz im Speicher unter Berücksichtigung der Einflüsse von über den Wärmetauscher zugeführter Energie sowie Austausch mit Umgebung und angrenzenden Speicherbereichen, ist eine sehr gute Abbildung des realen Temperaturverhaltens gelungen.

Die verbleibenden Abweichungen zwischen Mess- und Simulationswerten sind einerseits auf die Energieaufnahme über den Wärmetauscher im Speichermaterial zurückzuführen. Eine große Rolle spielt dabei der gewählte Transferfaktor. Hier in erster Näherung als konstant angenommen, ist dieser tatsächlich vor allem in Abhängigkeit von der Durchflussrate im Wärmetauscher veränderlich. In der fortlaufenden Forschungsarbeit ist geplant, dies zu genauer zu untersuchen.

Weiterhin stellt die stationäre Berechnung des Energieaustauschs mit Umgebung und angrenzenden Speicherbereichen über einzelne U-Werte eine Ungenauigkeit dar. Aufgrund des Aufbaus des Energiepfahls herrschen hier dynamisch wechselnde Bedingungen (fließendes Wasser in Absorber und Wärmetauscher mit wechselnden Temperaturen). Auch Prozesse innerhalb des Speichermediums wie Konvektion können so nicht abgebildet werden. Diese

Einflüsse werden derzeit untersucht, um sie in Zukunft besser berücksichtigen zu können.

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung.

Literatur

- Bernier, Nicolas, Bruno Marcotte, und Michael Kummert. *Calling Python from TRNSYS with CFFI*. Zenodo, 2022.
- Blum, Svenja, Svenja Carrigan, Dieter Platzek, und Oliver Kornadt. „Evaluation of the energy efficiency of an active thermoelectric façade.“ *Energy and Buildings* Vol 292, 01. 08 2023.
- EffKon. *EffKon - Effizientes Wärmespeicher- und Erzeugungssystem zur thermischen Konditionierung von Gebäuden*. 29. 12 2023. www.effkon.eu (Zugriff am 29. 12 2023).
- Friedrich, Thomas. *Energiesäule aus Beton als Beitrag zur Wärmewende*. 10 2023. <https://www.innogratiion.de/wp-content/uploads/delightful-downloads/2023/10/Energies%C3%A4ule-aus-Beton-als-Beitrag-zur-W%C3%A4rmewende-2.pdf> (Zugriff am 3. 12 2023).
- Krohn, Jonas, Svenja Carrigan, Thomas Friedrich, und Oliver Kornadt. „Implementierung neuartiger PCM-Speicher in TRNSYS zur Deckung des Heiz- und Kühlbedarfs.“ *BauSim2022*. Weimar, 2022.
- Rubitherm Technologies GmbH. *Rubitherm Datasheets*. 09. 10 2020. https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_RT28HC_DE_09102020.PDF (Zugriff am 15. 11 2023).
- Schröter, Birke, et al. „Energiegewinn und Energieeinspeicherung des Prototyps eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems.“ *Bauphysik* 5/2023, 2023: 245 - 251.
- Thermal Energy System Specialists, LLC. *TRNSYS*. 2019. www.trnsys.com (Zugriff am 15. 12 2023).