

PCM-Kühldecken im Energy Efficiency Center – ein Praxisbericht

Dr. Helmut Weinländer
ZAE Bayern
Würzburg, Deutschland



PCM-Kühldecken im Energy Efficiency Center – ein Praxisbericht

1. Einführung

Weltweit wird in den kommenden Jahren ein erheblicher Anstieg des Energieverbrauchs im Gebäudebereich durch Kühlung erwartet [1]. Gründe hierfür sind neben dem Klimawandel vor allem das Bevölkerungswachstum sowie die in vielen Ländern teilweise rasant zunehmende wirtschaftliche Entwicklung. Um den hierdurch drohenden Anstieg der Treibhausgasemissionen und die Belastung der Stromnetze durch die hauptsächlich elektrisch betriebenen Kälteanlagen zu verringern oder idealerweise ganz zu vermeiden werden effiziente und netzdienliche Kühlstrategien benötigt.

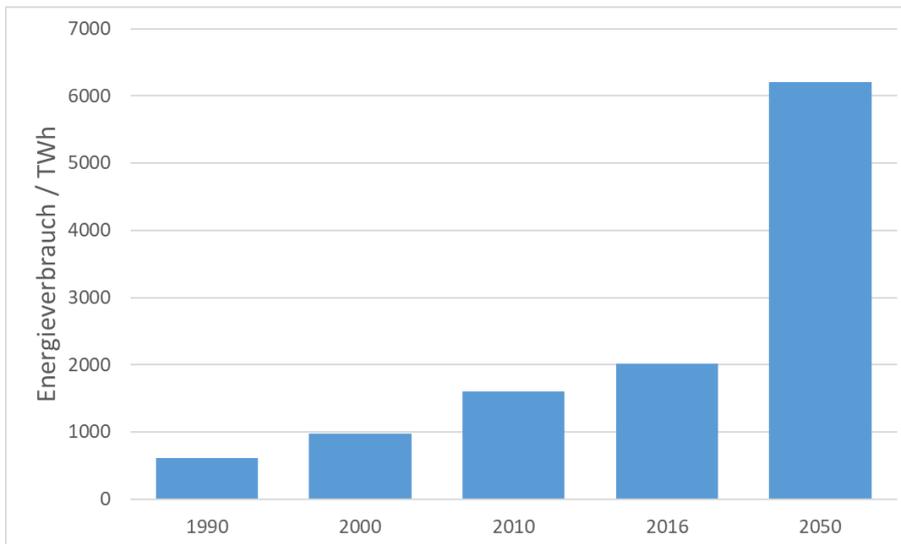


Abbildung 1: Weltweiter Energieverbrauch für Gebäudekühlung und Prognose für das Jahr 2050 nach [1].

Ein möglicher Lösungsansatz zur Realisierung von Spitzenlastverschiebung und Spitzenlastreduktion in der Gebäudekühlung ist die Integration thermischer Speicher in die Kühlsysteme. Im Energy Efficiency Center (EEC), dem Institutsgebäude des ZAE Bayern in Würzburg, wurden deshalb Kühldecken mit Phasenwechselmaterialien (PCM) in den Büroräumen installiert [2]. Praktische Erfahrungen mit solchen Systemen sind noch wenig vorhanden. PCM-Kühldecken werden derzeit kaum kommerziell angeboten und finden vor allem in Forschungs- und Demonstrationsprojekten Anwendung [3]. Im EEC sind die PCM-Kühldecken seit 2013 in Betrieb. Sie werden seit 2014 einem intensiven Monitoring unterzogen und die Regelstrategie zur möglichst energieeffizienten Nutzung des PCM wird kontinuierlich optimiert. Im vorliegenden Beitrag werden die bisherigen Praxiserfahrungen mit diesem innovativen Kühlsystem präsentiert.

2. Grundlagen und Systembeschreibung

2.1. Phasenwechselmaterialien (PCM)

Als PCM bezeichnet man Materialien, bei denen die Änderung des Aggregatzustandes (Phasenwechsel) zur Wärme- und Kältespeicherung genutzt wird. Während des Phasenwechsels – im Gebäudebereich wird üblicherweise der Phasenwechsel fest \leftrightarrow flüssig genutzt – können PCM große Mengen an Energie aufnehmen bzw. abgeben. Die Temperatur des PCM bleibt dabei nahezu konstant, man spricht deshalb von latenter Energiespeicherung. Die Nutzung dieser Methode zur Energiespeicherung ist nicht grundsätzlich neu. So wird der Phasenwechsel Wasser \leftrightarrow Eis bereits seit Jahrhunderten zur Kühlung genutzt. Allerdings sind mittlerweile immer mehr speziell für eine spezifische Anwendung entwickelte Phasen-

wechselmaterialien am Markt verfügbar, deren thermische Eigenschaften wie Schmelzenthalpie und Phasenwechseltemperatur gezielt optimiert wurden. Typische Stoffklassen, die im Gebäudebereich zum Einsatz kommen sind Paraffine und Salzhydrate.

In den PCM-Kühldecken am ZAE Bayern kommt das kommerzielle Salzhydrat «SP22A17» der Firma Rubitherm Technologies GmbH zum Einsatz, das seinen Phasenwechsel im Temperaturbereich von 22 °C - 24 °C aufweist. Das PCM wird in Metallbehältern – sogenannten CSM-Makroverkapselungen (CSM = compact storage module, s. Abbildung 2 links) – angeboten, mit denen beispielsweise eine Integration in Kühldecken möglich ist. Die gemessene Enthalpiekurve ist in Abbildung 2 rechts dargestellt. Diese beschreibt die temperaturabhängige massenspezifische Wärmespeicherfähigkeit des Materials. Viele PCM und insbesondere Salzhydrate weisen häufig eine Hysterese in den Enthalpiekurven für den Aufheiz- und Abkühlvorgang auf. Die zuvor im Phasenwechseltemperaturbereich, hier 22 °C bis 24 °C, aufgenommene Wärme wird dadurch teilweise erst bei niedrigeren Temperaturen mit der beginnenden Kristallisation des Materials wieder freigesetzt.

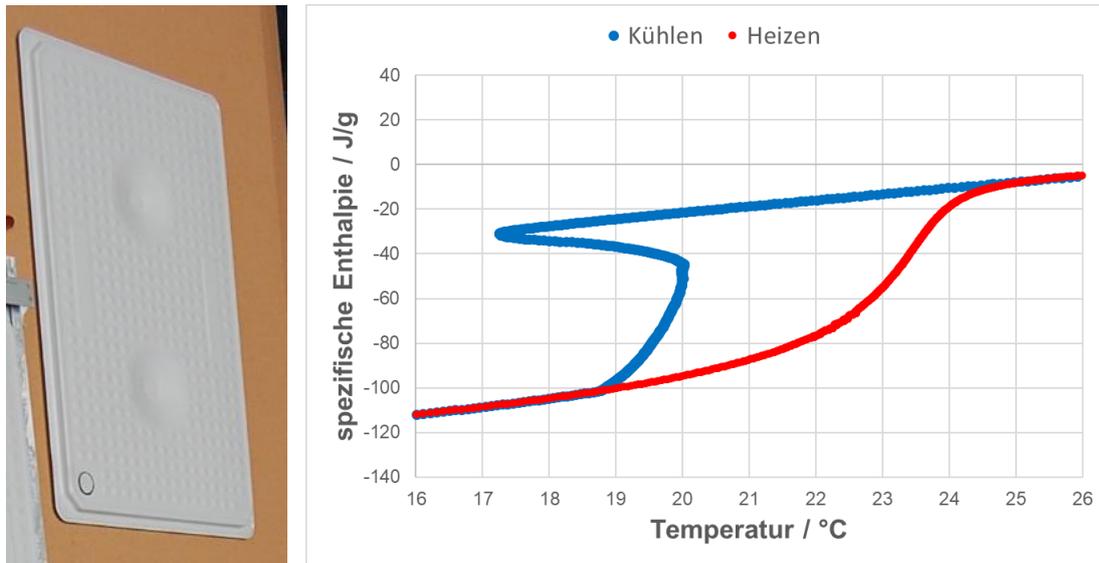


Abbildung 2: CSM-Makroverkapselung gefüllt mit SP22A17 (links) und spezifische Enthalpie eines solchen Moduls (rechts), gemessen mit der T-History-Methode am ZAE Bayern, für das Aufheizen (rote Kurve) und Abkühlen (blaue Kurve).

2.2. PCM-Kühldecken im EEC

Die PCM-Kühldecken wurden vom ZAE Bayern zusammen mit der Firma Lindner Group KG entwickelt und für die Installation im EEC als Prototypen bei diesem Unternehmen gefertigt. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3 dargestellt.

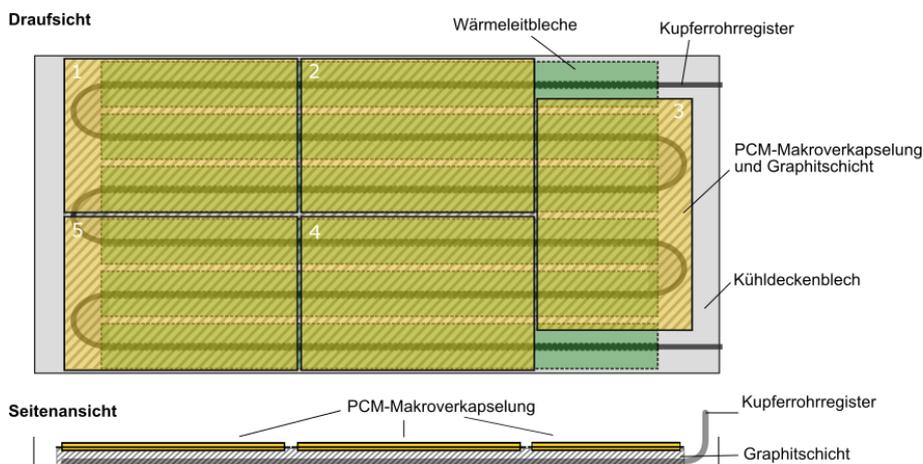


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der PCM-Kühldecken am ZAE Bayern.

Die PCM-gefüllten CSM-Makroverkapselungen werden auf herkömmliche Kühldeckenpaneele aufgelegt und zur besseren thermischen Ankopplung in eine Zwischenschicht aus expandiertem Graphit eingepresst. Pro Kühldeckenpaneel finden 5 CSM-Makroverkapselungen Platz, was einer PCM-Massenbelegung von rund 15 kg pro m² Kühldecke entspricht.

Die PCM-Kühldecken können anschließend wie herkömmliche Kühldecken installiert und angeschlossen werden. Am EEC wurden nahezu alle Büroräume sowie die Seminarräume mit den PCM-Kühldecken ausgerüstet, lediglich in einigen Referenzräumen wurden konventionelle Kühldecken ohne PCM installiert. Vier Büroräume auf der Südseite des EEC - drei davon mit PCM, einer ohne - wurden zusätzlich zur ohnehin zum Zweck der Gebäudeautomation vorhandenen Sensorik mit umfangreicher Messtechnik ausgerüstet.



Abbildung 4: PCM-Kühldecken in den Büroräumen des EEC, links im geöffneten, rechts im geschlossenen Zustand.

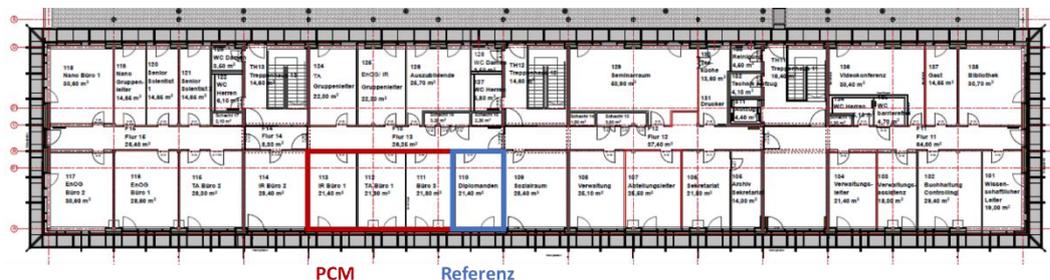


Abbildung 5: Außenansicht der Süd- und Ostfassade des EEC (oben) sowie Raumplan mit den südorientierten Messräumen (unten).

Die vier Messräume sind nahezu baugleich, besitzen eine Grundfläche von knapp 22 m² sowie jeweils 12 Kühldeckenpaneele mit einer Fläche von 10 m². Im Fall der PCM-Räume entspricht dies einer Gesamtmenge an PCM von 150 kg pro Raum mit einer Wärmespeicherkapazität von 4,3 kWh zwischen 19,5 °C und 26,5 °C. Die relativ geringe Kühldeckenfläche ist den baulichen Gegebenheiten in den Büroräumen geschuldet, da ein Teil der Decke mit transluzenten Tageslichtelementen sowie mit Akustikelementen belegt ist.

2.3. Regelstrategie

Die grundlegende Idee der PCM-Kühldecken ist, die Raumkühlung tagsüber rein passiv über das Aufschmelzen und die Temperaturpufferwirkung des PCM sicher zu stellen. Sobald die Raumtemperatur über die Phasenwechseltemperatur des PCM steigt, beginnt dieses zu schmelzen und entzieht dem Raum dabei Wärme. Bei idealem Wärmeaustausch zwischen Raumluft und PCM würde die Raumtemperatur dabei während des Aufschmelzvorganges nicht über die PCM-Temperatur ansteigen. Während des Phasenwechsels bleibt die PCM-Temperatur nahezu konstant und hält somit auch den Raum auf nahezu konstanter Temperatur. Erst wenn das PCM komplett aufgeschmolzen ist steigt die Temperatur weiter an. In der Realität muss ein Temperaturgradient zwischen Raumluft und PCM vorliegen, je größer dieser ist, desto größer ist die Kühlwirkung des PCM. In der Nacht wird das PCM dann über die Kühldecken aktiv regeneriert, es erstarrt und steht wieder für den nächsten Tag zur Verfügung. Die PCM-Menge ist dabei so ausgelegt, dass im Sommer die an einem Tag anfallende Wärmemenge nahezu komplett im PCM gespeichert werden kann.

Auf diese Weise wird eine Verschiebung der Kühllasten vom Tag in die Nacht sowie eine Minderung der Kühllastspitzen erreicht. Da nachts in der Regel kühlere Außentemperaturen vorliegen, kann die Kälteerzeugung zur Regeneration des PCM zusätzlich energetisch effizienter erfolgen als bei einer konventionellen Raumkühlung, bei der die Kälte zeitgleich, also tagsüber, erzeugt werden muss. Aufgrund der Konstruktion der PCM-Kühldecken können diese auch tagsüber aktiv betrieben werden, sollte die passive Kühlleistung des PCM nicht ausreichen, oder dieses bereits komplett aufgeschmolzen sein.

Zu Beginn des Gebäudebetriebes wurde für die PCM-Kühldecken eine Standardregelung implementiert, die um eine einfache zeitgesteuerte Regenerationsphase während der Nacht ergänzt wurde. Es zeigte sich, dass die Regelung der PCM-Kühldecken deren Energieeffizienz stark beeinflusst, so dass im Lauf der Messjahre verschiedene Optimierungen durchgeführt wurden. Dabei konnten zwei Haupteinflüsse identifiziert werden:

- die Kühlgrenztemperatur, also die Raumtemperatur, ab der die Kühldecken aktiv durchströmt werden und
- die Regenerationsstrategie, also wie das PCM nachts wieder in den festen Zustand überführt wird.

Bei der anfangs implementierten Standardregelung war die Kühlgrenztemperatur auf 24 °C eingestellt, d.h. immer wenn die Raumtemperatur 24 °C überschreitet, schalten die Kühldecken aktiv. Dieser Wert kann von den Nutzern über ein Bedienfeld im Raum um ± 3 K angepasst werden. Da der Phasenwechsel des verwendeten PCM hauptsächlich zwischen 22 °C und 24 °C stattfindet und eine gewisse Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und PCM zur Ausbildung einer Kühlwirkung benötigt wird, führte dies dazu, dass das passive Kühlpotential des PCM kaum genutzt wurde: die Kühldecken wurden aktiv, bevor das PCM aufschmelzen konnte. Deshalb wurde die Kühlgrenztemperatur in den PCM-Räumen auf 26 °C angehoben.

Bei der Regenerationsstrategie muss der Ladezustand des PCM berücksichtigt werden. Dieser gibt an, wie viel PCM bereits aufgeschmolzen ist und somit nicht mehr nennenswert zur Wärmespeicherung bzw. Kältebereitstellung beitragen kann. Eine zeitgesteuerte Regeneration mit festeingestellten Regenerationsdauern stellte sich als energetisch ineffizient heraus, da hier entweder in der Übergangszeit, in der das PCM tagsüber nur wenig aufschmilzt, unnötig lange, oder in der Sommerperiode zu kurz regeneriert wurde. Deshalb wurde eine bedarfsgeregelte PCM-Regeneration implementiert, bei der über die Temperatur-Enthalpie-Korrelation (s. Abbildung 2 rechts) der Ladezustand des PCM ermittelt und abhängig von diesem dann die Zieltemperatur des PCM während der aktiven nächtlichen Regeneration festgelegt wird. Ist diese erreicht, wird die Regeneration gestoppt. Um die

klimatischen Randbedingungen zu berücksichtigen wird das PCM nicht notwendigerweise vollständig regeneriert, sondern kann in einem teilaufgeschmolzenen Zustand verbleiben. Ist noch genügend Restkapazität im PCM für den nächsten Tag vorhanden wird gar nicht regeneriert. Die Regeneration findet generell nachts statt, um die dann kühleren Außentemperaturen zu nutzen. Zunächst wurde mit der Regeneration immer um 22 Uhr abends begonnen. Da zu diesen Zeiten aber oft noch relativ warme Außentemperaturen vorliegen startet die Regeneration seit 2019 erst um 1 Uhr nachts.

Mit diesen beiden Optimierungen werden die PCM-Kühldecken im EEC nun seit 2018 betrieben. Die Kühldecken ohne PCM im Referenzraum werden mit der ursprünglichen Standardregelung betrieben, d.h. die Kühlgrenztemperatur beträgt 24 °C und nachts erfolgt kein Regenerationsbetrieb.

3. Ergebnisse

Für die nachfolgenden Betrachtungen wurden die Daten der vier Messräume vom 14.7.-22.9.2018, vom 19.7.-8.9.2019 und vom 30.7.-15.10.2021 ausgewertet. Einen Überblick der Wetterbedingungen dieser drei Sommerperioden gibt Abbildung 6.

Die Außentemperaturen lagen in der Messperiode 2018 und 2019 deutlich höher als in 2021, so lag die mittlere Außentemperatur 2018 bei 20,2 °C, 2019 bei 19,6 °C und 2021 nur bei 16,4 °C. 2018 traten deutlich häufiger Außenlufttemperaturen im Bereich 26 bis 32 °C auf als 2019, 2019 weist dagegen etwas mehr sehr warme Zeiträume mit Temperaturen um die 34 °C auf als 2018. Während 2019 warme Zeiträume nur wenige Tage andauerten waren die Wärmeperioden 2018 länger mit bis zu 2 Wochen Dauer.

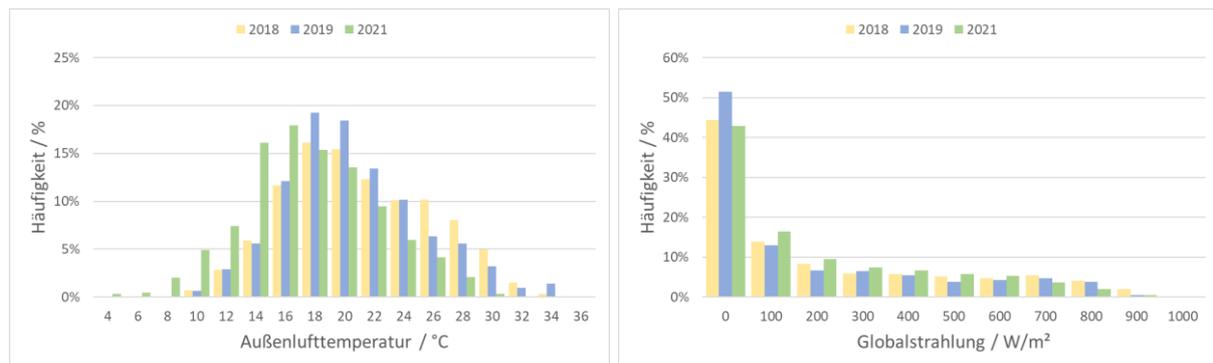


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung der Stundenwerte von Außenlufttemperatur (links) und Globalstrahlung auf die Horizontale (rechts) für die Messzeiträume 2018, 2019 und 2021.

Bei der Solarstrahlung zeigt sich ein ähnliches Bild: 2021 traten hohe solare Einstrahlungen von 700 W/m² oder mehr deutlich seltener auf; sehr hohe solare Einstrahlungen von 900 W/m² traten fast nur 2018 auf. Der Tagesmittelwert der Globalstrahlung lag 2018 bei 4,5 kWh/(m²d), während er 2019 und 2021 mit 3,7 kWh/(m²d) bzw. 3,8 kWh/(m²d) niedriger lag.

3.1. Nutzereinfluss und thermischer Komfort

Da bei Realdaten der Nutzereinfluss eine große Rolle spielt, wird zuerst untersucht, wie sich die Kühlgrenztemperaturen der Messräume, die ja von den Nutzern individuell angepasst werden können, unterscheiden. Hierzu wurden die eingestellten Kühlgrenztemperaturen sowie die operativen Raumtemperaturen während der Anwesenheitszeit der Nutzer, die von der GLT über Präsenzdetectoren erfasst wird, ausgewertet. Die Mittelwerte der Größen sind in Abbildung 7 dargestellt.

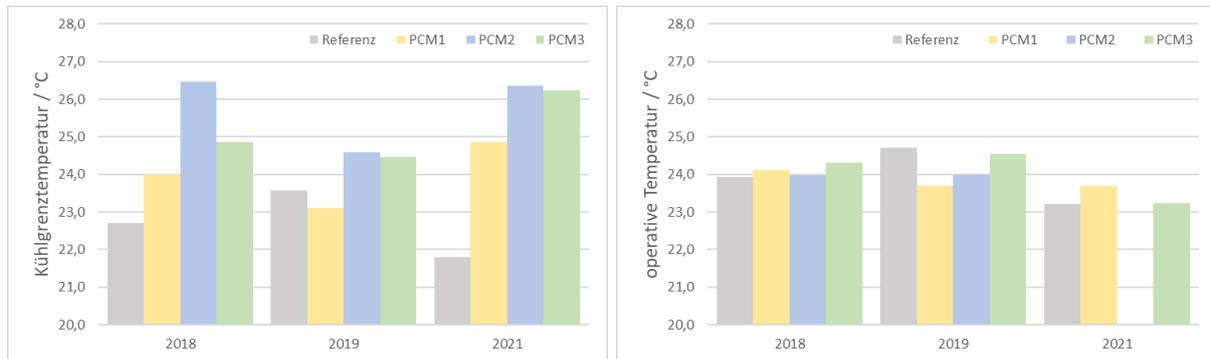


Abbildung 7: Mittlere Kühlgrenztemperaturen (links) und mittlere operative Raumtemperaturen (rechts) der vier Messräume während der drei Messperioden bei Anwesenheit der Nutzer. Aufgrund eines Sensorausfalls liegen für 2021 keine Messdaten der operativen Raumtemperatur im Raum PCM2 vor.

Bei den eingestellten Kühlgrenztemperaturen liegen die Werte des Referenzraumes meist tiefer als in den PCM-Räumen, vor allem 2021 gibt es hier eine große Differenz. Vergleicht man die tatsächlichen Kühlgrenztemperaturen mit den Sollwerten (24 °C im Referenzraum und 26 °C in den PCM-Räumen) zeigt sich, dass die Raumnutzer die Sollwerte häufig kühler einstellen. Trotz der teilweise sehr unterschiedlichen Kühlgrenztemperaturen liegen die mittleren operativen Raumtemperaturen in allen vier Räumen recht ähnlich. Insbesondere wirken sich die teilweise recht hohen Kühlgrenztemperaturen in den PCM-Räumen aufgrund der passiven Kühlwirkung der PCM-Kühldecken nicht nachteilig auf die operativen Raumtemperaturen aus, so dass die thermische Behaglichkeit in allen vier Messräumen vergleichbar ist.

3.2. Energieverbrauch

In den Messräumen wird der Kälteverbrauch der Kühldecken über Wärmemengenzähler erfasst. In Abbildung 8 ist dieser für die drei Messperioden dargestellt. Da die Messperioden unterschiedlich lang sind wurde jeweils der Tagesmittelwert bestimmt.

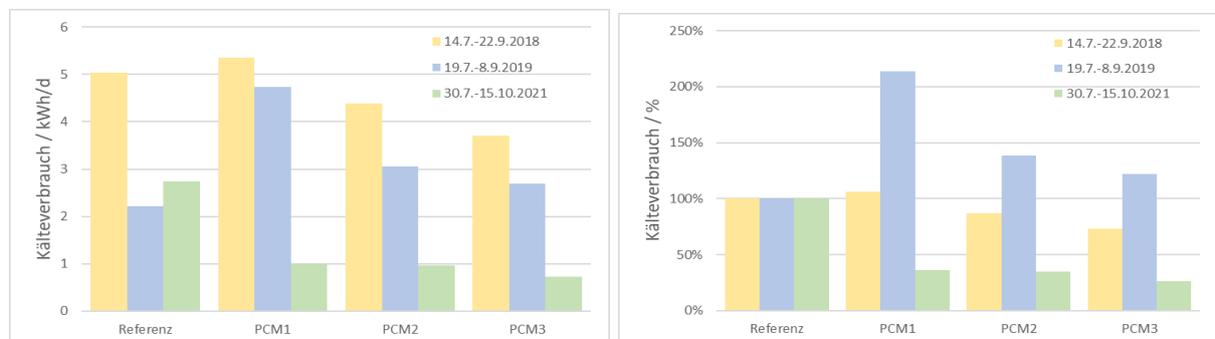


Abbildung 8: Tagesmittelwerte des Kälteverbrauchs in den vier Messräumen (links) für die Messzeiträume 2018, 2019 und 2021 sowie relativer Kälteverbrauch der PCM-Räume bezogen auf den Verbrauch des Referenzraumes (rechts).

Im Referenzraum ohne PCM lagen die Tagesmittelwerte des Kälteverbrauchs 2018 bei 5,0 kWh/d, 2019 bei 2,2 kWh/d und 2021 bei 2,7 kWh/d. Konform zu den Wetterdaten liegt der Kälteverbrauch hier 2018 am höchsten, der unerwartet geringe Wert für 2019 sowie der relativ hohe Wert für 2021 lassen sich durch die mittlere Kühlgrenztemperatur erklären, die im Referenzraum 2019 mit 23,6 °C deutlich höher eingestellt war als in den beiden anderen Messperioden, während sie 2021 mit 21,8 °C am tiefsten lag. Bei den drei PCM-Räumen liegen die Tagesmittelwerte des Kälteverbrauchs konform zu den Wetterdaten, d.h. die Werte sind 2018 am höchsten, gefolgt von 2019 und liegen 2021 am tiefsten.

Vergleicht man die Verbrauchswerte der PCM-Räume mit dem Referenzraum, ergeben sich für die einzelnen Messperioden generelle Unterschiede. 2018 liegt der Kälteverbrauch in Raum PCM1 etwas höher als im Referenzraum, während er für die beiden anderen PCM-Räume niedriger liegt. Ursache hierfür ist die niedrige Kühlgrenztemperatur in Raum PCM1, die im Mittel bei 24,0 °C lag, so dass die passive Kühlwirkung des PCM wenig genutzt

wurde. 2019 liegen die Verbräuche der PCM-Räume immer über den Werten des Referenzraumes. Während dieser Messperiode lagen die Kühlgrenztemperaturen in allen PCM-Räumen relativ niedrig. In Raum PCM1 lag sie im Mittel bei 23,1 °C und damit sogar niedriger als im Referenzraum. 2021 lagen die Kühlgrenztemperaturen der PCM-Räume dann deutlich höher, was den signifikant geringeren Kälteverbrauch im Vergleich zum Referenzraum erklärt. Trotzdem war die operative Raumtemperatur in Raum PCM1 nur minimal höher und die in Raum PCM3 nahezu identisch mit der im Referenzraum (s. Abbildung 7 rechts). In Raum PCM2 war 2021 der operative Temperatursensor ausgefallen, so dass keine Messwerte vorliegen. Eine Auswertung der mittleren Raumtemperaturen zeigte hier keine Unterschiede zwischen Raum PCM2 und dem Referenzraum.

Summiert man die Verbrauchsdaten aller drei Messperioden und mittelt zusätzlich über die drei PCM-Räume ergibt sich ein Kälteverbrauch von 3,4 kWh/d für den Referenzraum und von 2,8 kWh/d für die PCM-Räume (s. Abbildung 9). Man erhält somit eine mittlere Energieeinsparung durch die PCM-Kühldecken von 17 %.

Wie erwähnt ist bei gezeigter Analyse der Nutzereinfluss enthalten, was einen direkten Vergleich erschwert. Aus diesem Grund wurden zusätzlich spezielle Messungen an drei Wochenenden ohne Nutzereinfluss bei identischen und definierten Randbedingungen durchgeführt. Hierzu wurden die Räume möglichst thermisch von der Umgebung abgekoppelt – Jalousien geschlossen, Lüftung aus – und interne Lasten definiert über Kühllastsimulatoren (elektrische Heizer) eingebracht. Der Regelbetrieb erfolgte wie gehabt mit einer Kühlgrenztemperatur im Referenzraum von 24 °C und in den PCM-Räumen von 26 °C. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt.

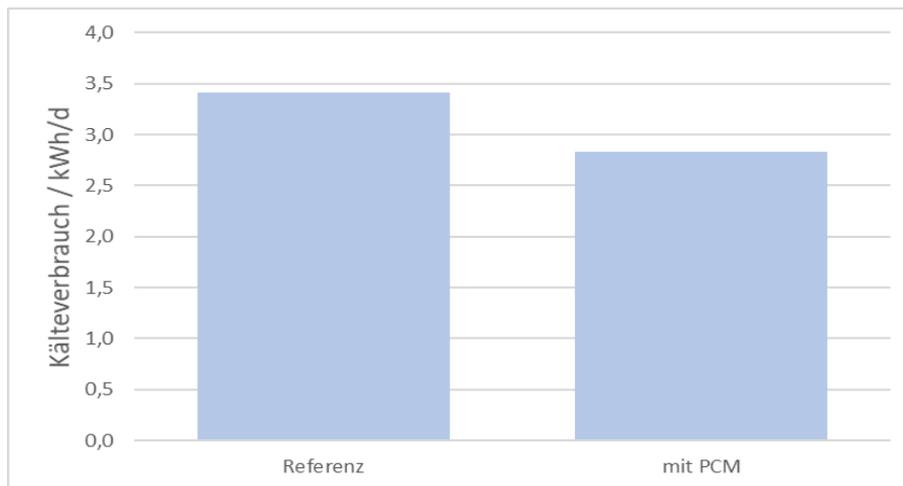


Abbildung 9: Tagesmittelwerte des Kälteverbrauchs für den Referenzraum sowie über alle drei PCM-Räume gemittelt für die gesamten Messperioden 2018, 2019 und 2021 mit Nutzereinfluss unter Realbedingungen.

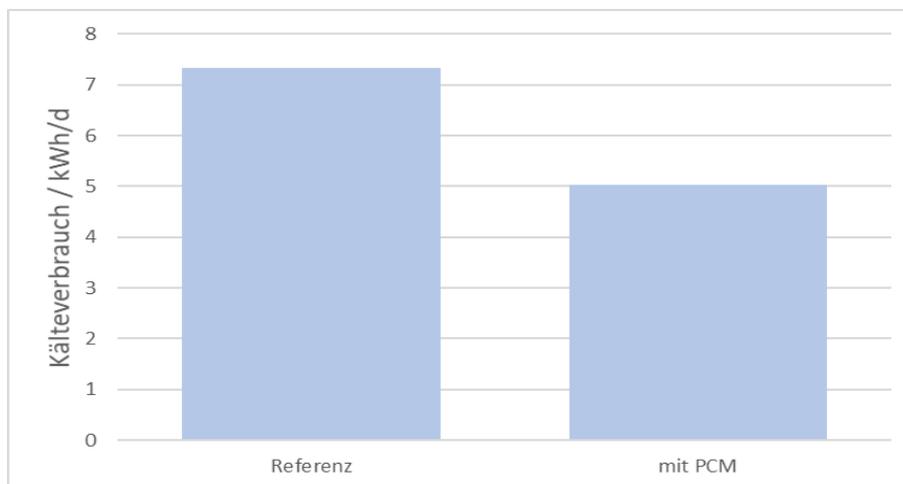


Abbildung 10: Tagesmittelwerte des Kälteverbrauchs für den Referenzraum sowie über die PCM-Räume gemittelt für drei Messwochenenden im Juli und August 2018 ohne Nutzereinfluss unter definierten Bedingungen.

Die Ergebnisse der Messungen ohne Nutzereinfluss zeigen einen deutlich höheren Kälteverbrauch, was an der Höhe der künstlich eingebrachten internen Lasten liegt. Die Energieeinsparung der PCM-Kühldecken beträgt hier 31 %.

3.3. Kühllastverschiebung

Neben der Reduktion der Kältemengen im Raum sollen die PCM-Kühldecken auch die Kühllasten in die Nacht verschieben. Hierzu sind in Abbildung 11 die Volumenströme der Kühldecken der Messräume für die Messperiode 2018 aufgetragen. Im Referenzraum (oben links) sind die Kühldecken mit Ausnahme weniger Nächte während einer zweiwöchigen Hitzeperiode vom 23.7. bis 10.8. nur tagsüber aktiv. In den PCM-Räumen fällt der Kältebedarf aufgrund der stattfindenden aktiven PCM-Regeneration auch nachts an. Abhängig vom Raum und den eingestellten Kühlgrenztemperaturen können hierdurch mehr oder weniger Kühllasten vom Tag in die Nacht verschoben werden. In Raum PCM2 funktioniert dies extrem gut, hier lag die mittlere Kühlgrenztemperatur bei 26,5 °C, in den beiden anderen PCM-Räumen hat man tagsüber zeitweise noch signifikanten Kältebedarf, da die mittleren Kühlgrenztemperaturen hier deutlich tiefer lagen – 24,9 °C in Raum PCM3 und 24,0 °C in Raum PCM1.

2021 lagen die mittleren Kühlgrenztemperaturen in den PCM-Räumen näher an den Sollwerten – 24,9 °C in Raum PCM1, 26,4 °C in Raum PCM2 und 26,2 °C in Raum PCM3 – was sich vorteilhaft auf die Lastverschiebung auswirkt. In Raum PCM1 mit der niedrigsten Kühlgrenztemperatur treten tagsüber noch vereinzelt aktive Kühlperioden auf, in den beiden anderen PCM-Räumen können diese vollständig vermieden werden (s. Abbildung 12). Der Referenzraum wird dagegen tagsüber sehr intensiv aktiv gekühlt.

Wertet man alle drei Messperioden aus, so fallen im Referenzraum 88 % der Volumenströme tagsüber von 7 bis 18 Uhr an; bei den PCM-Räumen kann dies im Mittel auf 31 % gesenkt werden. Die Schwankungsbreite innerhalb der PCM-Räume ist dabei recht groß und reicht von 4 % in Raum PCM2 bis zu 56 % in Raum PCM1.

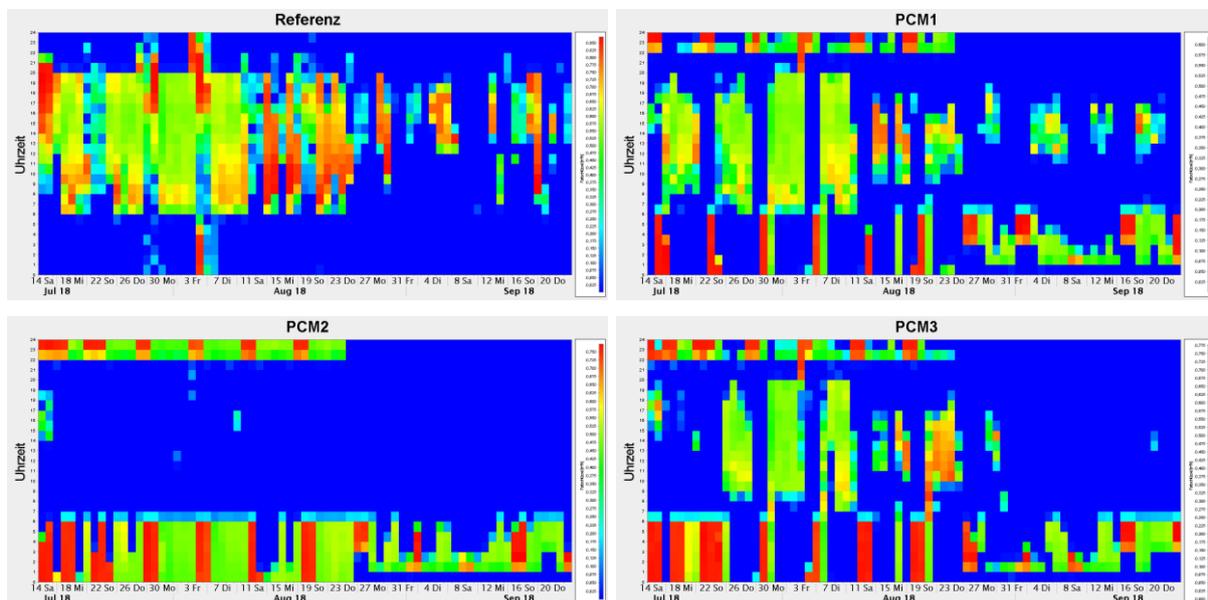


Abbildung 11: Carpetplots der Volumenströme V (dunkelblau: $V = 0$, rot: $V = \max$) der Kühldecken in den Messräumen für die Messperiode 2018 mit relativ niedrigen Kühlgrenztemperaturen in den Räumen PCM1 und PCM3.

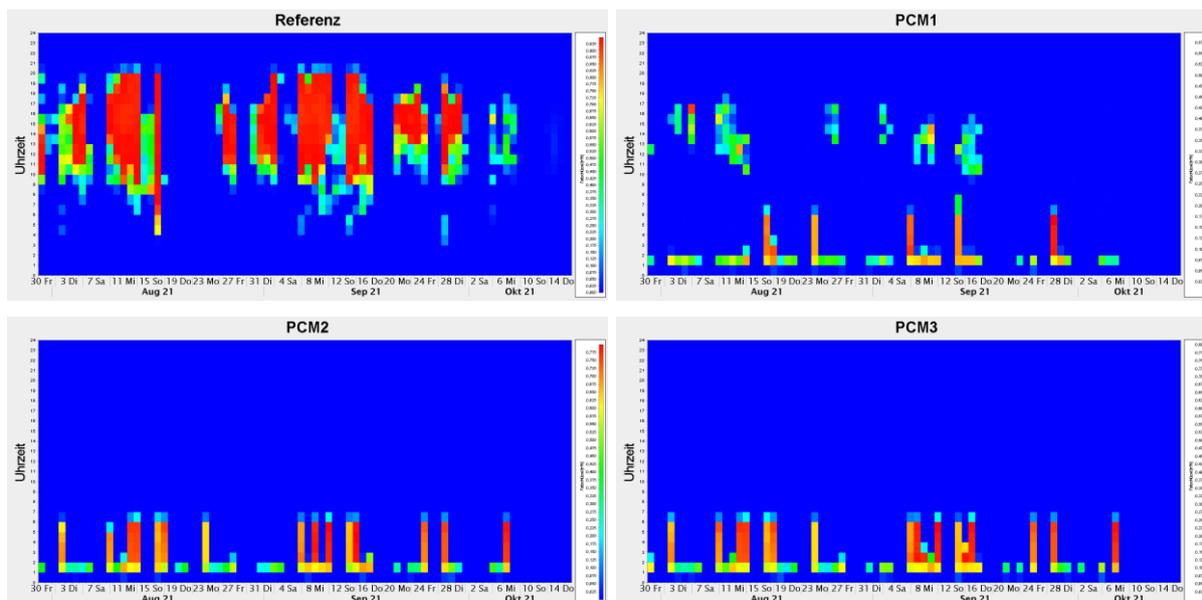


Abbildung 12: Carpetplots der Volumenströme V (dunkelblau: $V = 0$, rot: $V = \max$) der Kühldecken in den Messräumen für die Messperiode 2021 mit höheren Kühlgrenztemperaturen in den PCM-Räumen.

3.4. Optimierungspotenzial und Besonderheiten

Zusätzlich zur Reduktion der in die Räume einzubringenden Kältemenge erlauben die PCM-Kühldecken aufgrund der Lastverschiebung in die Nacht außerdem die Nutzung kühlerer Randbedingungen zur Kälteerzeugung. Hierdurch kann die Effizienz des gesamten Kältesystems weiter erhöht und Energie eingespart werden. Außerdem sind hierdurch auch regenerative Kältequellen erschließbar, die bei konventionellen Kühldecken nicht genutzt werden können. Anhand von Simulationsrechnungen konnte gezeigt werden, dass mit einem PCM-Kühldeckensystem mit Kompressionskältemaschine in warmem Klima (z.B. Athen) Energieeinsparungen von rund 20 % verglichen mit konventionellen Kühldecken möglich sind. Werden regenerative Kältequellen eingesetzt erhöht sich der Wert auch für moderatere Standorte (z.B. Würzburg) auf rund 40 %. Zusätzliches Energieeinsparpotenzial besteht in der Einbindung einer Wetterprognose in die Regenerationsregelung des PCM.

Generell besteht durch die gezielte Anpassung des PCM weiteres Optimierungspotenzial. Hier sind ein schmaler und auf die Zieltemperatur abgestimmter Schmelzbereich, eine geringe Unterkühlung, sowie eine möglichst hohe Enthalpie vorteilhaft.

Eine Besonderheit beim Einsatz von PCM-Kühldecken ist die Tatsache, dass der Phasenwechselbereich des PCM auf die gewünschte Raumtemperatur abgestimmt werden muss. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass nach Installation des PCM hiervon abweichende Raumtemperaturen unter Umständen nicht mehr energetisch sinnvoll eingeregelt werden können. Wird das PCM z.B. wie im EEC auf Sollraumtemperaturen von 24 – 26 °C ausgelegt, kann dies nachträglich nicht mehr bzw. nur durch Austausch des PCM für niedrigere Sollraumtemperaturen eingesetzt werden.

Dieser Umstand verdeutlicht die Verantwortung, die den Raumnutzern bei Verwendung eines solchen Systems zukommt; sie können die Energieeffizienz des Systems extrem beeinflussen. Werden z.B. zu tiefe und nicht mit dem Phasenwechselbereich des PCM kompatible Sollraumtemperaturen eingestellt, wird die passive Wirkungsweise der PCM-Kühldecken komplett ausgehebelt: die PCM-Kühldecken werden dann wie ein konventionelles Kühldeckensystem immer tagsüber aktiv betrieben.

Weiterhin ist anzumerken, dass die passive Kühlleistung des PCM immer geringer sein wird als bei einem aktiven Kühldeckenbetrieb. Bei einer aktiven Kühldecke kann die Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und Vorlauftemperatur, z.B. 16 °C, voll genutzt werden. Da der Phasenwechselbereich des PCM aber zwischen Vorlauftemperatur und

gewünschter Raumtemperatur liegen muss – es muss ja über die Vorlauftemperatur regeneriert werden können – reduziert sich im passiven Kühlbetrieb die nutzbare Temperaturdifferenz und damit die Kühlleistung. Deshalb sollte bei der Planung von PCM-Kühldecken idealerweise eine größere Fläche als bei Kühldecken ohne PCM vorgesehen werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

PCM-Kühldecken stellen bei entsprechender Regelung eine sehr energieeffiziente Möglichkeit zur Raumkühlung dar. Monitoringdaten am EEC belegen ein Energieeinsparpotenzial der PCM-Kühldecken von 17 % im Vergleich zu einem konventionellen Kühldeckensystem bei gleicher thermischer Behaglichkeit. Zusätzlich kann die benötigte Kälte energieeffizienter erzeugt werden, da die Kühllasten durch das PCM vom Tag in die Nacht verschoben werden. Hierdurch erlauben PCM-Kühldecken die Nutzung regenerativer Verfahren zur Kälteerzeugung, was die Energieeffizienz solcher Systeme weiter erhöht und Energieeinsparungen von bis zu 40 % in moderaten Klimata prognostiziert.

Herausfordernd für PCM-Kühldeckensysteme ist die Festlegung der Sollraumtemperaturen auf einen relativ engen Temperaturbereich bei Installation des PCM sowie der hieraus entstehende extreme Einfluss der Raumnutzer auf die Energieeffizienz.

Am deutschen Markt sind momentan keine Anbieter kommerzieller Lösungen wasserdurchströmter PCM-Kühldecken bekannt. Eine gute Übersicht der Hersteller von PCM-Materialien und PCM-Komponenten bietet die RAL Gütegemeinschaft PCM e.V. [4]. Vor dem Hintergrund zunehmender Klimaerwärmung sowie der aus unterschiedlichen Perspektiven dringend notwendigen Steigerung der Energieeffizienz wäre es wünschenswert, dass diese Technologie eine verbreitete Umsetzung in die Praxis erfährt.

5. Danksagung

Die Arbeiten wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Projektes MoniResearch (FKZ: 03ET1245).

- [1] International Energy Agency: The Future of Cooling - Opportunities for energy-efficient air conditioning, OECD/IEA 2018
- [2] ZAE Bayern: Abschlussbericht zum Projekt "DEENIF"; doi: <https://doi.org/10.2314/GBV:834628120>
- [3] ZAE Bayern: Abschlussbericht zum Projekt "PCM-DEMO II: PCM in Demonstrationsanwendungen"; doi: <https://doi.org/10.2314/KXP:1691569607>
- [4] RAL Gütegemeinschaft PCM e.V.; www.pcm-ral.org