

## IMPLEMENTIERUNG NEUARTIGER PCM-SPEICHER IN TRNSYS ZUR DECKUNG DES HEIZ- UND KÜHLENERGIEBEDARFS

Jonas Krohn<sup>1</sup>, Svenja Carrigan<sup>1</sup>, Thomas Friedrich<sup>2</sup>, Oliver Kornadt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Kaiserslautern, Deutschland, E-Mail: jonas.krohn@bauing.uni-kl.de

<sup>2</sup> Innogration GmbH, Deutschland, E-Mail: th.friedrich@innogration.de

### Kurzfassung

Nachfolgender Beitrag zeigt die Implementierung von neuartigen PCM-Speichern in TRNSYS, die gekoppelt mit herkömmlichen Technologien zu einem möglichst energieautarken Gebäudegesamtsystem zur Temperierung von Gebäuden eingesetzt werden. Der Fokus liegt dabei auf dem Teilsystem zur Raumkühlung, bei dem dezentrale Speicher tageszyklisch Energie aufnehmen und zeitversetzt abgeben. Die Ergebnisse aus den Messungen im Labor sowie die Steuerung des Speichers über Algorithmen wurden über einen speziellen Type in das thermische Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS implementiert, wodurch sich das System vollständig nachbilden und analysieren ließ. Auf diese Weise konnte das Funktionsprinzip überprüft und Optimierungsmaßnahmen zur Effizienzsteigerung identifiziert werden.

### Abstract

The following article shows the results of measurement investigations and energetic simulations of novel PCM storage units, which are coupled with conventional technologies to form an overall building system that is as energy self-sufficient as possible for controlling the temperature of buildings. The focus is on the cooling part of the system, in which decentralized storage units day-cyclically absorb energy and release it with a time shift. The measurement results from the laboratory as well as the control of the storage unit via algorithms were implemented in the thermal building simulation program TRNSYS using a special type, which makes it possible to fully model and analyze the system. In this way, it was possible to verify the operating principle and identify optimization potentials to increase efficiency.

### Einleitung

Um die von der Bundesregierung definierte Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 zu erreichen, bedarf es auch im Gebäudesektor einer deutlichen Reduktion der Emissionen. (Presse und Informationsamt der Bundesregierung, 2022)

Gleichzeitig lässt sich feststellen, dass der Energieverbrauch zur Kühlung von Gebäuden deutlich zunimmt. So hat sich der Endenergieverbrauch zur Kühlung von Wohn- und Geschäftsgebäuden zwischen 1990 und 2016 weltweit um mehr als verdreifacht. Zurückführen lässt sich diese Entwicklung auf die fortschreitende Industrialisierung, den steigenden Wohlstand sowie den damit einhergehenden zunehmenden thermischen Komfortanspruch. (International Energy Agency, 2018)

Um die gesteckten Klimaschutzziele unter Berücksichtigung dieser Entwicklung zu erreichen, bedarf es neben dem Dämmen der Hüllfläche und der Nutzung effizienter Wärmeerzeuger in Verbindung mit erneuerbaren Energien an Speichersystemen, die über einen möglichst langen Zeitraum große Mengen an Energie auf einem bestimmten Temperaturniveau verlustarm speichern können, um Gebäude energieeffizient und möglichst autark betreiben zu können. (Krohn et al., 2019)

Eine vielversprechende Option stellen hier Latentwärmespeicher dar. Bei den dabei zur Anwendung kommenden Phase Change Materials (PCM) lassen sich die Schmelz- und Kristallisationsenthalpie nutzen, um Wärmeenergie aufnehmen und abgeben zu können, ohne das dabei die Temperatur des Speichers verändert wird. Die Phasenwechseltemperatur, bei der dieser Vorgang stattfindet, kann dabei in einem gewissen Temperaturbereich variabel eingestellt werden. So lässt sich diese an ein zur Verfügung stehendes Temperaturniveau anpassen, um Wärmeverluste zu reduzieren bzw. Energiequellen effizient nutzen zu können.

Aufgrund dessen wird ein Ansatz mit neuartigen PCM-Speichern (Friedrich, 2019) verfolgt. Gekoppelt mit herkömmlichen Technologien zu einem Gebäudegesamtsystem, soll es so möglich sein, überschüssige Energie aus der Umwelt zu gewinnen, einzuspeichern und zeitversetzt, wenn diese zur Temperierung des Gebäudes benötigt wird, wieder freizusetzen. Dabei wird zwischen kleineren dezentralen Speichern, die tageszyklisch zur Kühlung verwendet werden, und großen zentralen Speichern,

die saisonal zur Beheizung des Gebäudes eingesetzt werden, differenziert. (Krohn et al., 2019)

Der Fokus der nachfolgenden Ausführungen liegt auf den kleineren dezentralen Speichern. Platziert in Zwischendecken oder Fensterlaibungen, sollen diese überschüssige Wärmeenergie aus der Raumluft aufnehmen und somit eine Überhitzung verhindern. Die warme Raumluft wird dabei in einen Wärmetauscher geführt, in dem über einen Wasserkreislauf der Wärmeaustausch mit dem PCM-Speicher erfolgt. Die Raumluft wird bei diesem Vorgang heruntergekühlt und anschließend zurück in den Raum geführt. Der Wasserkreislauf erwärmt sich und belädt dadurch den Speicher. Um den Speicher zu entladen, wird nachts kühle Außenluft in die Anlage geleitet, die anschließend wieder nach draußen abgeführt wird. (Friedrich et al., 2019)

## Messungen und Simulationen

Um die Funktionsweise und Effizienz solcher Speicher, eingebettet in das Teilsystem zur Gebäudekühlung, über einen gesamten Jahresverlauf analysieren zu können, wurden diese zunächst im Labor messtechnisch untersucht. Der Fokus der Messungen lag auf der Bestimmung der für die Modellierung des Speichers erforderlichen Parameter. Hierbei handelt es sich um die aufgenommene und abgegebene Speicherenergie, die Be- und Entladungsleistung bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen sowie die Ermittlung der spezifischen Verluste. Verwendet wurde ein organisches PCM der Firma Croda International mit einer Schmelztemperatur von 21 °C, einer Kristallisationstemperatur von 19 °C und einer Latentwärme von 190 kJ/kg. (Croda International Plc, 2019) Von dem Material ließ sich eine Menge von 26 Liter in den Speicher einbringen. (Friedrich et al., 2021)

Hierzu wurde, wie in Abbildung 1 dargestellt, im Labor ein neuartiger PCM-Speicher über einen Wasserkreislauf an ein Temperiersystem angeschlossen. Zusammen mit einem Bypass war es möglich, den Speicher auf ein gewünschtes Temperaturniveau zu erwärmen bzw. herunterzukühlen, um ihn anschließend mit einer definierten Vorlauftemperatur zu ent- bzw. zu beladen. Neben einem Durchflusssensor im Wasserkreislauf wurden Temperatursensoren im Vor- und Rücklauf zum Speicher, im Bypass sowie an verschiedenen Stellen im Speicher angebracht. (Krohn et al., 2021)



Abbildung 1: Versuchsaufbau dezentraler Speicher

In der ersten Versuchsreihe wurde der Speicher vorab immer auf 26 °C erwärmt, was nach DIN V 18599-10 der maximalen Temperatur zur Auslegung der Kühlung (Deutsches Institut für Normung, 2016) entspricht, bevor er anschließend mit Temperaturen von 7 – 18 °C in 1-K-Schritten über einen Zeitraum von 24 h entladen wurde. Bei 26 °C ist beim Speicher für die untersuchte Anwendung von einer vollständigen Beladung auszugehen, da bei dieser Temperatur über den Speicher kein Beitrag mehr zu Raumluftkühlung geleistet werden kann. Der Temperaturbereich von 7 – 18 °C resultiert aus einer Häufigkeitsanalyse zu den nächtlich auftretenden Außenlufttemperaturen im Sommer für den Standort Potsdam (BBSR, 2014). Um bei den Versuchen gleichzeitig die auftretenden Verluste am Speicher untersuchen zu können, wurde sich auf den Zeitraum von 24 h festgelegt. Innerhalb der letzten zwei Stunden, die zur Auswertung der Kennzahl herangezogen wurden, hatte der Speicher bereits vollständig die Vorlauftemperatur des Wassers angenommen, so dass die Energie, die in diesem Zeitraum zugeführt bzw. entzogene wurde den auftretenden Verlusten an diesem entsprach. In einem weiteren Versuch wurde der Speicher vorab auf 7 °C heruntergekühlt bevor er anschließend mit einer Vorlauftemperatur von 26 °C beladen wurde. Um die Wärmeverluste über einen möglichst großen Temperaturbereich auswerten zu können, wurden darüber hinaus auch Be- und Entladungen mit Temperaturen um und oberhalb der Kristallisationstemperatur durchgeführt. (Friedrich et al., 2021)

Zusammen mit einer Simulation über das Wärmetransportsimulationsprogramm Voltra konnte auf diese Weise ein spezifischer Verlust am Speicher von 0,9 W/K ermittelt werden (Physibel, version 7.0w), der bei der Auswertung der Messdaten zur Speicherenergie sowie zur Be- und Entladungsleistung mit berücksichtigt wurde.

Abbildung 2 zeigt die dem Speicher entzogene Wärmeenergie bei unterschiedlichen Entladungstemperaturen (7 °C = lila,

18 °C = dunkelrot, dazwischen 1-K-Schritte) über einen Zeitraum von vier Stunden.

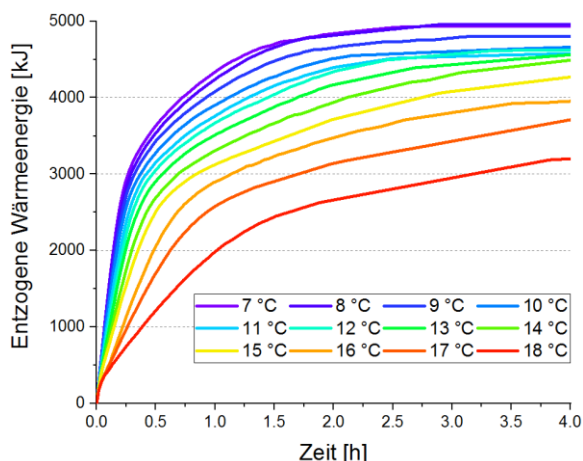


Abbildung 2: Entzogene Wärmeenergie bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen (Friedrich et al., 2021)

Es zeigt sich, dass sich der Speicher bei niedrigen Vorlauftemperaturen deutlich schneller und stärker entlädt als mit Temperaturen nahe der Kristallisationstemperatur von 19 °C. Zurückführen lässt sich dies auf die höhere Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Vorlauf sowie auf die sensible Wärme, von der bei niedrigeren Vorlauftemperaturen mehr entzogen werden kann. (Friedrich et al., 2021) Für die Gebäudesimulation wurden die Ergebnisse im Temperaturbereich auf Halbgrad-Werte interpoliert und die Temperatur des Wassers im Kreislauf entsprechend gerundet.

Zur Untersuchung des Teilsystems wurde exemplarisch für ein Nichtwohngebäude das in Abbildung 3 dargestellte Mehrzonenmodell verwendet. Es besteht aus vier geometrisch identischen Zonen mit Innenmaßen von 4 x 4 x 2,6 m und jeweils 2 m<sup>2</sup> Fensterfläche auf jeder Außenwand. Das Teilsysteme zur Gebäudekühlung wurde für die hervorgehobene Zone mit Südwestausrichtung untersucht. (Friedrich et al., 2021)

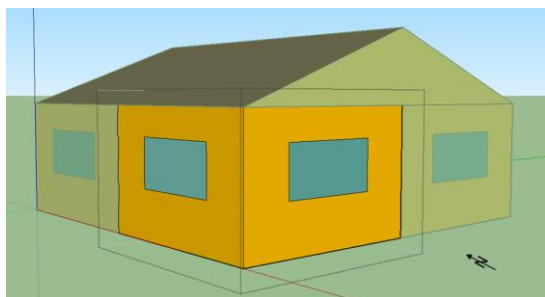


Abbildung 3: Untersuchte Zone des Modellgebäudes (University of Wisconsin, 2018)

Voruntersuchungen hatten gezeigt, dass es für einen effizienten Betrieb des Systems erforderlich ist, dass das Gebäude einen hohen energetischen Standard aufweist. Die in Tabelle 1 dargestellten Randbedingungen wurden in der Simulation verwendet. (Friedrich et al., 2021)

Tabelle 1: Randbedingungen der Gebäudesimulation

Wetterdatensatz	TRY2010_Jahr (Potsdam)
U-Werte	Passivhaus-Niveau
Lüftungsmechanismus	Lüftungsanlage mit WRG von 0,75
Taglüftung	erhöht mit 3 h <sup>-1</sup> nach DIN 4108-2
Nachtlüftung	erhöht mit 2 h <sup>-1</sup> nach DIN 4108-2
Verschattung	nach DIN 4108-2
Solltemperatur Kühlung	26 °C nach DIN V 18599-10
Interne Wärmelasten (Personen)	hoch mit 7 W/m <sup>2</sup> nach DIN V 18599-10
Interne Wärmelasten (Geräte)	hoch mit 15 W/m <sup>2</sup> nach DIN V 18599-10

Für die U-Werte der wärmeübertragenden Außenbauteile wurden Werte verwendet, wie sie für ein Passivhaus üblich sind. Ebenso wurde eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung modelliert, um den hygienischen Mindestluftwechsel sicherzustellen sowie um unter den gegebenen Voraussetzungen der DIN 4108-2 eine erhöhte Tag- und Nachtlüftung zu erreichen (Deutsches Institut für Normung, 2013). Andererseits wurden erhöhte interne Lasten nach DIN 18599-10 in Form von Personen und Geräten angenommen (Deutsches Institut für Normung, 2016), um eine konservative Betrachtung für das System vorzunehmen. (Friedrich et al., 2021)

Zur Modellierung des Systems wurden die einzelnen Komponenten über entsprechende Types in die grafische Benutzeroberfläche von TRNSYS eingefügt und zur Datenweitergabe miteinander verknüpft. Für den neuartigen PCM-Speicher wurde Type62 verwendet. Dieser greift zur Berechnung auf eine ausgelagerte Excel-Datei zurück. Über diese ließen sich die Daten aus den messtechnischen Versuchen im Labor zur Be- und Enladung mit unterschiedlichen Vorlauftemperaturen implementieren, die auftretenden Verluste berücksichtigen sowie die Programmierung des Speichers über Algorithmen vornehmen. Zur Steuerung des Speichers erhält dieser Informationen vom Gebäudemodell zur Raumlufttemperatur, vom Wetterdatensatz zur Außenlufttemperatur und von einem Type für die Rohrleitung (Type31) zur Wassertemperatur im Kreislauf.

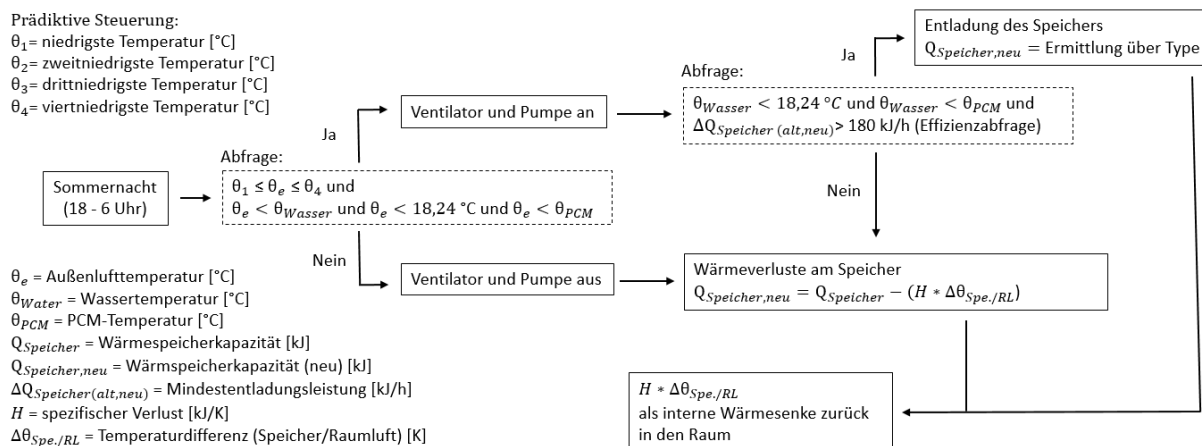


Abbildung 4: Programmierte Steuerung des Teilsystems zur potentiellen Entladung des Speichers über die nächtliche Außenluft

Eine Weitergabe von Daten erfolgt vom Speicher an den Luft-Wasser-Wärmetauscher, der durch Type91b abgebildet wird. Dieser erhält für seine internen Berechnungen die Temperatur des Wassers nachdem dieses den PCM-Speicher durchlaufen hat sowie die Außenluft vom Wetterdatensatz. Die Temperatur des Wassers nach Passieren des Wärmetauschers wird wiederum an Type31 weitergegeben, der mit dem Gebäude verknüpft ist, um die Leitungsverluste zu berücksichtigen, bevor das Wasser wieder zurück zum Speicher geführt wird.

Um den für den Betrieb der Anlage erforderlichen Strombedarf für Pumpe und Ventilator möglichst autark decken zu können, wurde zusätzlich eine Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher verwendet, die zur Stromgewinnung, -speicherung und Abgabe mit dem Wetterdatensatz und dem Type des Speichers verknüpft wurde. (Friedrich et al. 2021)

Um bei dem Datenaustausch der verschiedenen Komponenten einen Zirkelbezug zu vermeiden, war es erforderlich an einzelnen Stellen einen Type zur Verzögerung eines Simulationszeitschrittes zwischenschalten.

Abbildung 4 zeigt die Steuerung des Speichers in den Sommernächten (18 - 6 Uhr), die dazu dienen, den Speicher über die kühle Außenluft zu entladen. Im ersten Schritt wird abgefragt, ob die vorherrschende Außenlufttemperatur niedriger ist als die Temperaturen des PCM im Speicher und die des Wasserkreislaufes sowie, ob diese unter 18,24 °C liegt, was sich aus dem Runden der Wassertemperatur ergibt. Parallel wird in Form einer prädiktiven Steuerung zu jedem Zeitschritt abgefragt, ob die aktuelle nächtliche Stunde mit ihrer vorherrschenden Außenlufttemperatur einer der vier kältesten Stunden der jeweiligen Nacht entspricht. Diese Abfrage wurde geschaltet, um eine zu lange und damit

ineffiziente Entladung des Speichers aufgrund des dafür erforderlichen Strombedarfs für Pumpe und Ventilator zu verhindern. Sind diese Bedingungen nicht gegeben, wird die Anlage nicht eingeschaltet. Liegt die Speichertemperatur in diesem Fall unterhalb der Raumlufttemperatur, nimmt dieser auch im ausgeschalteten Zustand aufgrund seiner Platzierung innerhalb der wärmeübertragenden Umfassungsfläche unkontrolliert Wärme aus dem Raum auf und fungiert als interne Wärmesenke. Treffen oben genannte Voraussetzung jedoch zu, schaltet sich der Ventilator sowie die Pumpe ein. Das Wasser wird zunächst über einen Bypass am Speicher vorbei geführt. Erst wenn die Wassertemperatur auch niedriger als 18,24 °C liegt und der Speicher mindestens mit einer Leistung von 180 kJ/h entladen werden kann, wird das Wasser in den Speicher geführt. Abhängig von der Raumlufttemperatur nimmt der Speicher auch während dem Entladungsprozess unkontrolliert Wärme aus dem Raum auf oder gibt sie an den Raum ab.

Kommt es am Tag (6 - 18 Uhr) zu einer Überhitzung des Raumes (Temperaturen > 26 °C) entsteht ein Kühlenergiebedarf, der über das System gedeckt werden soll. In Abbildung 5 ist die dafür konzipierte Steuerung dargestellt. Im ersten Schritt findet ein Abgleich zwischen dem Kühlenergiebedarf und der noch aufnehmbaren Wärmeenergie im Speicher statt. Konnte der Speicher nachts zuvor nicht ausreichend entladen werden, kann der Raumluft keine Wärmeenergie in der erforderlichen Menge entzogen werden. Die Anlage läuft in diesem Fall bis das PCM vollständig beladen ist und schaltet sich anschließend aus. Während der Raum gekühlt wird, erwärmt sich das PCM im Speicher, sodass sich die neue zur Verfügung stehende Speicherkapazität aus einer Subtraktion der aktuellen Speicherkapazität abzüglich des Kühlenergiebedarfs und den Verlusten berechnet.

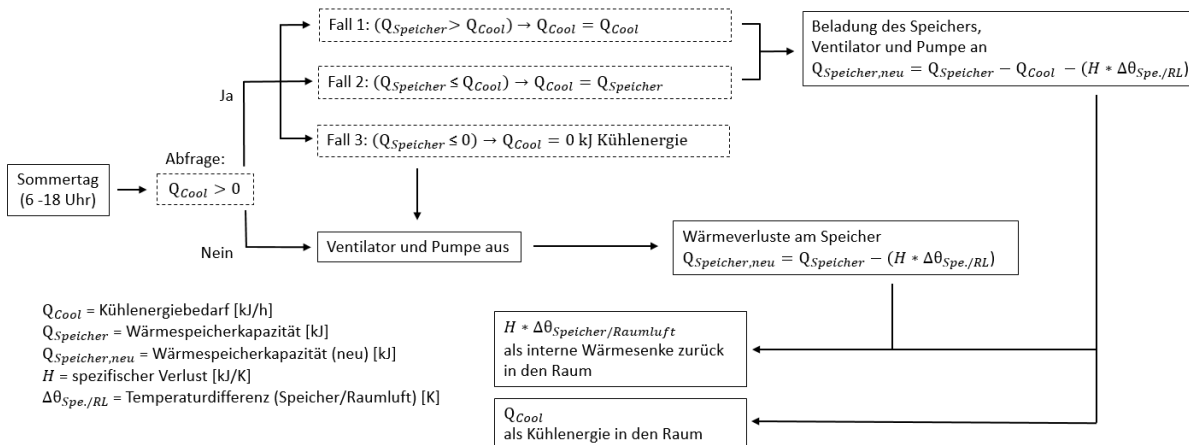


Abbildung 5: Programmierte Steuerung des Teilsystems zur potentiellen Beladung des Speichers bei vorhandenem Kühlenergiebedarf

## Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 6 zeigt exemplarisch vom 7. - 15. Juli den Temperaturverlauf der Raumluft (blau), der Außenluft (rot), des Wassers in den Leitungen hinter dem Wärmetauscher (schwarz) sowie vom PCM im Speicher (grün). Auf der rechten Ordinatenachse ist in pink der Kühlenergiebedarf in kJ/h aufgetragen.

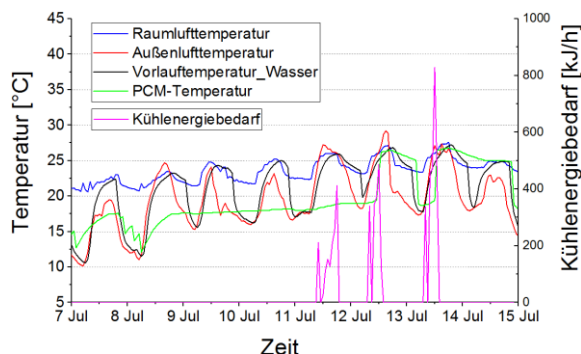


Abbildung 6: Funktionsweise des Teilsystems anhand verschiedener Temperaturen und des Kühlenergiebedarfs exemplarisch vom 7. – 15. Juli

Es lässt sich erkennen, dass während der kältesten nächtlichen Außenlufttemperaturen immer zuerst die Wassertemperatur sinkt bevor eventuell, bei ausreichend niedriger Temperatur, darüber der Speicher entladen wird. Nach abgeschlossener Entladung nimmt die Temperatur im PCM-Speicher aufgrund der Wärme die aus der Raumluft aufgenommen wird kontinuierlich zu. Im Bereich der sensiblen Wärme ist dabei ein deutlich steilerer Kurvenanstieg zu verzeichnen als im latenten Bereich, was sich zum einen bei den niedrigeren Speichertemperaturen auf die höhere Temperaturdifferenz zwischen der Speicher- und Raumlufttemperatur zurückführen lässt, sich zum anderen aber auch durch die deutlich geringere sensible Wärme im Vergleich zur Latentwärme

ergibt. In der Nacht zum 7. Juli konnte der Speicher auf ca. 13 °C entladen werden. Tagsüber lag die Raumlufttemperatur jedoch nur bei maximal 23 °C, so dass ein Betrieb der Anlage nicht erforderlich war. Aufgrund des Wärmetransports erwärmte sich der Speicher über den Tag auf ca. 17,5 °C. Im Zeitraum vom 9. – 12. Juli waren die nächtlichen Außenlufttemperaturen nicht mehr niedrig genug um darüber den Speicher zu entladen. Die Temperatur des Speichers lag in diesem Zeitraum im latenten Bereich des PCM. Am 11. Juli ließ sich über das System der Kühlenergiebedarf decken, bevor die Speicherenergie am 12. Juli nicht mehr ausreichte um eine Überschreitung der 26 °C Raumlufttemperatur zu verhindern. (Friedrich et al., 2021)

Insgesamt ließ sich für die betrachtete Zone auf diese Weise eine Nutzenergieeinsparung über das Jahr von 67.189 kJ (18,66 kWh) erreichen. Die Anzahl der Übertemperaturgradstunden lag dabei mit 133 Kh/a um 107 Kh/a niedriger als ohne das Kühlsystem und deutlich unter dem Maximalwert von 500 Kh/a für Nichtwohngebäude (Deutsches Institut für Normung, 2013). Über die PV-Anlage, für die ein gängiges 1,75 m<sup>2</sup> großes Siliziummodul mit 60 in Reihe geschalteten Zellen zusammen mit einer Batterie von 0,2 kWh Speicherkapazität angesetzt wurde, ließ sich ca. 65 % des anfallenden Strombedarfs für Pumpe und Ventilator decken. Der Stromverbrauch wurde bei diesen beiden Geräten mit 45 W bzw. 50 W angesetzt. (Friedrich et al., 2021)

Durch die prädiktive Steuerung des Speichers ließ sich bereits eine erste Optimierungsmaßnahme des Speichers umsetzen, um die Effizienz während der nächtlichen Entladung zu steigern. Weiteres Potential besteht darin, den Speicher nachts nur zu entladen, wenn die Wärmekapazität am darauffolgenden Tage zur Kühlung des Raumes benötigt wird. Die Wärmeenergie, die vom Speicher aufgrund seiner Platzierung innerhalb der thermische Hülle, unkontrolliert aus der Raumluft aufgenommen wird

trägt zwar zu einer passiven Kühlung des Gebäudes bei, jedoch wäre eine bessere Dämmung des Speichers erstrebenswert, um größere Energiemengen zielgerichtet aufnehmen zu können. Wie sich in Abbildung 6 erkennen lässt, besteht ein wesentliches Problem darin, dass die nächtlichen Außenlufttemperaturen, speziell während mehreren aufeinanderfolgenden warmen Tagen, teilweise nicht ausreichen, um den Speicher über den Wasserkreislauf unter die Kristallisationstemperatur zu entladen. Für den nächsten Tag steht in diesem Fall keine ausreichende Wärmekapazität zur Kühlung des Raumes zur Verfügung, so dass es zur Überhitzung kommt. Hierzu wird untersucht, inwiefern das erforderliche Temperaturniveau beim Entladen durch die Verwendung von Peltier-Elementen, bei denen es sich um thermoelektrische Wärmepumpen auf Basis von kleinen Halbleitern handelt (Blum et al. 2020), erreicht werden kann. Der Strombedarf der Peltier-Elemente soll über zusätzliche PV-Module gedeckt werden.

## Zusammenfassung

Im thermischen Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS konnte erfolgreich ein Teilsystem zur Raumkühlung, welches neuartige PCM-Speicher beinhaltet, nachgebildet werden. Speziell der Type62 eignete sich hervorragend, um die im Labor gemessenen Werte zu implementieren sowie die Algorithmen zur Steuerung des Speichers zu programmieren. So konnte die Funktionsweise und Effizienz des Teilsystems analysiert und bewertet werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass weitere Optimierungen am Teilsystem erforderlich sind.

## Danksagung

Dieses Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 01LY1810B "Flexibles Wärmespeicher- und Verteilsystem zur autarken Beheizung und Kühlung von Gebäuden - FlexSpeicher" gefördert.

## Literatur

- Blum, T., Carrigan, S., Platzek, D., Kornadt, O. 2021. Entwicklung eines thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems mit hohem Wirkungsgrad, Tagungsband BauSIM 2020, Graz, Österreich
- Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR) 2014. TRY2010
- Croda International Plc 2018. Product data sheet CrodaTherm 21, URL: <https://www.crodaenergytechnologies.com/en->

[gb/product-finder/product/979-CrodaTherm\\_1\\_21](https://www.crodaenergytechnologies.com/en-gb/product-finder/product/979-CrodaTherm_1_21) (Abgerufen am 26.11.2019)

- Deutsches Institut für Normung 2013. DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Berlin
- Deutsches Institut für Normung 2016. DIN V 18599-10:2016-10: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz- End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Berlin
- Friedrich, T. 2019. Mobiles Luftklimagerät mit Latentwärmespeicher. Offenlegungsschrift DE 10 2017 122 149 A1
- Friedrich, T.; Groh, S. 2019. Effiziente Be- und Entladung von PCM-Speicher ohne jegliche Verkapselung. Tagungsband Bauphysiktage 2019, Weimar
- Friedrich, T., Kornadt, O., Carrigan, S., Krohn, J. 2021. Flexibles Wärmespeicher- und Verteilungssystem zur autarken Beheizung und Kühlung von Gebäuden (FlexSpeicher), Projektabschlussbericht 2021
- International Energy Agency 2018. The Future of Cooling, Opportunities for energy-efficient air conditioning, Paris, France
- Krohn, J., Carrigan, S., Friedrich T., Kornadt, O. 2021. Energy efficient heating and cooling ventilation system with integrated PCM heat storage units, In: Proceedings, 15th ROOMVENT Conference 2020, Turin, Italy
- Krohn, J., Carrigan, S., Friedrich T., Kornadt, O. 2019. Flexibles Wärmespeicher- und Verteilungssystem zur autarken Gebäudetemperierung, Tagungsband Bauphysiktage 2019, Weimar
- Physibel. VOLTRA version 7.0w: computer program to calculate 3D & 2D transient heat transfer in objects described in a rectangular grid using the energy balance technique, Gent, Belgien
- Presse und Informationsamt der Bundesregierung 2022. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/buerokratieabbau/sofortprogramm-klimaschutz-1934852> (Abgerufen am 17.02.2022)
- University of Wisconsin 2018. TRNSYS 18 version 18.01.0000: Transient System Simulation Tool, Madison, USA