32. REGWA Energiesymposium Stralsund, 05. – 07. November 2025, S. 121 - 129

# FUNDAMENTE MIT FUNKTION: MESSTECHNISCHE ANALYSE THERMISCH AKTIVIERTER, BODENGEBUNDENER BETONELEMENTE ZUR NACHHALTIGEN GEBÄUDEKLIMATISIERUNG

*Benjamin Breuer[1], Mark F. Jentsch[1], Sebastian Büttner[1], Artjom Kolwa[1]*

[1] Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bau und Umwelt, Professur Energiesysteme

## ABSTRACT

Der Gebäudesektor ist in Europa für etwa 40 % des Energieverbrauchs verantwortlich, wobei konventionelle Heizverfahren auf Basis fossiler Rohstoffe aus Klimaschutzgründen zunehmend an Attraktivität verlieren. Parallel gewinnt die Nutzung von Umgebungswärme, unter anderem aus oberflächennaher Geothermie, an Bedeutung für die Dekarbonisierung der Energieversorgung. Dieser Artikel beschreibt die Ergebnisse eines Demonstrationsvorhabens in Kindelbrück, Thüringen, bei dem eine Lagerhalle mit einer als thermisch aktiviertem Bauteilsystem (TABS) ausgeführten Bodenplatte ausgestattet wurde, welche als Wärmespeicher und -quelle in Verbindung mit einer Wärmepumpe genutzt wird. Um die Temperaturverteilung und thermische Kopplung zwischen TABS und Untergrund zu überwachen, wurde ein detailliertes Messnetz mit 104 Thermoelementen installiert. Die bisherigen Ergebnisse des im Juni 2022 in Betrieb gegangenen Messnetzes zeigen, dass TABS durch ihre Nähe zu stabileren Bodentemperaturen effizienter als Luft-Wärmepumpen sind, insbesondere bei Außentemperaturen unter 6°C. Allerdings müssen die thermischen Eigenschaften und die Beeinflussung des Systems durch äußere atmosphärische Bedingungen noch weiter untersucht werden. Durch den niedrigen Temperaturhub von Quelle zu Senke konnte jedoch bereits in der ersten Heizperiode eine vorteilhafte Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe erzielt werden, die auf eine effiziente Nutzung der Umweltwärme hindeutet. Die Ergebnisse verdeutlichen das Potenzial von TABS, insbesondere im Industriebau mit niedrigeren Temperaturanforderungen an den Innenraum, Energie- und damit Kosteneinsparungen für die Gebäudetemperierung zu erzielen.

## 1. EINLEITUNG

Rund 40 % des europäischen Energieverbrauchs sind dem Gebäudesektor zuzuschreiben [1]. Konventionelle Wärmeerzeugung über fossile Energieträger wird mit Blick auf steigende $CO_2$-Preise immer unattraktiver [2]. Die Nutzung von Umgebungswärme zur Gebäudeklimatisierung und Warmwasserbereitung befindet sich im Ausbau und wird voraussichtlich einen maßgeblichen Anteil an der Dekarbonisierung der Energieversorgung im Gebäudebereich haben [3]. Zur Umgebungswärme zählen hierbei Wärme aus der Luft, dem Wasser sowie der oberflächennahen Geothermie. Eine direkte Nutzung von Umgebungswärme ist aufgrund der meist konträr verlaufenden Temperaturprofile und geringen Temperaturdifferenzen nur selten möglich. Die Bereitstellung von Umweltwärme zu Heiz- und Kühlzwecken ist daher auf Wärmepumpen angewiesen [4]. Diese arbeiten bei niedriger Temperaturspreizung am effektivsten, wobei das Verhältnis von Nutzleistung zu Antriebsleistung mit sinkender Temperaturspreizung steigt. Die Temperaturen von Quelle und Senke einander anzunähern, ist daher eine häufig forcierte, grundlegende Bestrebung zur Effizienzsteigerung. Hieran knüpft die Nutzung der Umgebungswärme aus oberflächennaher Geothermie an.

Die in Mitteleuropa vorherrschende Grundtemperatur oberflächennaher Bodenschichten unterliegt deutlich geringeren jahreszeitlichen Schwankungen als die Lufttemperatur und beträgt ab einer Tiefe von 6 m etwa 10°C ±2°C [5]. Da der Boden nicht unter den Gefrierpunkt abgekühlt werden darf, bewegen sich die zu erwartenden Quelltemperaturen für oberflächennahe Geothermieanlagen im Temperaturbereich zwischen 0°C und 10°C sowie bei aktiver Einspeicherung von Wärme bis zu ca. 30°C [6].

Für den Wärmeaustausch mit oberflächennahen Bodenschichten sind verschiedene Technologien wie

z.B. Erdwärmesonden, Energiepfähle oder Flächenkollektoren verfügbar. Letztere können auch als aktivierte Bodenplatten ausgeführt werden, bei welchen die Gründung gleichzeitig Niedertemperatur-Wärmespeicher und Erdwärme-Kollektor darstellt. Über eine Wärmepumpe wird der Bodenplatte im Heizfall Wärme entzogen und beim Kühlen des Gebäudes in diese eingespeichert. Da die Bodenplatte thermisch nicht vom Untergrund entkoppelt ist, findet ein Wärmeaustausch mit dem darunterliegenden Erdreich statt. Derartige „thermisch aktivierte Bauteilsysteme“ werden auch als „TABS“ bezeichnet. TABS sind numerisch bereits vielfach untersucht worden [7–9]. Experimentelle Untersuchungen unter Realbedingungen für solche Systeme sind hingegen bisher kaum dokumentiert worden. Es bestehen nur wenige Erfahrungsberichte zur Leistungsfähigkeit von flächigen thermisch aktivierten Bauteilen. Hinzu kommt, dass das thermische Verhalten von TABS gegenüber dem von Erdwärmesonden und horizontalen Erdwärmekollektoren abweicht und gängige Berechnungsmethoden nicht direkt übertragen werden können [10]. An diesem Punkt setzt das hier beschriebene Demonstrationsvorhaben eines TABS unter einem Hallenneubau in Kindelbrück, Thüringen an, dessen bisher erzielten Ergebnisse in diesem Beitrag zusammengefasst werden. Durch die Notwendigkeit eines Hallenneubaus bei gleichzeitig großem Interesse des Bauherrn an der Erprobung eines TABS, konnte hierbei die einmalige Gelegenheit genutzt werden, während der Errichtung des Gebäudes ein Messnetz zum Monitoring des thermischen Verhaltens des Systems zu implementieren.

## 2. Realisierte technische Infrastruktur zur Temperaturerfassung im Boden

Im nordthüringischen Kindelbrück wurde 2021/22 bei der Hyrican AG eine Lagerhalle für Non-Food Artikel mit einer als TABS ausgeführten Bodenplatte errichtet. Die 60x25 m messende, in ihren Umfassungsflächen gedämmte Halle hat eine Nutzfläche von 1.440 m². Auf dem Dach ist eine 220 kWp Photovoltaikanlage installiert, deren Energie zu Teilen in einem Batteriespeicher mit 124 kWh Nutzkapazität zwischengespeichert werden kann. Die Klimatisierung der Halle auf 16°C Raumtemperatur erfolgt über eine vollflächige Fußbodenheizung, während der in die Halle integrierte Technikraum zusätzlich aktiv über die Wände und die Decke temperiert wird. Das TABS dient einer Wärmepumpe im Heizfall als Wärmequelle und im Kühlfall in den Sommermonaten als Wärmesenke. Die aus dem Technikraum abgeführte Wärme wird dem TABS zugeführt und trägt somit zur Gesamtwärmebilanz dessen bei. Die Halle hat einen mehrschichtigen Gründungsaufbau, der in Abbildung 1 genauer detailliert wird.

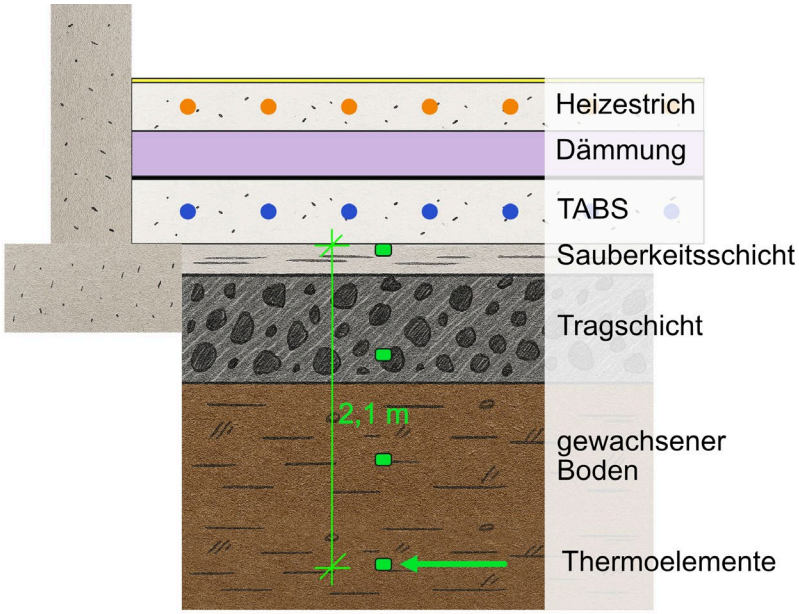


**Abbildung 1: Gründungsaufbau der untersuchten Lagerhalle in Kindelbrück, Thüringen**

Die aus Stahlbeton gefertigte Bodenplatte ist 25 cm stark. Innerhalb des Betonelements sind Kunststoff-Rippenrohre (in Abbildung 1 blau dargestellt) mit einer Gesamtlänge von 4.600 m eingebracht, welche den Wärmeaustausch zwischen Sole und Beton mit bis zu 35 kW Leistung gewährleisten [11]. Um die Druckverluste in den Leitungen zu beschränken und eine gleichmäßige Wärmeverteilung im TABS zu ermöglichen, sind die Rohre in Kreise zu je 100 m Länge unterteilt.

Zur Erfassung der auftretenden Temperaturen unter dem TABS sowie in den darunterliegenden und den unmittelbar daneben anstehenden anthropogenen Bodenschichten wurde ein umfangreis Messnetz eingerichtet. Dieses Messnetz umfasst 104 Thermoelemente, die auf einem horizontalen Rastersystem von 2m x 2m unterhalb der aktivierten Bodenplatte sowie außerhalb des Gebäudes ins Erdreich eingebracht wurden. Zusätzlich zu den mit dem Messnetz ermittelten Messwerten wurden weitere Temperaturmesswerte direkt an der Wärmepumpe erfasst. Abbildung 2 zeigt ein Orthofoto während der Bauphase der Halle mit den Installationsorten und Sensornummern der einzelnen Thermoelemente.

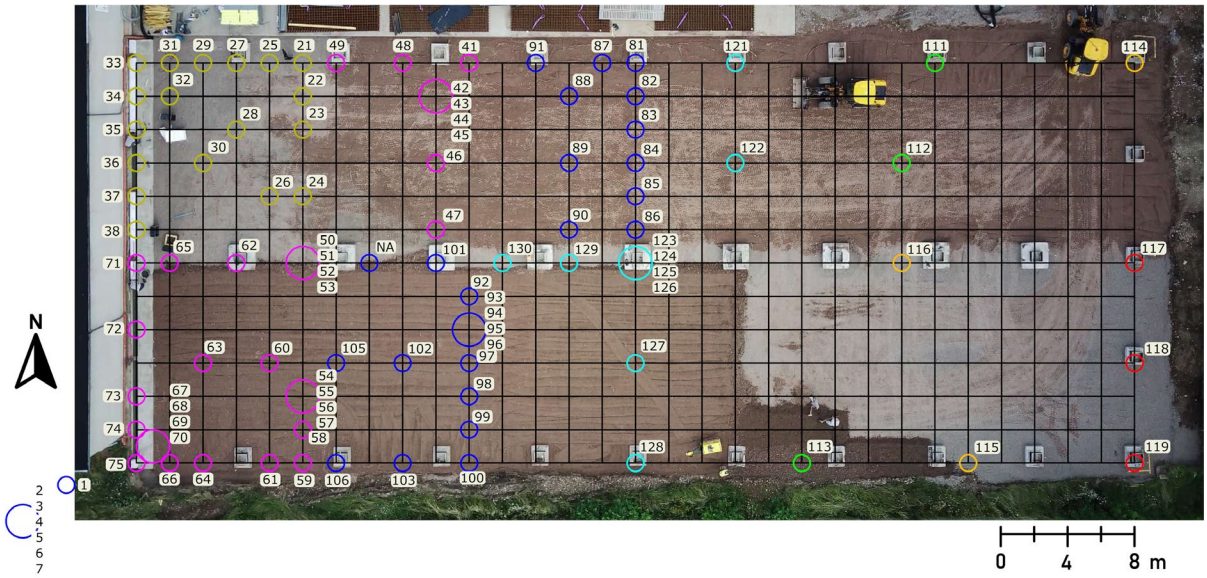


**Abbildung 2: Orthofoto der Lagerhalle in Kindelbrück während des Baus mit Installationsorten der Thermoelemente unterhalb des TABS (Nr. 21-130), im unbedeckten Boden (Nr. 2-7) sowie zur Ermittlung der Außenlufttemperatur (Nr.1)**

Die großen Kreise in Abbildung 2 zeigen an, dass die Temperaturmessung an diesen Stellen zusätzlich zum horizontalen Messfeld unter der Bodenplatte in mehreren Tiefen erfolgt. Durch die Anordnung von vier Thermoelementen mit einem vertikalen Abstand von jeweils 70 cm können hiermit Temperaturprofile bis in eine Tiefe von 2,1 m unter der Bodenplatte erfasst werden (siehe Abbildung 1 für die Sensorpositionen). Durch die so angeordneten Thermoelemente kann die vertikale Wärmeausbreitung an sechs verschiedenen Stellen unterhalb des TABS erfasst werden. Das horizontale Messfeld umfasst insgesamt 79 Sensoren, die, wie in Abbildung 2 gezeigt wird, in unterschiedlichen Dichten unterhalb der Halle verlegt wurden. Weitere 6 Messstellen befinden sich, wiederum vertikal in Abständen von 5, 10, 20, 50, 100 und 150 cm unter Geländeoberkante verlegt, in 6 m Entfernung von der südwestlichen Gebäudeecke im Boden außerhalb der Halle (Sensornummern 2 bis 7 in Abbildung 2). Sensor Nr. 1 bestimmt in einer Entfernung von 3 m von der Halle die Lufttemperatur in 2 m Höhe über Grund.

Die Temperaturen werden in einem Intervall von 10 Minuten erfasst. Hintergrund dieses kurzen Intervalls ist die Möglichkeit, kurzfristige Temperaturreaktionen der oberen Bodenschichten und die horizontale Wärmeausbreitung innerhalb des TABS bestimmen zu können. Langfristige Auswertungen der Veränderungen des Systems werden durch die Bildung von Tagesmittelwerten ermöglicht. Durch die Messungen ist eine umfangreiche Datensammlung mit Messwerten vom 10.06.2022 bis 20.01.2025 sowie vom 23.05.2025 bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Beitrags entstanden. Die

Messlücke zwischen dem 20.01.2025 und dem 23.05.2025 ist durch einen Blitzeinschlag und den damit verbundenen, unbemerkten Ausfall des Datenloggers entstanden.

## 3. Ergebnisse der Temperaturmessungen und deren Interpretation

Von großer Bedeutung für die thermische Charakterisierung von TABS ist die Temperaturverteilung innerhalb des aktivierten Bauteils über einen längeren Zeitraum, da sich hieraus ggf. Möglichkeiten zur Planung und Dimensionierung mit vereinfachten Berechnungsalgorithmen ableiten lassen. Grundsätzlich wird hierbei im Bauteil eine möglichst gleichverteilte Temperatur angestrebt, um den Wärmeaustausch mit dem Boden über die gesamte Fläche stattfinden zu lassen. Um die Temperaturverteilung in der Fläche zu untersuchen, wurden daher zunächst die Messwerte der unmittelbar am TABS liegenden Thermoelemente des horizontalen Messfeldes ausgewertet. Abbildung 3 stellt die Temperaturverteilung in der Bodenschicht direkt unter dem TABS jeweils als „Heatmap“ für einen Tag im Juni und September 2023 dar, wobei es sich um Tagesmittelwerte für die Temperatur handelt.

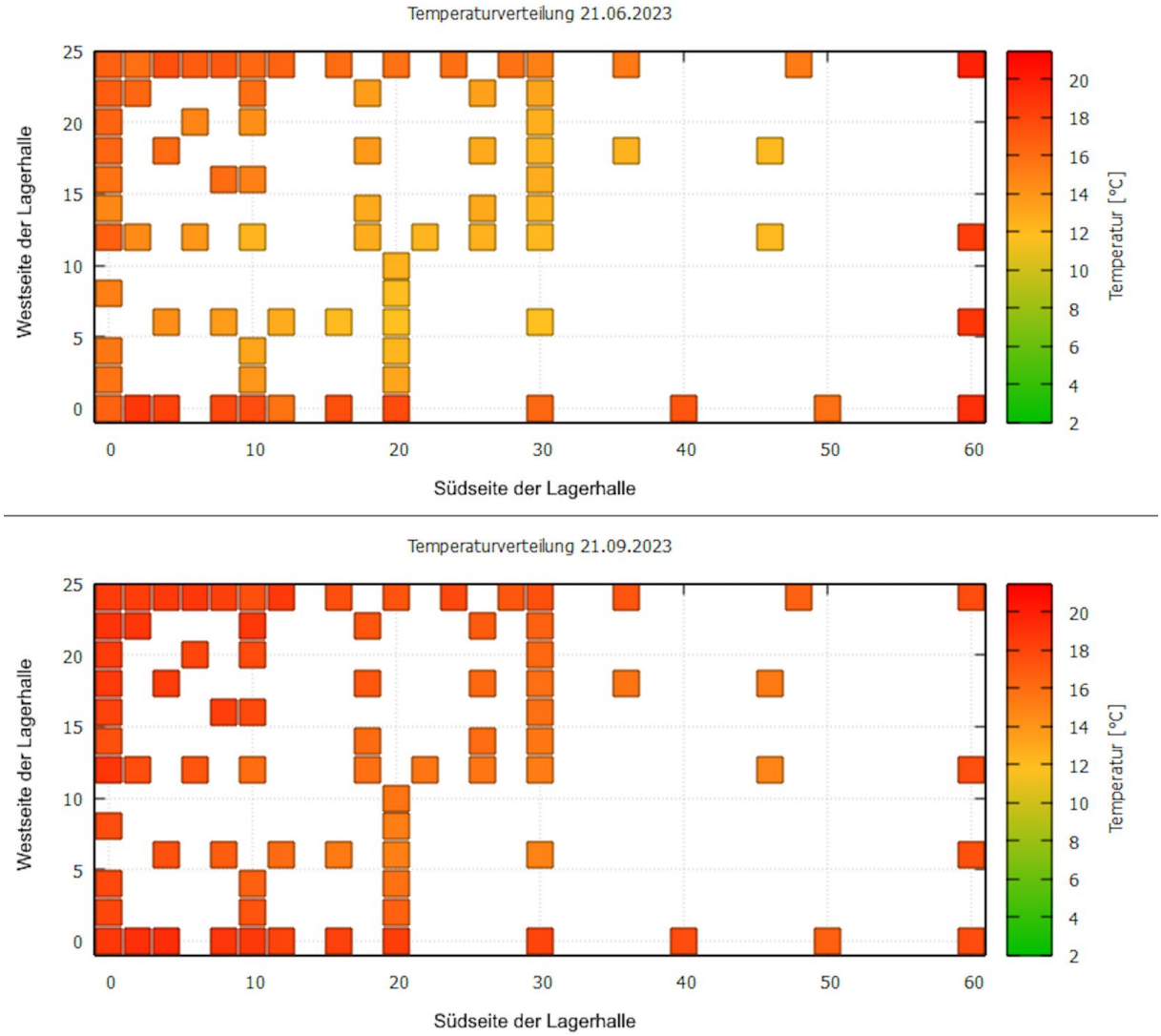


Abbildung 3: Temperaturverteilung des TABS in der Horizontalen an zwei ausgewählten Tagen während der Einschwingphase im Jahr 2023

Abbildung 3 zeigt, dass sich im Jahr 2023 die im Vergleich zum durch die Lufttemperatur beeinflussten Gebäuderand niedrigeren Temperaturen im Zentrum des TABS während der sommerlichen Aufheizphase des Systems von Juni bis zum September annähernd ausgleichen haben. Die sich

einstellende Temperaturhomogenität impliziert das mögliche Vorhandensein eines Temperaturmesswertes, der der Durchschnittstemperatur des TABS nahekommt. Aus den Werten der in Abbildung 3 dargestellten horizontalen Messpunkte wurden daher Tagesmittelwerte gebildet und diese mit den Messwerten der einzelnen Thermoelemente verglichen. Messpunkt 129 zeigte über den Betrachtungsraum von einem Jahr (01.2023 – 01.2024) ein kohärentes Verhalten mit den Mittelwerten. Für die weiteren Betrachtungen kann Messpunkt 129 somit als mittlere Temperatur des TABS, d.h. als Speichertemperatur, angenommen werden.

Die Wärmeübertragung zwischen TABS und den darunterliegenden Bodenschichten ist ausschlaggebend für die Funktion des Gesamtsystems, da bei hohen Wärmeübergangswiderständen zwischen Beton und Sauberkeitsschicht die Übertragungsleistung zu gering wäre und die Bodenschichten ihren Zweck als Wärmespeicher nur unzureichend erfüllen könnten. Aufschluss hinsichtlich der Qualität der thermischen Kopplung zwischen Beton und Boden gibt daher die Phasenverschiebung der Temperaturwellen. Geringe Phasenverschiebungen sind hierbei ein Indiz für eine gute, d.h. zügig erfolgende Wärmeübertragung.

Mit zunehmender Tiefe kommt es zur Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung der Temperaturwellen. Abbildung 4 zeigt über den Zeitraum von 1,5 Jahren von Juni 2022 bis Dezember 2023 den Temperaturverlauf der Thermoelemente 67 bis 70 an der Südwestecke der Lagerhalle im Tiefenprofil (siehe Abbildung 2 für die Position der Thermoelemente).

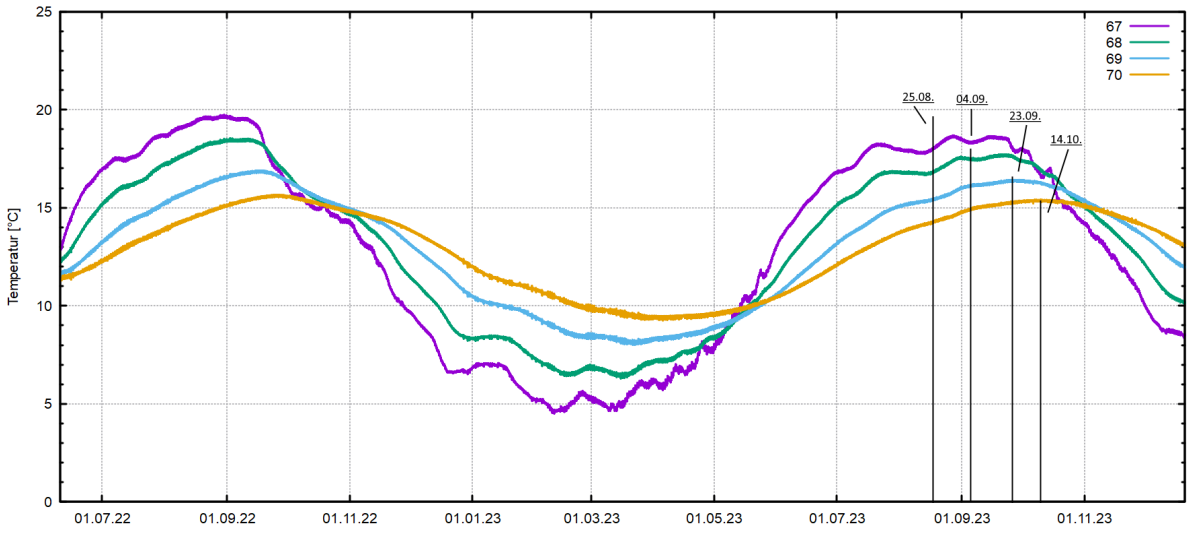


**Abbildung 4: Temperaturverlauf der Tagesmittelwerte unter dem TABS in der Südwestecke der Lagerhalle während der Einschwingphase über die ersten 1,5 Jahre nach Messbeginn, d.h. den Zeitraum vom 10.06.2022 bis zum 23.12.2023**

Gut zu erkennen ist in Abbildung 4 die schnelle Reaktion von Thermoelement 67, welches anhand der räumlichen Nähe zum Rand des TABS Einwirkungen von außen aufzeigt, wie die Temperaturausschläge von z.B. Dezember 2022 bis Januar 2023 verdeutlichen. Die exakte Quantifizierung des Einflusses der Atmosphäre auf die Randzonen des Gebäudes ist hierbei Bestandteil noch laufender Untersuchungen. Zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Wärmeausbreitung wurde die Phasenverschiebung zwischen den Thermoelementen 67, 68, 69 und 70 ermittelt, deren vertikaler Abstand, wie in Abschnitt 2 bereits erwähnt wurde, bei jeweils 0,7 m liegt. Aus dieser Analyse resultieren Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Wärmewellen von bis zu 7 cm/d, die mit zunehmender Tiefe jedoch auf ca. 3,5 cm/d abnehmen. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass den Geschwindigkeiten von Wärmewellen im Untergrund grundsätzlich keine festen Werte zugeschrieben werden können, da sie stark von den thermischen Eigenschaften des Bodenmaterials sowie der Frequenz und Amplitude der Temperaturänderungen abhängen [12]. Anhand von Literatur- und Erfahrungswerten wurden für den Standort in

Kindelbrück vorab Geschwindigkeiten von maximal 6 cm/d angenommen. Die messtechnisch ermittelten Werte liegen also folglich im Bereich von Literaturangaben.

Untersucht wurde weiterhin, wie tief die Wirkung des TABS in vertikaler Richtung in den Untergrund reicht. Die periodische Endringtiefe ist hierbei, wie auch die Geschwindigkeit der Wärmewellen, abhängig von den Wärmeübertragungseigenschaften des Untergrunds sowie den vorherrschenden Temperaturdifferenzen. Aus der Eindringtiefe lässt sich in der Folge die tatsächlich nutzbare Speichergröße ableiten. Da die in Kindelbrück implementierten Messpunkte nicht bis in hohe Tiefen reichen, musste extrapoliert werden, um Aussagen zur Eindringtiefe und damit der Speichergröße treffen zu können. Als Grundlage hierfür dienen die Temperaturamplituden zur mittleren Bodentemperatur von 10°C und deren vertikaler Abstand zueinander. Abbildung 5 zeigt für den Zeitraum von Januar 2023 bis Juni 2024 die Tagesmittelwerte der zentral unter der Lagerhalle gelegenen Thermoelemente 123 bis 126 inklusive einer Extrapolationskurve (in schwarz dargestellt) der Bodentemperatur, aus der eine Eindringtiefe der einzuspeichernden Wärme von 9 m unter der Halle hervorgeht.

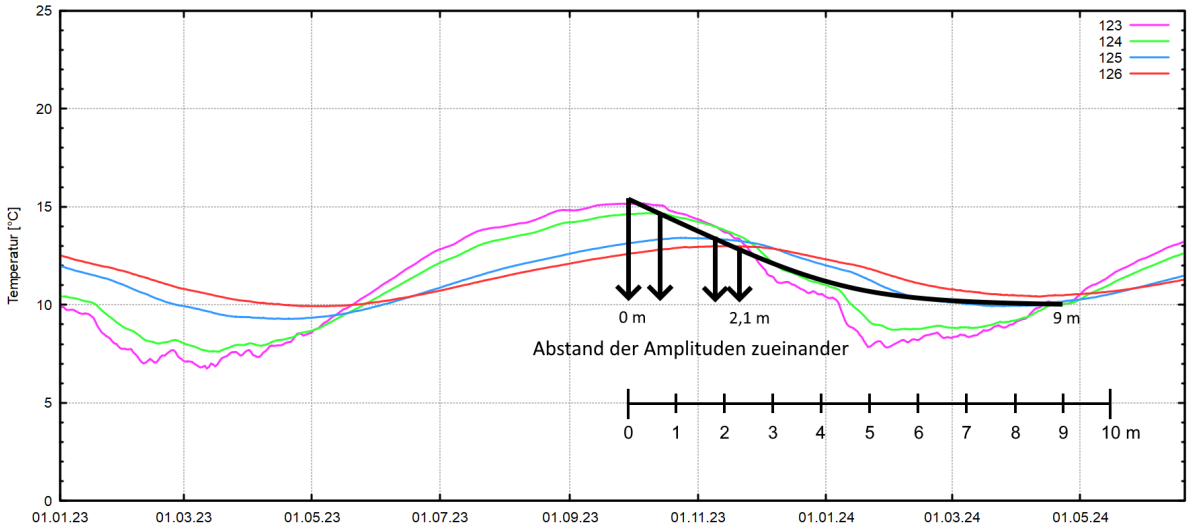


**Abbildung 5: Temperaturverlauf der Tagesmittelwerte unter dem TABS im Zentrum der Lagerhalle für den Zeitraum vom 01.01.2023 bis zum 20.06. 2024 inklusive Darstellung der Ermittlung der Tiefenwirkung des Wärmespeichers durch Extrapolation des Phasenverlaufs**

Mathematisch lässt sich die Extrapolationskurve in guter Näherung als logarithmische Regression analog dem Kriechfall einer gedämpften Schwingung beschreiben, im hier betrachteten Zeitpunkt zu:

$$\vartheta(d) = -1{,}3ln(d) + 13 \qquad (1)$$

Der Term stellt die Temperatur $\vartheta$ [°C] in Abhängigkeit des Abstands d [m] von der Unterkante des TABS dar. Das Bestimmtheitsmaß $R^2$ für den konkreten Fall liegt bei $R^2$=0,97.

Die extrapolierten Werte der Temperaturamplituden ergeben eine Tiefenwirkung bis zu 9 m unter dem TABS. Ab einer Tiefe von 9 m ist somit kein Einfluss des TABS auf die Bodentemperatur mehr zu erwarten, so dass die Temperatur auf der in Abschnitt 1 beschriebenen Grundtemperatur von 10°C für den mitteleuropäischen Raum verbleibt. Hieraus ergibt sich zwischen Bodenplatte und der Tiefenwirkungsgrenze von 9 m ein nutzbares Speichervolumen im Erdreich von ca. 10.000 m³. Da die Wärmetransporteigenschaften temperaturabhängig sind [13] und die Temperatur des TABS theoretisch auf bis zu 30°C erhöht werden kann, können nach mehreren Jahreszyklen jedoch noch größere Eindringtiefen und somit Speichervolumina erwartet werden. Dies gilt es daher in den nächsten Jahren der Messreihe zu ermitteln.

Der in Abbildung 6 gezeigte Vergleich zwischen den Temperaturprofilen der Außenluft und der des TABS, d.h. des als repräsentativ identifizierten Messpunktes 129, während der Heizperiode von Oktober

2023 bis März 2024 zeigt das Potenzial des untersuchten Systems gegenüber der Nutzung einer Luft-Wärmepumpe auf. Über weite Bereiche der Heizperiode lagen die Außenlufttemperaturen nämlich unterhalb derer des TABS. In diesen Bereichen ist der notwendige Temperaturhub von Quell- zu Nutztemperatur entsprechend niedriger. Dies resultiert folglich in einem besseren Verhältnis von Nutzenergie zu aufgewendeter elektrischer Energie im Vergleich mit einer Luft-Wärmepumpe.

Die mittlere Temperatur des untersuchten TABS blieb während der Heizperiode 2023/2024 über 6°C. Zudem konnte, wie Abbildung 6 zeigt, während des letzten Drittels der Heizperiode ausreichend Wärmeenergie vom Boden nachgeführt werden, um das TABS nicht weiter abzukühlen. Dies spiegelt sich auch in den an der Wärmepumpe ermittelten Energiemengen wider. Für die insgesamt zur Temperierung der Lagerhalle benötigte Wärmeenergie in der Heizperiode 2023/2024 von 45.100 kWh wurden 9.740 kWh an elektrischer Energie aufgewendet. Dies entspricht einer durchschnittlichen Leistungszahl (COP) der Wärmepumpe von 4,6 im untersuchten Zeitraum, was eine sehr gute Ausnutzung der Umgebungswärme des TABS verdeutlicht.

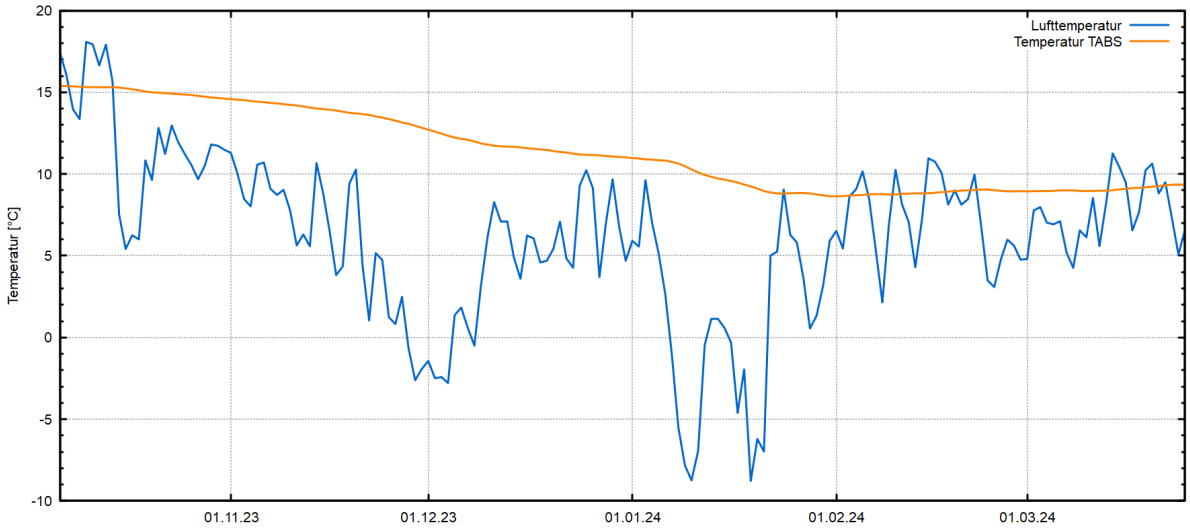


**Abbildung 6: Vergleich zwischen den Tagesmittelwerten für die Außenlufttemperatur und der Speichertemperatur des TABS unter der Lagerhalle in Kindelbrück während der Heizperiode 2023-2024**

## 4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das in einem Demonstrationsprojekt in Kindelbrück umgesetzte thermisch aktivierte Bauteilsystem (TABS) mit Messnetz ermöglichte detaillierte Einblicke in das thermische Verhalten eines TABS unter einer Lagerhalle und dem umgebenden Erdreich. Die Geschwindigkeit sowie die Distanz des Wärmetransports konnten durch Auswertung von Temperaturmessungen experimentell ermittelt werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wärmewellen lag zwischen 3,5 cm/d und 7 cm/d und deckt sich mit Werten aus der Literatur, während die durch Extrapolation ermittelte Eindringtiefe von 9 m in den Boden die aktive Nutzung auch tieferer Bodenschichten nachweist. Eine gleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb des TABS erweist sich als wichtig, um einen gleichmäßigen Wärmeaustausch über die gesamte Fläche mit dem Boden zu ermöglichen. Es konnte in diesem Zusammenhang ein Messpunkt identifiziert werden, der die mittlere Speichertemperatur des TABS in guter Näherung abbildet.

Die Ergebnisse der Messreihen der Jahre 2022 bis 2024 zeigen, dass die Integration von TABS in Bodenplatten einen vielversprechenden Ansatz zur Nutzung von oberflächennaher Geothermie darstellt. Die Untersuchungen verdeutlichen weiterhin, dass TABS eine wirksame Strategie zur Umweltwärmenutzung in neu zu errichtenden Lagerhallen bieten können. Durch die Nutzung stabilerer Quelltemperaturen konnte in Kindelbrück nämlich der durch die Wärmepumpe zu verrichtende durchschnittliche Temperaturhub minimiert werden. Insbesondere bei kühleren Außentemperaturen wies das

System dann gegenüber herkömmlichen Luft-Wärmepumpensystemen eine verbesserte Effizienz auf, was sich auch in einem hohen durchschnittlichen COP von 4,6 während der Heizperiode 2023/2024 ausgedrückt hat.

Auf Basis der hier dargestellten Ergebnisse sollen in einem nächsten Schritt Modellierungsansätze entwickelt werden und eine Verfeinerung der Methoden zur Bewertung der thermischen Interaktionen zwischen TABS und der Umgebung erfolgen. Zusätzlich soll die Untersuchung der Einflussfaktoren wie z.B. der atmosphärischen Bedingungen und der veränderlichen Bodenparameter fortgesetzt werden, um die Wärmeübertragungs- und Speichervorgänge genauer ermitteln und darauf aufbauend modellieren zu können. Diese Daten erlauben es perspektivisch, ein validiertes Modell für TABS aufzustellen, das für die Dimensionierung von Systemen an anderen Standorten genutzt werden kann. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass TABS ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung der Nachhaltigkeit und Energieeffizienz im Gebäudesektor aufweisen, das es weiter zu erforschen gilt.

## 5. DANKSAGUNG

Die in dieser Veröffentlichung präsentierten Messdaten wurden innerhalb des Verbundvorhabens energy4CHP erhoben und ausgewertet, welches mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen des WIR-Bündnisses $h_2$-well im Programm „WIR! – Wandel durch Innovation in der Region“ unter dem Förderkennzeichen 03WIR1809A gefördert wird. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die geförderten Forschungspartner im Verbundvorhaben energy4CHP sind die Bauhaus-Universität Weimar und die WTZ Roßlau gGmbH. Besonderer Dank gilt der Hyrican AG, die als assoziierter Partner an das Verbundvorhaben angeschlossen ist und durch die Bereitstellung der Untersuchungsfläche maßgeblich zur Durchführung der wissenschaftlichen Untersuchungen beigetragen hat. Ohne diese Kooperation wäre die Erforschung des Wärmespeichervermögens unter der Lagerhalle in dieser Form nicht möglich gewesen.

## 6. LITERATURVERZEICHNIS

[1] N. Beckmann, *Energieeffizientes Bauen und wie es sich lohnt*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
[2] Wissenschaftliche Dienste des Bundestags, "Mögliche Auswirkungen des geplanten EU-ETS 2 auf den CO2-Preis: WD 5 - 3000 - 105/24," 2024.
[3] BMWK, "Erneuerbare Energien in Zahlen: Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2023," Berlin, 2024.
[4] M. Kaltschmitt, L. Sens, W. Streicher, and F. Ziegler, "Nutzung von Umgebungswärme," in *Erneuerbare Energien*, M. Kaltschmitt, W. Streicher, and A. Wiese, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, pp. 685–792.
[5] *Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland*, DIN 4710, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Jan. 2003.
[6] E. Bollin and M. Schmelas, *TABS - Thermoaktive Bauteilsysteme: Selbstlernendes und vorausschauendes Steuern mit AMLR*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021.
[7] M. Habibi, A. Amadeh, and A. Hakkaki-Fard, "A numerical study on utilizing horizontal flat-panel ground heat exchangers in ground-coupled heat pumps," *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 996–1010, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.09.040.
[8] L. Lamarche, "Horizontal ground heat exchangers modelling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 155, pp. 534–545, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.006.
[9] B. Glück, "Simulationsmodell - Zweidimensionale Wärmeleitung," Bericht Wärmeleitung, 2015. Accessed: Dec. 3 2024. [Online]. Available: https://berndglueck.de/waermeleitung.php
[10] M. Bauer, W. Freeden, H. Jacobi, and T. Neu, *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
[11] G. Heckrodt, "Beratungsbericht EBN 80002650," Gieboldehausen, Feb. 2023.
[12] O. T. Farouki, *Thermal properties of soils*. Hanover, New Hampshire: Defense Technical Information Center, 1981.

[13] S. Rees, M. Adjali, Z. Zhou, M. Davies, and H. Thomas, "Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 4, no. 3, pp. 213–265, 2000, doi: 10.1016/S1364-0321(99)00018-0.
[14] Deutscher Wetterdienst, *Deutschlandwetter im Winter 2023/2024: Der 13. milde Winter in Folge: drittwärmster und einer der nassesten Winter seit 1881.* [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2024/20240228_deutschlandwetter_winter2023-2024_news.html (accessed: Oct. 8 2025).
[15] I. Moeck and J. Weber, "Metastudie zur nationalen Erdwärmestrategie: Ersatz fossiler Brennstoffe im Bereich Raumwärme und Warmwasser durch Geothermie als unverzichtbarer Bestandteil im Energiesektor Ökowärme bis 2045," Hannover, 2022.