

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES POTENTIALS EINES NEUARTIGEN WÄRMESPEICHER- UND ENERGIEERZEUGUNGSSYSTEMS

Birke Schröter¹, Jonas Spiegel¹, Svenja Carrigan¹, Oliver Kornadt¹

¹ Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern Landau

Kurzfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde der Prototyp eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems für Gebäude entwickelt und untersucht. Die Energiegewinnung erfolgt über die Erwärmung von wasserdurchflossenen Kollektoren durch auftreffende Solarstrahlung. Eine Steuerung ermöglicht im Anschluss entweder die direkte Nutzung der gewonnenen Energie oder die Einspeicherung in den im Pfahl integrierten Speichern.

Bei den experimentellen Untersuchungen stand zum einen die Eignung des Prototyps zum Beheizen von Gebäuden im Vordergrund. Darüber hinaus wurde für den Kühlfall untersucht, ob ein überhitztes Gebäude durch die Kollektorfläche des Prototyps innerhalb der kühlen Nachtstunden abgekühlt werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Prototyp großes Potential besitzt, aber im Projekt eine Weiterentwicklung notwendig ist, um eine wirtschaftliche Option darzustellen.

Abstract

The prototype of a new type of heat storage and energy generation system for buildings was developed and investigated as part of a research project. Energy is generated by heating collectors through which water flows using incident solar radiation. Then a control system enables either direct use of generated energy or storage in the storage units integrated in the pile.

The experimental investigations focused on the suitability of the prototype for heating buildings. Additionally for the cooling case was investigated whether an overheated building can be cooled by the collector surface of the prototype during cool night hours.

Results show that the prototype has great potential, but that further development in the project is necessary in order to present an economic option.

Einleitung

Der Energiebedarf in Privathaushalten war im Jahr 2020 in Deutschland für rund 28,9 % Prozent des Endenergiebedarfs verantwortlich. Der Verbrauch in diesem Sektor ist somit sogar höher als der des Verkehrs- und Industriesektors (BMWK, 2022). Bei der in Haushalten benötigten Endenergie wird der Großteil für das

Beheizen der Gebäude verwendet. In deutschen Wohngebäuden macht dieser Bedarf rund 68,3 % Prozent des Energiebedarfs aus. Allerdings ist auch der steigende Bedarf der Gebäudekühlung bei Überhitzung in den Sommermonaten nicht zu missachten. Aktuell werden dafür in Haushalten 0,2 % und in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen 1,2 % des Endenergiebedarfs benötigt, allerdings steigt der Bedarf seit 1996 stetig an. (BMWK, 2022) Es wird jedoch prognostiziert, dass bei gleichbleibendem Stand der Technik und unter Berücksichtigung des Klimawandels mit einer wesentlichen Mehraufwendung von Energie zu rechnen ist (Bettgenhäuser et al., 2011). Aufgrund des voranschreitenden Klimawandels und den daraus resultierenden politischen Forderungen, wie der Klimaneutralität des Gebäudesektors bis 2050, muss an einer nachhaltigen Bereitstellung der benötigten Energie gearbeitet werden. Es ist von großer Bedeutung auch neue nachhaltige Methoden zu entwickeln, um sowohl die Gebäudeheizung als auch die -kühlung auf klimaneutrale Weise sicherstellen zu können.

Eine mögliche Lösung sollen die sogenannten Energiepfähle bieten, die im Rahmen des Forschungsprojektes „EffKon – Effizientes Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystem zur thermischen Konditionierung von Gebäuden“ (EffKon, 2023, Friedrich, 2023) entwickelt und untersucht werden. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert und gemeinsam mit den Unternehmen Innogration GmbH, Panco GmbH, CuroCon GmbH und Betonwerk Büchner GmbH & Co. KG bearbeitet. Die Energiepfähle ermöglichen sowohl die Energieerzeugung als auch die Energieeinspeicherung in einem autarken System. Außerdem soll überschüssige Wärmeenergie im tages- und jahreszeitlichen Zyklus gespeichert und nutzbar gemacht werden können sowie Gebäudeüberhitzungen vermieden werden. Durch die Energiepfähle soll die Energie zur Gebäudetemperierung auf klimaneutrale Weise sichergestellt werden. Eine weitere Besonderheit ist die Verwendung von Speichersystemen mit unterschiedlichen Temperaturniveaus. Dazu wird zum einen ein Phasenwechselmaterial (engl. phase change material, PCM) im Pfahlspeicher verwendet. PCM sind Latentwärmespeicher, bei denen der Phasenwechsel dazu benutzt wird, dass ohne eine Temperaturänderung des Materials Wärmeenergie gespeichert wird (Krohn et al., 2022; Bilgin et al., 2017; Friedrich et al., 2014).

Zusätzlich werden Peltier-Elemente eingesetzt, um kleine Temperaturunterschiede zu überwinden und somit beispielsweise eine benötigte Vorlauftemperatur zu erreichen. Peltier-Elemente sind elektrothermische Wandler, die bei einem Stromdurchfluss eine Temperaturdifferenz erzeugen können (Blum et al., 2023).

Darüber hinaus könnten die Energiepfähle sowohl mit Photovoltaik als auch mit einer Windturbine ausgestattet werden. Die dadurch gewonnene Energie soll zum einen den Ertrag maximieren, aber auch den Betrieb des Pfahls sicherstellen. Dabei soll eine maximale Höhe des Energiepfahls von 10 m nicht überschritten werden, damit zur Errichtung der Pfähle keine Baugenehmigung erforderlich ist.

Aufbau des Prototyps

Um die Wirkungsweise der geplanten Energiepfähle untersuchen zu können, wurde ein Prototyp errichtet. Der Prototyp weist eine Höhe von 2 m auf. Er ist zylindrisch aufgebaut und besitzt einen Gesamtdurchmesser von circa 60 cm. Den Kern des Pfahls bildet ein doppelwandiges Stahlrohr, dessen Kammern die Wärmespeichermedien fassen. In der inneren Kammer befindet sich Wasser und in der äußeren Kammer PCM. In beiden Speichermedien befinden sich vertikale Rohrschlangen aus Kupfer, welche von Wasser durchflossen werden und somit die Speicher aktivieren. Um die Wärmeverluste des Speichers zu minimieren ist das äußere Stahlrohr mit einer Dämmung aus Mineralwolle gedämmt. Vor der Dämmung ist eine wasserführende, eng gedrehte Kupferspirale über die gesamte Pfahlhöhe angebracht, die als Solarabsorber dient. Eine schwarze Beschichtung der Spirale erhöht den Absorptionsgrad, um die Wirkweise der Absorberspirale zu verbessern. Die gesamte Konstruktion ist von einer Röhre aus Plexiglas eingehaust, die zum einen die Konstruktion vor Umwelteinflüssen schützt, zum anderen auch durch die Nutzung des Treibhauseffekts zu einer Maximierung der Erträge beiträgt (Abbildung 1, Abbildung 2).

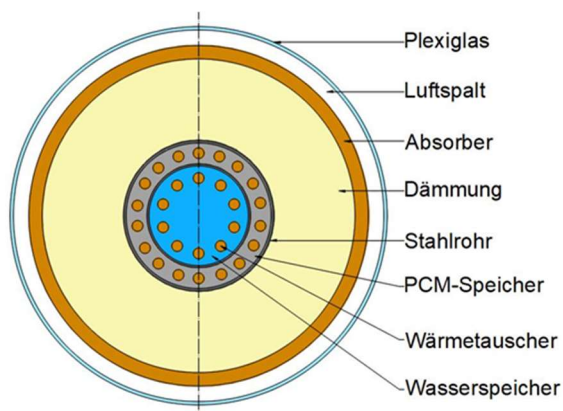


Abbildung 1: Querschnitt des Prototyps

Die Temperatur der Kupferspirale und somit auch des Wassers darin wird durch die auftreffende Solar-

strahlung erhöht. Durch Wärmetauscher im PCM- und im Wasserspeicher kann das erwärmte Wasser Wärmeenergie einspeichern. Dabei wird zuerst der PCM-Speicher und anschließend der Wasserspeicher angesteuert.



Abbildung 2: Prototyp des Energiepfahls

Messaufbau und Durchführung

Für den Messaufbau wird der Prototyp mit einem Pufferspeicher erweitert, welcher sowohl einen Abnehmer für die gewonnene Energie simulieren als auch für unterschiedliche Untersuchungen temperiert werden kann, um eine definierte Vorlauftemperatur zur Verfügung zu stellen.

Die Durchführung der Versuche kann je nach Untersuchung durch unterschiedliche Wasserkreisläufe erfolgen. Dazu steht auch eine Steuerung zur Verfügung, die es über die Regelung der Pumpe und zwei

ansteuerbare Ventile ermöglicht, die unterschiedlichen Wasserkreisläufe anzusteuern.

Bei der Energieeinspeicherung wird das Wasser in Abhängigkeit von den Temperaturen im Prototyp unterschiedlich geleitet. Ist die Temperatur in der Absorberspirale geringer als die Temperatur im Speicherkern, ist die Pumpe ausgeschaltet, sodass sich das Wasser in der Absorberspirale erwärmen kann. Sobald dort die Temperatur höher ist als die Temperatur im Speicherkern, wird die Pumpe eingeschaltet und das Wasser zirkuliert innerhalb des Pfahls. Hat der Pfahlspeicher eine Temperatur von 30 °C erreicht, wird der Wasserkreislauf geändert, damit der Pufferspeicher zusätzlich zur Einspeicherung verwendet werden kann. Das Wasser wird vom Pufferspeicher durch die Kupferspirale, die Wärmetauscher im PCM- und Wasserspeicher und wieder zurück zum Pufferspeicher gepumpt. Bei Nacht und einer Pfahlspeichertemperatur höher als 30 °C kann der Energiepfahl entladen werden. Dafür wird die Absorberspirale durch einen Bypass übergangen und das Wasser wird vom Pufferspeicher durch den PCM- und Wasserspeicher und wieder zurück zum Pufferspeicher gepumpt.

Zur Untersuchung der Kühlung wird grundsätzlich der Speicher des Pfahl-Prototyps umgangen. Tagsüber zirkuliert das Wasser nur innerhalb der Absorberspirale. Parallel dazu kann der Pufferspeicher separat temperiert werden, um ein überhitztes Gebäude zu simulieren. Nachts und bei Temperaturen in der Kupferspirale, die geringer sind als die Temperaturen im Pufferspeicher, wird das Wasser vom Pufferspeicher durch die Kupferspirale und wieder zurück zum Pufferspeicher gepumpt. Sind die Temperaturen in der Spirale noch zu hoch, zirkuliert das Wasser weiter nur innerhalb der Absorberspirale. So kann Wärme an die Außenluft abgegeben werden, sollte die Temperatur in der Absorberspirale höher sein als in der Außenluft.

Zum Messen der Temperaturen im Prototyp wurden sowohl innerhalb der Schichten als auch an den Schichtgrenzen Sensoren verbaut. Um abweichende Temperaturen in Höhe und Ausrichtung zu erfassen, wurden die Sensoren jeweils in drei unterschiedlichen Höhen - am Pfahlfuß, auf mittlerer Höhe und am Pfahlkopf - und in Richtung der unterschiedlichen Himmelsrichtungen platziert. Darüber hinaus wird das Außenklima durch Messungen der Außenlufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Globalstrahlung festgehalten und die Durchflussgeschwindigkeit im Wasserkreislauf, jeweils im Vor- und im Rücklauf, gemessen.

Eignung des Prototyps des Energiepfahls zum Heizen

Der Energiegewinn wird über die gemessene Temperaturerhöhung über die gesamte Länge der Absorberspirale bestimmt. Der daraus resultierende Energiegewinn kann tagesweise in Abhängigkeit von der gemessenen Globalstrahlung gesetzt werden, um Rück-

schlüsse auf den jährlichen Energieertrag zu ziehen. Dieser Hochrechnung liegt das Testreferenzjahr TRY2015 am Standort Kaiserslautern zugrunde. Dieses Verfahren wird auch zur Bestimmung der möglichen Energieeinspeicherung im jahreszeitlichen Verlauf verwendet. Dabei wird die Temperaturdifferenz am Ein- beziehungsweise Auslass des im Prototyp integrierten Speichers zur Berechnung herangezogen. Aufgrund der Speichergöße kann konservativ eine maximale Energieeinspeicherung von 3 kWh pro Tag angenommen werden, unter der Annahme, dass der Prototyp in der Nacht wieder komplett entladen wird. In einer Versuchsreihe zur Entladung zeigte sich, dass eine vollständige Entladung des Prototyps in unter 6 Stunden möglich ist.

Hochgerechnet können im Jahr somit 762,9 kWh Energie gewonnen werden. Der Hauptanteil resultiert dabei aus den Sommermonaten (365,1 kWh) und der Übergangszeit (304,0 kWh). Die gleiche Verteilung zeigt sich auch bei der Energieeinspeicherung. Allerdings können jährlich aufgrund der Begrenzung des Speichers nur 658,5 kWh der gewonnenen Energie eingespeichert werden (Abbildung 3).

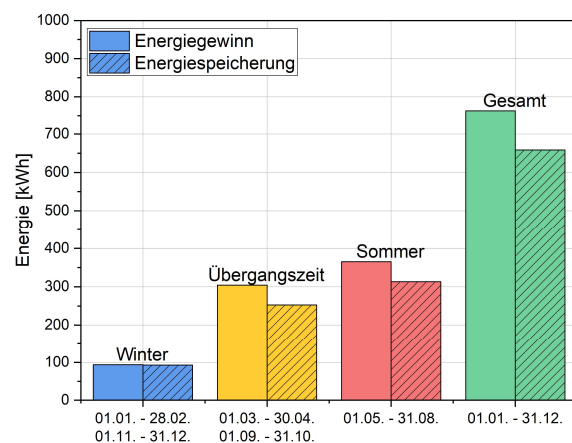


Abbildung 3: Prognostizierter Energiegewinn und Energieeinspeicherung des Prototyps nach einzelnen Jahreszeiten und Gesamt

Bei der Auswertung der Daten zeigt sich, dass der Energiegewinn und damit auch die mögliche Energieeinspeicherung des Prototyps im Wesentlichen von der zur Verfügung stehenden Globalstrahlung abhängig ist. Grundsätzlich gilt, dass bei einer höheren Tagessumme an Strahlung auch mehr Energie gewonnen werden kann. Die auftretende Globalstrahlung kann in einen diffusen und einen direkten Anteil aufgeteilt werden, wobei der Prototyp die Direktstrahlung besser nutzen kann. Nach aktuellem Stand scheint die Außenlufttemperatur hingegen keinen signifikanten Einfluss auf den Energiegewinn beziehungsweise die Energieeinspeicherung zu haben. Bei der Entladung des Prototyps spielt vor allem die Vorlauftemperatur des Wassers eine Rolle. Wird die Vorlauftemperatur gesenkt, sinkt auch die Entladedauer. Ebenso kann die

Entladung durch eine Erhöhung der Durchflussgeschwindigkeit beschleunigt werden.

Um den Energiegewinn des Prototyps einordnen zu können wird der monatliche Gewinn im Jahresverlauf mit dem Ertrag einer Solaranlage zur Heizungsunterstützung gegenübergestellt (Abbildung 4). Der Ertrag einer solchen Vergleichsanlage variiert je nach Auslastung zwischen 250 – 400 kWh/(m²a) (Schabbach und Leibbrandt, 2021). Die monatliche Verteilung resultiert aus der Simulation einer Solaranlage im Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS der ebenfalls das TRY2015 am Standort Kaiserslautern zugrunde liegt. Es zeigt sich, dass der Prototyp in seiner Ausführung bereits gute Ergebnisse erzielt. Der gesamte Jahresertrag des Prototyps liegt mit 220,49 kWh/m² nur knapp unter dem der handelsüblichen Solaranlage zur Heizungsunterstützung. Dabei liegt vor allem in den Sommermonaten der Ertrag unter dem Vergleichsertrag. In den Winter- und Übergangsmonaten werden die Vergleichserträge erzielt bzw. zum Teil übertroffen.

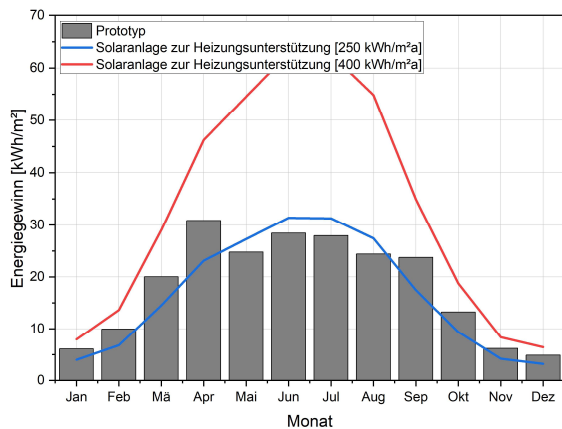


Abbildung 4: Monatsweiser Vergleich des prognostizierten Energiegewinns des Prototyps mit dem Ertrag einer Solaranlage zur Heizungsunterstützung

Optimierungsbedarf besteht vor allem hinsichtlich der Energieeinspeicherung und des Energiebedarfs im jahreszeitlichen Rhythmus. Die mögliche Einspeicherung des Prototyps in den Wintermonaten ist nicht ausreichend, um genug Energie zum Heizen zur Verfügung zu stellen. In den Sommermonaten hingegen, wenn genug Solareinstrahlung vorhanden ist, produziert der Energiepfahl überschüssige Energie, die aufgrund der fehlenden Nachfrage nicht zum Heizen genutzt wird. Hier ist die Ergänzung durch einen saisonalen Speicher sinnvoll.

Die detaillierten Berechnungen zur Bestimmung der Eignung des Pfahls zum Heizen wurden bereits in Schröter et al. (2023) veröffentlicht.

Eignung des Prototyps des Energiepfahls zum Kühlen

Um das Potential des Prototyps hinsichtlich der Gebäudekühlung zu untersuchen, wurde die automatische Steuerung aus den vorherigen Untersuchungen erweitert. Durch die Messung der Beleuchtungsstärke kann zwischen Tag und Nacht unterschieden werden. Tagsüber ist die Pumpe ausgeschaltet und der Pufferspeicher wird zur Simulation eines überhitzten Gebäudes auf circa 30 °C temperiert. Nachts zirkuliert das Wasser nur in der Absorberspirale, bis die Temperatur des Wassers unter der Pufferspeichertemperatur liegt. Dann wird das Wasser durch die Absorberspirale und anschließend in den Pufferspeicher gepumpt, um diesen abzukühlen. Der integrierte Speicherkern wird bei diesem Versuch immer übergangen. Die Durchflussgeschwindigkeit bleibt bei allen Versuchsabläufen unverändert. Bei der Auswertung der Messergebnisse wird die Durchflussgeschwindigkeit mit einbezogen. Dazu wird die Temperaturdifferenz zwischen Eingang und Ausgang der Absorberspirale im zeitlichen Versatz der Durchflussdauer der Spirale berechnet. Die Temperatur im Pufferspeicher und auch die Außenlufttemperatur werden über diesen Zeitraum gemittelt.

Es zeigt sich, dass der temperierte Pufferspeicher in den Nachtstunden um ungefähr 5 K abkühlt. Ab dem Zeitpunkt, in dem sich negative Temperaturdifferenzen zwischen dem Einlass der Absorberspirale und dem Auslass der Spirale einstellen, sinkt die Temperatur im Speicher deutlich. Bei nächtlichen Außentemperaturen zwischen 10 °C und 15 °C stellt sich eine mittlere Temperaturdifferenz von -5 K ein (Abbildung 5).

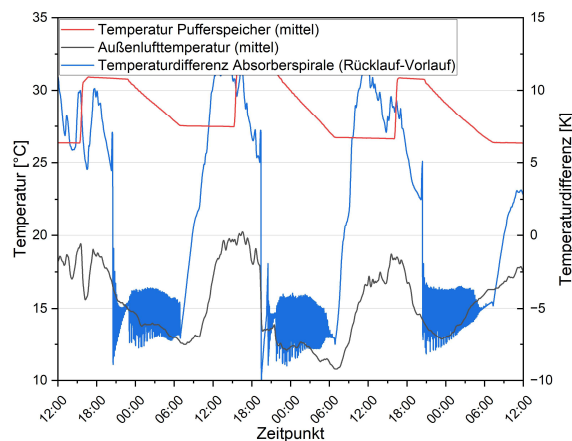


Abbildung 5: Temperaturverlauf der Außenlufttemperatur und der Pufferspeichertemperatur (Abnehmer) und Temperaturdifferenz zwischen dem Rücklauf und dem Vorlauf der Absorberspirale

Die Energieabgabe des Prototyps über die Absorberspirale errechnet sich wie folgt:

$$E_A = \Delta\theta_A \cdot c_W \cdot \dot{m} \cdot t \quad (1)$$

mit E_A = Energieabgabe im Absorber; $\Delta\theta_A$ = Temperaturdifferenz zwischen Auslass und Einlass der Kupferspirale; c_W = spezifische Wärmekapazität von Wasser; \dot{m} = Durchflussgeschwindigkeit und t = Zeit.

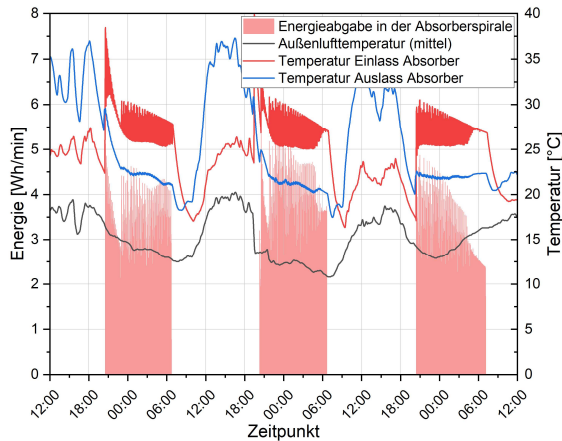


Abbildung 6: mittlere Außenlufttemperatur, Ein- und Auslasstemperatur der Absorberspirale und daraus resultierende Energieabgabe pro Minute

Die Energieabgabe der Absorberspirale wird nur innerhalb der Nachtstunden berechnet. Es ist deutlich zu erkennen, dass nur innerhalb dieses Zeitraums das Wasser am Auslass der Absorberspirale kühler ist als das Wasser, welches in die Absorberspirale hineingepumpt wird (Abbildung 6). Innerhalb eines Tagesverlaufs wird eine durchschnittliche Energieabgabe über die Spirale von rund 1,9 kWh/d erreicht. Die Energieabgabe der Absorberspirale ist eindeutig von der Temperatur der Außenluft abhängig. Bei sinkender durchschnittlicher nächtlicher Außenlufttemperatur steigt die Energieabgabe (Tabelle 1). Die Energieabgabe des Pufferspeichers ist deutlich höher als die der Spirale. Hier kommen neben den Verlusten, die über das gekühlte Wasser erzielt werden, auch noch unbeabsichtigte Verluste aufgrund der Wärmeabgabe des Speichers an seine Umgebung hinzu. Für die Einschätzung der Eignung und der Kühlleistung des Prototyps wird dementsprechend die Energieabgabe über die Absorberspirale herangezogen.

Aus den Ergebnissen ergibt sich eine durchschnittliche Leistung des Prototyps zum Kühlen von circa 185 W bei einer durchschnittlichen Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Vorlauftemperatur von 14,6 K. Die spezifische Leistung einer Flächenkühlung beträgt in der Ausführung als Wandheizung bei einer Raumlufttemperatur von 26 °C maximal 65 W/m² in Bezug auf die Wandfläche (BDH-Köln,

2023). Ein Energiepfahl mit einer Höhe von 10 m und identischem Aufbau wie der Prototyp hätte aufgrund der fünffachen Absorberfläche die Leistung, um einen 14 m² großen Raum über eine Wandkühlung zu temperieren.

Tabelle 1: mittlere Außenlufttemperatur (Nacht), Energieverlust in der Absorberspirale und Energieverlust des Pufferspeichers für die jeweiligen Versuchsdurchläufe

	Mittlere Außenlufttemperatur [°C]	Energieabgabe Absorberspirale [Wh/d]	Energieabgabe Pufferspeicher [Wh/d]
1	12,7	1.872	2.389
2	14,2	1.838	1.860
3	12,3	2.125	2.667
4	14,3	1.809	2.422
5	15,3	1.665	1.916

Ein solcher Pfahl würde somit keine alleinige Möglichkeit zur Vermeidung von Überhitzung darstellen, da die Leistung eines Pfahls nicht ausreichend ist um die Kühlung eines gesamten Gebäudes zu gewährleisten. Es ist jedoch möglich, diesen unterstützend einzusetzen, wenn dieser bereits in den Heizkreislauf des zu versorgenden Gebäudes integriert ist. Der Pfahl könnte zusammen mit baulichen Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz wie beispielsweise außenliegendem Sonnenschutz oder einer Dachbegrünung verwendet werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Zur Bestimmung des Potentials eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems wurde ein Prototyp entwickelt. An diesem Prototyp wurden diverse experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um seine Eignung zum Heizen und Kühlen bewerten zu können. Bei der Auswertung standen der Energiegewinn, die Energieeinspeicherung, die Entladezeit sowie die Energieabgabe im Vordergrund.

Vergleichende Betrachtungen handelsüblicher Solarthermiekollektoren zur Heizungsunterstützung haben gezeigt, dass der Prototyp bereits gute Ergebnisse hinsichtlich des Energiegewinns erzielt. Allerdings müsste das System für eine Energieeinspeicherung im jahreszeitlichen Verlauf durch einen saisonalen Speicher ergänzt werden. Die Entladung des Speicherkerns stellt keinen limitierenden Faktor dar. Eine vollständige Entladung kann über die Nachtstunden erfolgen, sodass der Speicher am Tag wieder gefüllt werden kann. Die Ergebnisse aus den Kühlversuchen zeigen, dass eine Temperierung eines überhitzten Raumes durch den Prototyp zwar möglich ist, aber keine alleinige Möglichkeit zur Kühlung eines gesamten Gebäudes bietet. Allerdings könnte der Energiepfahl

unterstützend eingesetzt werden, wenn dieser bereits im Heizkreislauf integriert ist.

Aus den Untersuchungsergebnissen resultiert, dass das Konzept des Energiepfahls großes Potential besitzt. Um eine wirtschaftliche Alternative darzustellen, muss allerdings eine Optimierung der Konstruktion durchgeführt werden. Ziel ist es, den Aufbau so zu verbessern, dass der interne Speicher maximiert und die Wärmeverluste minimiert werden. Dies kann beispielsweise durch eine Dämmung der Nordseite des Pfahls erfolgen, über die keine solaren Einträge zu erwarten sind. Des Weiteren kann der Pfahl mit Maßnahmen wie dem zusätzlichen Einsatz von Peltier-Elementen, einer Photovoltaikanlage und einer Windturbine sinnvoll erweitert werden.

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung des Projekts „EffKon – Effizientes Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystem zur thermischen Konditionierung von Gebäuden“ in welchem die hier vorgestellten Ergebnisse erzielt wurden.

Literatur

- BDH-Köln, 2023. Flächenheizung und Flächenkühlung Betriebsweise – Funktionsbeschreibung der Flächentemperierung – BDH: Verband für Effizienz und erneuerbare Energie. In: flächenheizung-bdh, <https://www.flaechenheizung-bdh.de/betriebsweisen/flaechenheizung-und-flaechenkuehlung-betriebsweise-funktionsbeschreibung>, Zugriff am 12.12.2023.
- Bettgenhäuser, K., Boermans, T., Offermann, M., Krechting, A., Becker, D., 2011. Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. In: Climate Change 10/2011.
- Bilgin, D., Carrigan, S., Friedrich, T., Kornadt, O., 2017. Raumkonditionierung durch Sandwichfertigteildecken mit integrierten Phasenwechselmaterialien. In: Bauphysik 39, H. 5, S. 299–305.
- Blum, T., Carrigan, S., Platzek, D., Kornadt, O., 2023. Evaluation of the energy efficiency of an active thermoelectric façade. In: Energy and Buildings 292, S. 113–128.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022. Zahlen und Fakten: Energiedaten (Stand: 20.01.2022)
- EffKon, 2023. EffKon – Effizientes Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystem zur thermischen Konditionierung von Gebäuden. In: EffKon, <https://effkon.eu/>, Zugriff am 18.12.2023.
- Friedrich, T., 2023. Energiesäule aus Beton als Beitrag zur Wärmewende. In: Innogration, <https://www.innogration.de/wp-content/uploads/delightful-downloads/2023/10/Energies%C3%A4ule-aus-Beton-als-Beitrag-zur-W%C3%A4rmewende-2.pdf>, Zugriff am 20.12.2023
- Friedrich, T., Kornadt, O., Kurz, W. Schnell, J., 2014. Entwicklung eines weitgespannten Sandwichdeckensystems mit integrierter Haustechnik in Verbundbauweise. In: Beton- und Stahlbetonbau, 109.. Jahrgang, Ausgabe Nr. 10/Okttober 2014, S. 678–688.
- Krohn, J., Carrigan, S., Friedrich, T., Kornadt, O., 2022. Implementierung neuartiger PCM-Speicher in TRNSYS zur Deckung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs. In: Proceedings BauSim2022, Weimar, Deutschland.
- Schabbach, T., Leibbrandt, P., 2021. Solarthermie – Wie Sonne zu Wärme wird (2.Auflage). Springer
- Schröter, B., Spiegel, J., Carrigan S., Kornadt O., Friedrich, T., Wißbach, M., Platzek, D., Büscher, W., 2023. Energiegewinn und Energieeinspeicherung des Prototyps eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems. In: Bauphysik 45, H. 5, S. 245–251.