Abschlussbericht

Verbundvorhaben MultiFace

Multifunktionale, schlanke, wärmedämmende Fassadenelemente mit erhöhter Wärmespeicherkapazität und integrierter aktiver Temperierung zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz von Gebäuden

Zuwendungsempfänger:	Universität Paderborn
Förderkennzeichen:	03EN1028C
Förderzeitraum:	2021-01-01 – 2024-03-31

Weitere Vorhabenbeteiligte:	Center for Applied Energy Research e.V.
	TU Kaiserslautern, Fachbereich Bauingenieurwesen
	Lang Hugger Rampp GmbH
	C-Con GmbH & Co. KG
	GMBU e.V., Fachsektion Halle
	va-Q-tec AG
	ESDA Technologie GmbH

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzzusammenfassung des Verbundvorhabens

Das Projekt MultiFace zielte darauf ab, multifunktionale, schlanke, wärmedämmende Fassadenelemente mit erhöhter Wärmespeicherkapazität und integrierter aktiver Temperierung zu entwickeln, um die Energie- und Ressourceneffizienz von Gebäuden signifikant zu verbessern. Die Energieeinsparung im Gebäudebereich spielt eine zentrale Rolle in der Energiewende, da rund 40 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland auf Wohn- und Nichtwohngebäude entfallen. Dementsprechend war die Weiterentwicklung von Gebäudefassaden ein wesentlicher Bestandteil des Projekts, um energie- und ressourcenschonendere Bauweisen zu ermöglichen.

Ziel des Projekts war die Entwicklung innovativer Fassadenelemente, die verschiedene Energieeffizienztechnologien zur Kühlung und Heizung kombinieren. Die Multifunktionalität der Fassadenelemente zeigt sich in der synergetischen Kombination unterschiedlicher Komponenten, die die Nutzung regenerativer Energiequellen an der Gebäudefassade ermöglichen und erweitern. Der Schwerpunkt lag auf der Optimierung der thermischen Eigenschaften des Systems, insbesondere um die Energieeffizienz des Fassadensystems zu steigern.

Das Projekt MultiFace basierte auf dem aktuellen wissenschaftlichen und technischen Stand der Forschung im Bereich energieeffizienter Gebäudefassaden. Zahlreiche Forschungsprojekte hatten zuvor multifunktionale Fassadenelemente untersucht, doch das MultiFace-Projekt setzte sich das Ziel, diese Entwicklungen weiter voranzutreiben, insbesondere durch die Integration von PCM und VIPs in ein schlankes Fassadensystem aus ultrahochfestem Beton. Diese Kombination ermöglichte eine deutliche Verbesserung der Wärmespeicherkapazität und der Dämmwirkung bei gleichzeitiger Reduktion der Fassadendicke.

Die Verbundpartner und ihre Arbeitsschwerpunkte im Projekt waren vielfältig: Das Center for Applied Energy Research (CAE) war für die wissenschaftliche Begleitung und Gesamtprojektkoordination verantwortlich, darunter die Komponentenentwicklung, Systemoptimierung, das Monitoring, die Ökobilanzierung und Öffentlichkeitsarbeit. Die Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) entwickelte das Konstruktionskonzept und die Herstellungsabläufe für die multifunktionalen Fassadenelemente, führte experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten und energetische Simulationen durch. Das Architekturbüro Lang Hugger Rampp (LHR) arbeitete an der baukonstruktiven Entwicklung und Marktpositionierung des Systems. C-Con GmbH & Co. KG stellte korrosionsbeständige Armierungssysteme aus Basaltfasern her. Die Firma ESDA fokussierte sich auf die Entwicklung und Optimierung von PCM-Speicherkassetten, während die Gesellschaft zur Förderung von Medizin-, Bio- und Umwelttechnologien e.V. (GMBU) das Prototyping für diese Kassetten und Materialmodifikationen übernahm. Das Kompetenzzentrum für Nachhaltige Energietechnik (KET) der Uni Paderborn optimierte die Geometrie der PCM-Kassetten für die thermische Aktivierung, und die va-Q-tec AG entwickelte hochwärmedämmende Vakuumisolationspaneele (VIPs) für die Fassadenelemente.

Das Herzstück der entwickelten Fassadenelemente war die Integration von innovativen Materialien wie Phasenwechselmaterialien (PCM) und Vakuumisolationspaneelen (VIPs) in Tragelemente aus Faserbeton und die wärmebrückenminimierte Befestigung der einzelnen Bauelemente durch basaltfaserverstärkte Kunststoffanker. Diese Materialien wurden getestet, um ihre thermischen Eigenschaften unter realen Bedingungen zu evaluieren. PCM sind besonders

dafür geeignet, thermische Spitzenlasten zu verschieben und die Innentemperatur eines Gebäudes zu regulieren, indem sie Wärme aufnehmen und bei Bedarf wieder abgeben. VIPs hingegen ermöglichen eine extrem gute Wärmedämmung, während gleichzeitig die Fassadenelemente schlank und leicht bleiben.

Ein wichtiger Aspekt des Projekts war die Definition der am besten geeigneten Typologie für die Auslegung des Paneels, die durch LHR durchgeführt wurde. Die Wahl fiel auf Verwaltungsgebäude, da diese zu definierten Nutzungszeiten und mit einer festgelegten Personenanzahl genutzt werden. Verwaltungsgebäude bieten somit optimale Bedingungen für die thermische Aktivierung der Fassadenoberfläche zur Klimatisierung der Innenräume sowie für die gezielte Nutzung der PCM-Kassette zur Speicherung oder Abgabe latenter Energie. Basierend auf anerkannten Richtlinien für Verwaltungsgebäude wurden die Abmessungen des MultiFace-Paneels auf 1,35 m x 3,75 m festgelegt. Für die thermischen Simulationen stellte der Partner LHR ein Referenzprojekt zur Verfügung, das auf diesen Formatvorgaben aufbaute. Darüber hinaus wurde eine Datenmatrix entwickelt, um die relevanten Anforderungen an ein Fassadensystem auf Basis des aktuellen Marktes zu definieren, einschließlich Abmessungen, Ausführungen und technischer Spezifikationen der Produkte.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts seitens LHR war die Entwicklung eines Befestigungskonzepts für die Paneele, sowohl für die Verbindung mit der Gebäudestruktur als auch untereinander. Es wurde festgestellt, dass das Elementfassaden-Befestigungssystem Ähnlichkeiten mit dem MultiFace-System aufweist, was als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Lösung diente. Zudem wurden Brandschutzanforderungen für die Paneel-Komponenten untersucht, mit dem Fokus auf nicht brennbare oder feuerhemmende Materialien. Ein Popup-Modell, das die Ergebnisse des Projekts grafisch darstellt, wurde entwickelt, um die Forschungsergebnisse der Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Der Einsatz von Basalt als Armierungsmaterial stand bei den Untersuchungen im Projekt im Fokus, da es gegenüber herkömmlichen Stahlarmierungen signifikante Vorteile bietet. Diese umfassen eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit, geringere Anforderungen an die Betonüberdeckung, eine hohe Zugfestigkeit, einen reduzierten Energieaufwand in der Herstellung, eine verbesserte Rezyklierbarkeit und eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit. Diese Eigenschaften ermöglichen es, schlanke, langlebige und wärmebrückenarme Fassadenelemente zu realisieren, die gleichzeitig unter Nachhaltigkeitsaspekten überzeugen.

Für die Umsetzung wurden zwei spezifische Basaltprodukte der Firma C-Con eingesetzt: Rockstix und Rebars. Rockstix sind Basaltfaserstäbe, die als Armierung für die Betonfassadenplatten dienen. Sie tragen zur Erhöhung der strukturellen Festigkeit bei und verhindern durch ihre mechanischen Eigenschaften die Rissbildung, die durch thermische Belastungen und Witterungseinflüsse auftreten kann. Rebars sind ebenfalls Basaltfaserstäbe, die durch einen Umwindefaden verstärkt sind. Sie wurden im Befestigungssystem eingesetzt, um eine wärmebrückenminimierte Verbindung der Fassadenelemente zu gewährleisten. Die beidseitig metallischen Ankerköpfe der Rebars sorgen für eine stabile Verankerung und ermöglichen gleichzeitig die reversible Verbindung mehrerer Fassadenplatten. Im Zuge der experimentellen Untersuchungen wurden umfassende Prüfungen der Rockstix hinsichtlich ihrer Eignung als Armierung für Ultrahochleistungsbeton durchgeführt. Dazu zählten Pull-out- und Einbindungsversuche, um die optimale Länge und den geeigneten Durchmesser der Basaltfasern für die Betonarmierung zu bestimmen. Des Weiteren wurden Mischversuche sowie 3-Punkt-Biegeversuche durchgeführt, um das ideale Mischverhältnis für den verstärkten Beton zu

validieren. Ein weiterer zentraler Aspekt der Untersuchungen war der Nachweis der Alkalibeständigkeit der Basaltarmierungen, um ihre Langzeitstabilität in alkalischen Betonmilieus sicherzustellen. Parallel dazu wurden die Befestigungsanker, bestehend aus Rebars mit metallischen Hülsen, optimiert. An beiden Enden der Rebars wurden metallische Hülsen aufgepresst und mit Gewinden für die Befestigung ausgestattet. Dabei wurden der Stabdurchmesser, der Anpressdruck, die Rauheit der Hülseninnenfläche sowie die Rundheit der Rebars gezielt modifiziert, um die strukturelle Leistungsfähigkeit des Systems weiter zu verbessern. Die Untersuchungen zeigten, dass die Kombination aus Rockstix und Rebars ein effektives Armierungs- und Befestigungssystem für das MultiFace-Fassadensystem darstellt, das die thermische und mechanische Performance signifikant steigert. Die mit Rockstix verstärkten Fassadenplatten wiesen im Vergleich zu nicht verstärkten Platten eine um etwa 15 % niedrigere Wärmeleitfähigkeit auf. Die gewonnenen Ergebnisse aus den Tests und Optimierungen wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt und im Demonstrator erfolgreich implementiert.

Bei der Wahl der Betonrezeptur lag der Fokus bei der RPTU auf der Verarbeitbarkeit, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit. Entsprechend dem Fokus fiel die Wahl auf einen Feinkornbeton der Klasse C90/105, der sich durch eine herausragende ökologische Bilanz auszeichnet. Diese Betonklasse zeichnet sich besonders für seine hohe Leistungsfähigkeit bei filigranen Bauteildicken aus. Um die Verarbeitbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu optimieren, wurde ein maximaler Fasergehalt von 3 Vol.-% festgelegt. Der Beton zeichnet sich durch seine Fließfähigkeit und Selbstverdichtungsfähigkeit aus, was eine effiziente Verarbeitung ermöglicht. Zur Überprüfung der Materialeigenschaften wurden mehrere Prototypen mit Variation des Fasergehaltes labortechnisch untersucht. Das Ergebnis der Untersuchung zeigte eine ausgezeichnete Verarbeitbarkeit des Frischbetons bis zu einem Fasergehalt von 2 Vol.-%. Bei diesem Fasergehalt lässt sich der Beton problemlos verarbeiten. Zur weiteren Analyse wurden die Probekörper thermischen und mechanischen Prüfungen unterzogen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Nutzung eines Fasergehaltes von 1 Vol.-% optimal ist, um sowohl Wirtschaftlichkeit als auch Verarbeitbarkeit zu gewährleisten. Dieser Fasergehalt stellt sicher, dass der Beton sowohl kosteneffizient als auch gut verarbeitbar bleibt, ohne die erforderlichen Leistungsanforderungen zu beeinträchtigen. Ein zentraler Aspekt des Projekts war die mechanische Untersuchung der Befestigung der Fassadenelemente, bei der basaltfaserverstärkte Kunststoffanker (BFK-Anker) eingesetzt wurden, um sowohl die strukturelle Integrität als auch die thermische Effizienz des Systems zu gewährleisten.

Der Einfluss von Wärmebrücken, die durch Anker und Durchdringungen entstanden, wurde dabei vom CAE detailliert analysiert und durch Tests verschiedener Konfigurationen und Materialien minimiert. Zusätzlich wurden mechanische Prüfungen durch die RPTU am Basalttraganker durchgeführt, der mit beidseitig aufgepressten Gewindeköpfen versehen ist, um die einzelnen Schichten der Fassadenelemente reversibel zu verbinden. Die laborbasierten Untersuchungen bestätigten, dass der Basalttraganker die festgelegten Anforderungen an die Tragfähigkeit sowie an die Wärmeleitungseigenschaften erfüllt.

Die Firma va-Q-tec war im Projekt für die Integration von Vakuumisolationspaneelen (VIP) in die Fassadenelemente verantwortlich. Eine der größten Herausforderungen bei der Arbeit mit VIP bestand darin, Durchdringungen durch die Dämmebene zu realisieren, da diese eine potenzielle Schwachstelle für den Wärmeverlust darstellen. Besonders anspruchsvoll war die Handhabung von Durchdringungen, da diese das Dämmvermögen der VIP beeinträchtigen können. va-Q-tec entwickelte hierfür spezielle Lösungen, sowohl an den Kanten als auch in der Fläche der VIP. An den Kanten der VIP konnte eine Aussparung realisiert werden. Hierbei

wurde die Folie der VIP abgeflacht und zusätzliche Laschen angebracht, um die Struktur zu stabilisieren. Diese Maßnahme führte zu einem Dämmflächenverlust, beeinträchtigte jedoch das Alterungsverhalten der VIP kaum. Somit konnte eine funktionale Lösung entwickelt werden, die die Leistung der Fassadenelemente weitgehend aufrechterhielt. Durchdringungen in der Fläche stellten hingegen eine größere Herausforderung dar. Obwohl der Dämmflächenverlust relativ gering war, war es notwendig, Hilfskörper einzusetzen, um die strukturelle Integrität der VIP zu gewährleisten und Spannungen im Paneel zu vermeiden. Diese Hilfskörper brachten jedoch das Risiko von Ausgasungen mit sich, was die Langzeitstabilität der VIP beeinflussen konnte. va-Q-tec führte daher umfassende Tests durch, um das Ausgasungsverhalten der verwendeten Materialien zu minimieren und die Haltbarkeit der VIP zu sichern. Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Musterproben von VIPs mit Durchdringungen angefertigt, um deren thermische Eigenschaften und Dichtheit zu testen. Diese Proben dienten als Grundlage für die Optimierung der Fassadenelemente, insbesondere im Hinblick auf die Herausforderungen, die durch Durchdringungen in der Dämmfläche entstehen. Die thermische Charakterisierung der Musterproben umfasste die Messung der Wärmeleitfähigkeit unter verschiedenen Bedingungen, um sicherzustellen, dass die VIPs trotz der Durchdringungen ihre Funktion erfüllen konnten. Zusätzlich wurden die Proben auf Dichtheit geprüft, da selbst kleine Undichtigkeiten bei VIPs zu einem schnellen Verlust des Vakuums und damit zu einer erheblichen Reduktion der Dämmleistung führen können. Hierbei legte va-Q-tec besonderen Wert auf die Untersuchung der Langzeitstabilität der Folien und Materialien, um sicherzustellen, dass die VIPs über die gesamte Lebensdauer der Fassadenelemente hinweg dicht bleiben. Für einen Demonstrator sowie für die Bestimmung des U-Werts der gesamten Fassadenelemente wurden schließlich Prototypen-VIPs mit Durchdringungen in der Fläche angefertigt. Diese Prototypen ermöglichten es, reale Bedingungen zu simulieren und den Einfluss der Durchdringungen auf die thermische Gesamtleistung zu bewerten. Die Ergebnisse aus diesen Tests flossen direkt in die Optimierung der VIP-Integration in die Fassadensysteme ein und trugen dazu bei, dass die hohen Anforderungen an die Energieeffizienz und Lebensdauer der Fassadenelemente erfüllt wurden.

Die PCM-Hybridkassetten waren ein zentrales Element des Fassadensystems. Sie speichern Wärme und geben diese bei Bedarf ab, um eine gleichmäßige Innenraumtemperatur zu gewährleisten. Im Projekt wurde die thermische Ankopplung der Kassetten durch detaillierte Simulationen und reale Tests optimiert. Die Konstruktion der Kassetten basierte auf einer Kombination aus PCM und einem Wärmeübertrager, der die Be- und Entladung des Speichers ermöglicht.

Ein zentraler Fokus bei der Firma ESDA lag auf der Auswahl und Weiterentwicklung geeigneter Phasenwechselmaterialien (PCM) sowie PCM-Verbundmaterialien (PCM-V) für den vorgesehenen Temperaturbereich von 20 °C bis 30 °C. Während organische PCM ebenfalls untersucht wurden, lag der Schwerpunkt aufgrund der höheren volumetrischen Speicherkapazität und der geringeren Kosten auf der Optimierung von Salzhydraten. Hierzu wurden umfassende thermophysikalische Charakterisierungen durchgeführt, bei denen Parameter wie Schmelzpunkt, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit sowie die Zyklenstabilität und Unterkühlungseffekte bewertet wurden. Um die Zyklenstabilität und die Effekte der Unterkühlung genauer zu erfassen, wurde ein Schnelltestverfahren auf Basis eines 3-Schicht-Kalorimeters entwickelt, das die Analyse von Proben unter praxisnahen Bedingungen ermöglicht. Diese Untersuchungen führten zur gezielten Optimierung der PCM-Materialien, insbesondere durch die Zugabe von Keimbildnern zur Reduktion von Unterkühlung und durch die Verwendung von Additiven zur Verbesserung der Zyklenstabilität und Verhinderung von Phasenseparation.

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde vom CAE und der Firma ESDA ein iterativer Entwicklungsprozess zur Geometrieoptimierung der PCM-Hybrid-Kassetten durchgeführt, der vom KET durch computergestützte Fluiddynamik-Modelle (CFD) unterstützt wurde. Zur Analyse und Optimierung der PCM-Hybridkassetten entwickelte das KET ein detailliertes thermisches Modell in der Simulationssoftware Simcenter STAR-CCM+. Dieses Modell berücksichtigte die thermischen Wechselwirkungen zwischen dem PCM, dem Wärmeträgerfluid (z.B. Wasser) und der Betonverschalung der Kassetten. Die Simulationen umfassten verschiedene Geometrievarianten und Betriebsstrategien, um die effizienteste Nutzung des PCM zu gewährleisten. Um die Rechenzeit zu verkürzen, wurde ein repräsentatives Element der Hybridkassette definiert, dass das Verhalten der gesamten Kassette abbilden konnte. An den Schnittstellen zwischen den verschiedenen Komponenten, wie dem PCM und dem Wärmeträgerfluid, wurden Wärmeströme durch Energiebilanzen gleichgesetzt. Die Randbedingungen wurden entsprechend der physikalischen Gegebenheiten für das Wärmeträgerfluid definiert, während alle anderen Wände als thermisch isoliert angenommen wurden. Verschiedene Geometrien und thermohydraulische Varianten, wie Kassetten mit ein- oder beidseitiger Integration von Kapillarrohren, wurden simuliert und anhand von Prototypen der GMBU vom CAE evaluiert. Dabei lag der Fokus auf der Maximierung der Wärmeübertragungsfläche und der Sicherstellung einer hohen Effizienz bei gleichzeitig geringem Druckverlust.

Die GMBU übernahm das funktionelle Prototyping der PCM-Hybrid-Kassette, einschließlich der Entwicklung additiver Materialmodifikationen und einer Prüfmethodik zur Materialcharakterisierung. Polypropylen (PP) wurde als Werkstoff gewählt, was aufgrund seiner Verarbeitungsschwindung spezielle Voruntersuchungen zur additiven Verarbeitung erforderte. Basierend darauf wurden Verarbeitungsrichtlinien entwickelt. Erste Probedrucke zeigten Anpassungsbedarf hinsichtlich Maßhaltigkeit und Bauteildichtigkeit, was zu weiteren Optimierungen im Fertigungsprozess führte. Kunststoffschweißen zur Nachbearbeitung erwies sich als wenig vielversprechend. Schließlich wurde eine Strategie zur Herstellung wasserdichter Bauteile entwickelt. Materialmodifikationen zur Reduzierung von Schwindung und Verbesserung der Schichthaftung wurden getestet, wobei eine Rezeptur mit 10 % amorphem PP besonders erfolgreich war. Filamentbasierte Verfahren erwiesen sich aufgrund des geringen Materialdurchsatzes als ungeeignet.

Die endgültige Geometrie der Makroverkapselung der PCM-Hybrid-Kassetten wurde unter Berücksichtigung produktionstechnischer Randbedingungen von der Firma ESDA ausgearbeitet und in einem Pilotwerkzeug für die Serienproduktion getestet.

Die PCM-Hybrid-Kassetten wurden am CAE umfassend getestet, um ihre thermophysikalischen Eigenschaften, Zyklenstabilität und die Erfüllung der Anforderungen der RAL-Gütegemeinschaft für Phasenwechselmaterialien (RAL-GZ 896) zu prüfen. Ein zentrales Element war die Entwicklung eines Prüfstands, der es ermöglichte, bis zu vier Kassetten gleichzeitig unter kontrollierten Bedingungen zu testen und Temperatur- sowie Wärmeströme präzise zu messen. Diese Tests waren entscheidend, um die strengen Anforderungen der RAL-Gütegemeinschaft zu erfüllen, insbesondere hinsichtlich thermischer Leistung und Langlebigkeit. Die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Prüfstands wurde durch Vergleichsmessungen mit einem Referenzmaterial bestätigt. Besonders hervorzuheben ist, dass die PCM-Verbundmaterialien auch nach über 500 Zyklen keine signifikanten Veränderungen zeigten, was ihre Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit unterstreicht.

Im Rahmen des Projekts wurden von der RPTU detaillierte thermische Systemsimulationen durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der entwickelten Fassadenelemente zu bewerten. Dabei konnten verschiedene Regelungsstrategien und PCM-Varianten getestet werden. Eine wichtige Strategie war die Nachtabsenkung, bei der die Raumtemperatur außerhalb der Nutzungszeiten gesenkt wird, um den Energieverbrauch zu minimieren. Eine weitere untersuchte Methode war die Beladung der PCM-Hybridkassetten mit überschüssigem Strom aus Photovoltaikanlagen. Dieser Strom wird in Form von Wärme in den Fassadenelementen gespeichert und bei Bedarf genutzt, anstatt ins Netz eingespeist zu werden. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass die Kombination beider Regelungsstrategien die beste Leistung erbrachte. Es konnte ein Einsparpotenzial von über 35 % des Netzstrombedarfs im Vergleich zum Stand der Technik nachgewiesen werden. Dies wurde durch die erhöhte Speicherfähigkeit der PCM-Elemente und die Reduktion der Transmissionswärmeverluste durch die aktive Wandtemperierung ermöglicht. Zur Validierung dieser Ergebnisse wurde ein Monitoring am realen Fassadenelement im SmallHouse IV durchgeführt, dass die Simulationsergebnisse bestätigte.

Ein bedeutendes Ergebnis des Projekts war die Entwicklung eines geschosshohen Demonstrators an der RPTU, der als Prototyp diente, um die entwickelte Technologie unter realen Bedingungen zu testen und die Betriebseffizienz zu optimieren. Besonders wichtig war die Integration des Demonstrators in die Gebäudetechnik, um das volle Optimierungspotenzial für die Gebäudetemperierung zu nutzen. Der im SmallHouse IV installierte Demonstrator bestätigte zudem die einfache Revisionier- und Rezyklierbarkeit der Fassadenelemente. Der Auf- und Rückbau war problemlos möglich, die Passgenauigkeit der Komponenten sichergestellt, und der Anschluss an die Gebäudetechnik konnte reibungslos hergestellt werden, was die Integrität des gesamten Bauteilverbunds unterstreicht.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts lag auf der Durchführung von Lebenszyklusanalysen (LCA) durch das CAE. Diese Analysen bewerteten die ökologische Effizienz der entwickelten Fassadensysteme im Vergleich zu herkömmlichen Betonfassaden. Die LCA umfasste die Analyse der Herstellungsprozesse der einzelnen Komponenten wie der Betonschale, der basaltfaserverstärkten Kunststoffstäbe und der PCM-Hybridkassetten. Verschiedene Szenarien wurden betrachtet, um das Potenzial zur Reduktion des CO_2-Ausstoßes zu maximieren. Besonders positiv wirkte sich das Recycling der VIPs und die Verwendung von Zement mit geringerem CO_2-Fußabdruck aus. Diese Szenarien reichten vom Worst-Case-Szenario, bei dem keine Recyclingmaßnahmen ergriffen wurden, bis zum Best-Case-Szenario mit einem hohen Anteil recycelter VIPs und der Verwendung zementarmer Materialien. Die Ergebnisse zeigten, dass die neu entwickelten Systeme signifikant weniger CO_2-Emissionen verursachen, insbesondere wenn Recyclingmaßnahmen berücksichtigt werden. Beispielsweise konnte das Global Warming Potential (GWP) der Fassadenelemente im Best-Case-Szenario um bis zu 50 % gesenkt werden.

Die im Projekt MultiFace erzielten Ergebnisse haben das Potenzial, den Gebäudesektor nachhaltig zu verändern. Die entwickelten Fassadensysteme bieten nicht nur eine höhere Energieeffizienz, sondern auch eine deutliche Reduktion der CO_2-Emissionen. Sie sind sowohl für Neubauten als auch für die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden geeignet und können einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion des Energieverbrauchs leisten. Durch die Kombination von passiven und aktiven Technologien zur Temperierung können sie helfen, den Einsatz von Primärenergie erheblich zu reduzieren und den Komfort in Innenräumen zu erhöhen.

Die Projektergebnisse zeigen, dass multifunktionale Fassaden ein enormes Potenzial für die Zukunft des Bauens haben, insbesondere im Hinblick auf energieoptimierte und ressourcenschonende Gebäude. Durch die erfolgreiche Kombination verschiedener innovativer Materialien und Technologien konnte im Projekt MultiFace ein System entwickelt werden, das den Anforderungen an nachhaltiges Bauen gerecht wird und gleichzeitig architektonisch ansprechend ist.

Sachbericht zum Teilvorhaben:
Optimierung PCM-Verkapselungsgeometrie

Arbeitspaket 0: Projektkoordination

Mitarbeiter des KET nahmen an Arbeits- und Projekttreffen teil, welche bei Projektpartnern vor Ort oder digital stattfanden.

Arbeitspaket 3: Entwicklung PCM-Hybrid-Kassetten

Arbeitspaket 3a: Entwicklung PCM und PCM-V

Im Rahmen des Arbeitspakets 3a wurde zunächst der Einsatz des multifunktionalen Fassadenelements eruiert. Hierzu wurden verschiedene Szenarien in Abstimmung mit dem Konsortium erörtert. Anfänglich wurde die Idee erwogen, das PCM als Puffer für Temperaturspitzen einzusetzen, wobei das ATP26 von der Firma Axiotherm als geeignet erschien. Diese Herangehensweise wurde jedoch aufgegeben, und als primärer Anwendungsfall für das multifunktionale Fassadenelement wurde das Heizen festgelegt. Infolgedessen musste die Schmelztemperatur oder das Schmelzintervall des verwendeten PCMs höher sein als die Raumtemperatur.

Das ATP26 mit einer Schmelztemperatur von etwa 26°C wies lediglich eine geringfügige Differenz zur Raumtemperatur auf, wodurch die Wärmeabgabe des Fassadenelements an die Umgebung nur langsam und in geringem Maße erfolgen konnte. Aufgrund dieser Umstände fiel die Wahl auf das ATS30 mit einer Schmelztemperatur von etwa 30°C. Dieses PCM wurde standardmäßig in den meisten Simulationen verwendet, sofern nicht anders angegeben.

Arbeitspaket 3b: Entwicklung PCM-O

Im Rahmen des Arbeitspakets 3b lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung eines Modells zur Beschreibung des thermischen Verhaltens der PCM-Hybrid-Kassette. Mithilfe dieses Modells wurden entscheidende Betriebsparameter wie beispielsweise die Be- oder Entladezeiten der PCM-Hybrid-Kassette ermittelt. Die Untersuchung des Modells der PCM-Hybrid-Kassette erfolgte unter Verwendung der kommerziellen CFD-Software Simcenter STAR-CCM+.

Das Modell der PCM-Hybrid-Kassette kann in drei Hauptbereiche unterteilt werden: das Phasenwechselmaterial (PCM), das Wärmeträgerfluid (HTF) und die Betonverschalung. Zur Modellierung des Phasenwechselmaterials wurde die Energiegleichung (wie in Gleichung 1 dargestellt) gelöst.

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \tag{1}$$

Der linke Term beschreibt die zeitliche Veränderung der inneren Energie (unter Ausschluss der Volumenarbeit), während der rechte Term den diffusiven Energietransport im PCM beschreibt. Die Enthalpie wird als die Summe aus sensibler und latenter Enthalpie ausgedrückt (siehe Gleichung 2).

$$H(T) = \int_{T_{\mathrm{ref}}}^{T} \rho c_p(T) dT + \gamma(T) \cdot E_{Lat} \tag{2}$$

Die latente Enthalpie hängt vom Flüssigkeitsanteil γ ab, wobei E_{Lat} die latente Wärme des PCMs darstellt. Der Flüssigkeitsanteil wiederum ist eine Funktion der Temperatur. Im Fall eines isothermen Schmelzverhaltens unterliegt der Flüssigkeitsanteil bei Erreichen der Schmelztemperatur einer abrupten Änderung (siehe Gleichung 3). Dadurch entsteht eine deutlich abgegrenzte Grenzfläche.

$$\gamma(T) = \begin{cases} 0 & T < T_m \quad fest \\ 1 & T > T_m \quad flüssig \end{cases} \tag{3}$$

Wenn das Schmelzverhalten nicht-isotherm ist, kann der Flüssigkeitsanteil als lineare Funktion der Temperatur zwischen der Solidus- und der Liquidustemperatur beschrieben werden (siehe Gleichung 4). Aufgrund des fehlenden scharfen Übergangs entsteht ein Übergangsbereich, in dem sowohl feste als auch flüssige Phasen gleichzeitig vorhanden sind.

$$\gamma(T) = \begin{cases} 0 & T < T_s \quad fest \\ \dfrac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s \leq T \leq T_l \quad Übergangsbereich \\ 1 & T > T_l \quad flüssig \end{cases} \tag{4}$$

Um das Wärmeträgerfluid (HTF), das für die thermische Regenerierung des PCMs benötigt wird, zu modellieren, müssen neben der Energiegleichung (siehe Gleichung 5) des HTFs auch die Kontinuitätsgleichung (siehe Gleichung 6) sowie die Impulstransportgleichung (siehe Gleichung 7) gelöst werden.

$$\rho_f \, c_{p,f} \, \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f \, c_{p,f} (\boldsymbol{u} \cdot \nabla T_f) = \lambda_f \nabla^2 T_f \tag{5}$$

Der erste Ausdruck auf der linken Seite beschreibt die in dem Wärmeträgerfluid (HTF) gespeicherte Energie. Dabei repräsentieren t die Zeit, ρ_f die Dichte des HTFs, T_f die Fluidtemperatur. Der zweite Ausdruck auf der linken Seite beschreibt den konvektiven Energietransport, wobei $\boldsymbol{u}$ die Geschwindigkeit des Fluids darstellt. Der Ausdruck auf der rechten Seite veranschaulicht den diffusiven Energietransport, wobei λ_f die Wärmeleitfähigkeit des HTFs ist.

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \, \boldsymbol{u}) = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + (\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} - \nu \, \nabla^2 \boldsymbol{u} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p \tag{7}$$

Abschließend wurde die Betonverschalung modelliert. Hierbei wurde ähnlich wie bei der Modellierung des PCMs ausschließlich die Energiegleichung des Betons gelöst (siehe Gleichung 8).

$$\rho_b \, \frac{\partial H}{\partial t} = \lambda_b \, \nabla^2 T \tag{8}$$

Im Gegensatz zum PCM tritt im Beton kein Phasenwechsel auf. Daher erfolgt im Beton lediglich die Speicherung von sensibler Wärme (siehe Gleichung 9).

$$H(T) = \int_{T_{\mathrm{ref}}}^{T} \rho_b c_{p,b}(T) dT \tag{9}$$

Nachdem alle Gleichungen für die drei Teilgebiete aufgestellt wurden, müssen sie noch miteinander verbunden werden. Hierbei treten zwei Grenzflächen auf: HTF/PCM und PCM/Beton. An der ersten Grenzfläche HTF/PCM muss der Wärmestrom, der vom HTF zur Grenzfläche hin passiert, gleich dem Wärmestrom sein, der vom PCM zur Grenzfläche hin passiert. Daher muss folgende Bedingung gelten (siehe Gleichung 10):

$$-\lambda \nabla T_{PCM} = k\,(T_{HTF} - T_{PCM}) \tag{10}$$

Der linke Ausdruck beschreibt den Wärmetransport durch Wärmeleitung vom PCM zur Grenzfläche hin. Der rechte Ausdruck beschreibt den Wärmetransport durch Wärmeübergang vom HTF zur Grenzfläche hin, wobei k der Wärmedurchgangskoeffizient ist. Der Wärmedurchgangskoeffizient kann wie folgt berechnet werden (siehe Gleichung 11):

$$k = \left(\frac{1}{2\pi L} \left(\frac{1}{\alpha_i r_i} + \frac{ln\frac{r_a}{r_i}}{\lambda_R} \right) \right)^{-1} \tag{11}$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient ergibt sich aus der Reihenschaltung der thermischen Widerstände, einerseits vom Wärmeübergang vom HTF und andererseits von der Wärmeleitung im Material.

An der zweiten Grenzfläche PCM/Beton muss analog zur ersten Grenzfläche der Wärmestrom sowohl vom PCM als auch vom Beton gleich sein. Daraus resultiert folgende Beziehung (siehe Gleichung 12):

$$-\lambda \nabla T_{PCM} = -\lambda \nabla T_{Beton} \tag{12}$$

Der linke Ausdruck beschreibt den Wärmetransport durch Wärmeleitung vom PCM zur Grenzfläche hin. Der rechte Ausdruck beschreibt den Wärmetransport durch Wärmeleitung vom Beton zur Grenzfläche hin.

Nachdem alle Teilgebiete durch entsprechende Beziehungen miteinander verknüpft sind, fehlen nur noch Randbedingungen, um das Modell zu vervollständigen. Um die Rechenzeit der Simulation zu reduzieren, wurden die Simulationen größtenteils auf ein repräsentatives Element der Hybridkassette konzentriert. Diese Annahme konnte aufgrund der symmetrischen Struktur getroffen werden. In Abbildung 1 ist schematisch ein repräsentatives Element mit den angenommenen Randbedingungen in Simcenter STAR-CCM+ dargestellt.

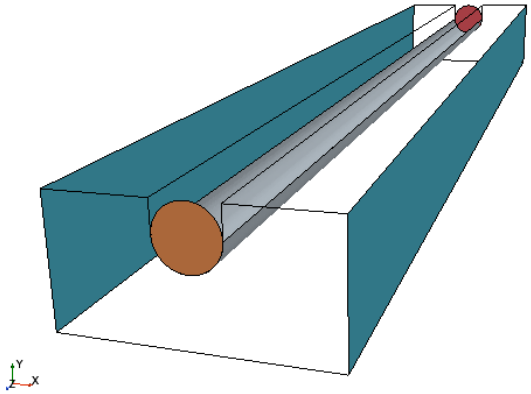

Abbildung 1:Repräsentatives Element aus der Hybridkassette mit gewählten Randbedingungen (blau: Symmetrie-Randbedingung, rot: Inlet-Randbedingung, orange: Pressure-Outlet-Randbedingung und grau: Baffle-Interface-Randbedingung)

Zusätzlich sind Randbedingungen für die Umgebung und den Innenraum erforderlich, die je nach Betrachtung variieren können. Normalerweise wurden konstante Umgebungstemperaturen, konstante Innenraumtemperaturen und konstante Wärmeübergangskoeffizienten angenommen. Die Isolation des Fassadenelements wurde mittels eines thermischen Widerstands für das Vakuumisolationspanel berücksichtigt.

Der erste Entwurf der Hybridkassette wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner ESDA entwickelt. Hierbei wurden sowohl die produktionstechnischen als auch die wirtschaftlichen Randbedingungen berücksichtigt. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde eine Hybridkassette mit großem PCM-Volumen angestrebt. Die äußeren Abmessungen der Hybridkassette sind aufgrund der Herstellung auf eine maximale Breite von 300 mm und eine Höhe von etwa 800 mm begrenzt. Die Dicke wurde auf 30 mm festgelegt, um ein vollständiges Be- oder Entladen des PCM-Speichers zu gewährleisten. Beim Design des Strömungskanals wurde zunächst ein mäanderförmiger Aufbau gewählt, der sicherstellt, dass eine vollständige Be- und Entladung der PCM-Schicht möglich ist. Abbildung 2 zeigt eine Variante der PCM-Hybridkassette mit einem mäanderförmigen Strömungskanal.

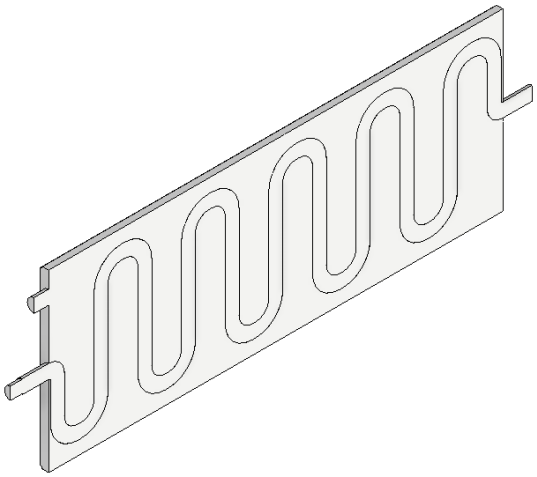

Abbildung 2: Geometrieentwurf der PCM-Hybridkassette mit einem mäanderförmigen Rohr

Ein weiterer Entwurf der PCM-Hybridkassette beinhaltete statt eines mäanderförmigen Rohrs mehrere parallel verlaufende Rohre (siehe Abbildung 3). Die äußeren Abmessungen und die Dicke entsprachen jeweils dem ersten Entwurf.

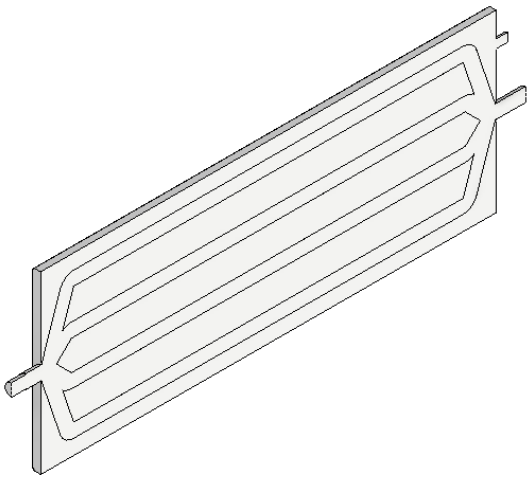

Abbildung 3: Geometrieentwurf der PCM-Hybridkassette mit parallel verlaufenden Rohren

Beide Varianten wurden mithilfe des zuvor beschriebenen Modells untersucht. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Dichte des PCM bleibt in beiden Phasen (fest/flüssig) konstant ($\rho = const$).
- Die Wandtemperatur des Strömungskanals ist konstant (T = 288 K (15°C)).
- Zu Beginn der Simulation ist der PCM-Speicher vollständig beladen und hat eine Temperatur von 300 K. Das PCM liegt daher im flüssigen Zustand vor.
- Die Teilgebiete HTF und Beton wurden in den Randbedingungen berücksichtigt.
- Ein isothermes Schmelzverhalten wurde angenommen.
- Der Phasenübergang findet bei einer festen Temperatur statt ($T_s = T_l$).
- Die Simulation wurde in 2D durchgeführt.

Das ausgewählte PCM ist ATP 26 von der Firma Axiotherm. Die Stoffeigenschaften sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Stoffeigenschaften des ATP 26 von der Firma Axiotherm

Größe	Symbol	Einheit	Wert
Dichte	ρ	kg/m³	800
Spez. Wärmekapazität	c_p	J/(kgK)	2000
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(mK)	0,5
Schmelzenthalpie	H_{Lat}	J/kg	230000
Schmelztemperatur	T_m	°C	26

Die Ergebnisse der Simulationen für beide Geometrien ist in Abbildung 4 dargestellt. Dabei wird der Festphasenanteil ("solid volume fraction") gezeigt. Die Simulationen umfassen eine Entladezeit von 3 Stunden.

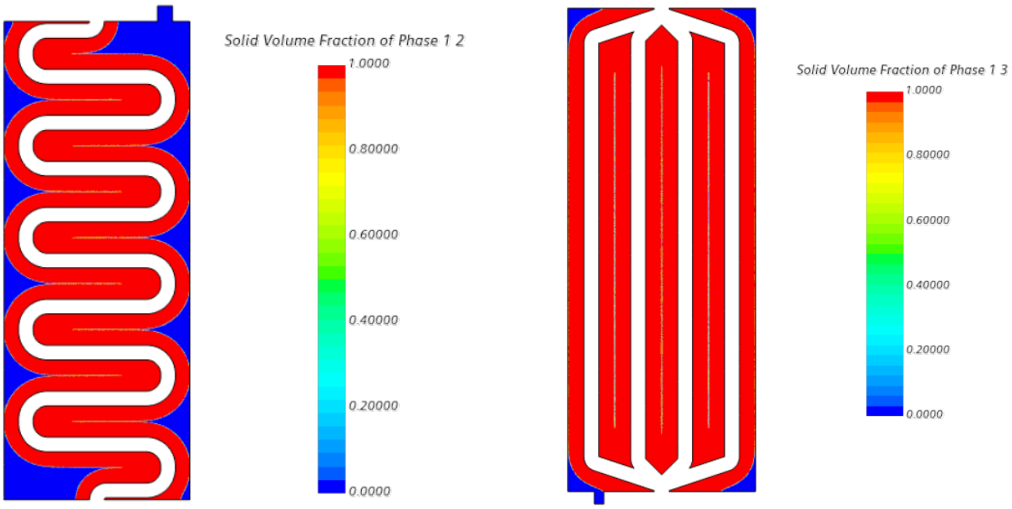

Abbildung 4: Festphasenanteil nach 3 h Entladung: Mäanderförmiges Rohr (links) und parallele Rohre (rechts)

Die Ergebnisse zeigten, dass die Geometrie mit den parallelen Rohren aufgrund ihrer insgesamt größeren Oberfläche und geringeren PCM-Masse im Vergleich zur Geometrie mit dem mäanderförmigen Rohr schneller entlädt.

Im Verlauf des Projekts wurde diese Art von Geometrie mit integrierten Rohren aufgegeben. Die PCM-Hybrid-Kassette wurde unter Berücksichtigung der Herstellbarkeit weiterentwickelt. Der neue Entwurf der Hybridkassette beinhaltet keine internen Strömungskanäle mehr, sondern stattdessen gibt es Aussparungen an einer Seite der Hybridkassette, in denen die Rohre befestigt werden. Diese Änderung wurde aus fertigungstechnischen Gründen vorgenommen. Die Rohre sollen handelsübliche Kunststoffrohre sein, wie sie im Sanitärbereich verwendet werden, um die Produktionskosten niedrig zu halten. Der Außendurchmesser der Rohre beträgt 12 mm. Des Weiteren sind vier Aussparungen zur Befestigung der PCM-Hybrid-Kassette am Fassadenelement vorgesehen. Mithilfe von BFK-Ankerstäben sollen die PCM-Hybrid-Kassette und andere Bauteile wie das Vakuumisolationspanel befestigt werden. Insgesamt können 13 Rohre an die Hybridkassette angebracht werden. Abbildung 5 veranschaulicht diese Konfiguration.

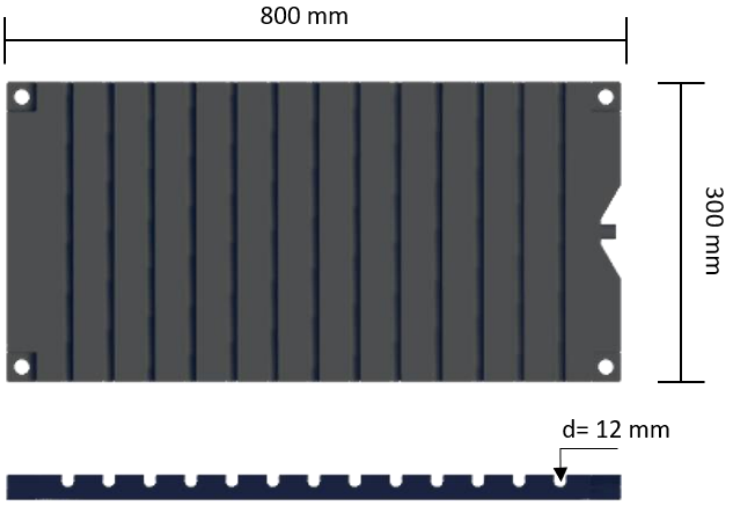

Abbildung 5: Entwurf der PCM-Hybrid-Kassette mit außenliegenden Aussparungen für das Befestigen von Rohren für die thermische Regeneration

Für die Simulation der PCM-Hybrid-Kassette wurde, wie zuvor bei der Modellierung des Systems erwähnt, ein repräsentatives Element untersucht. Dieses repräsentative Element ist in Abbildung 6 dargestellt.

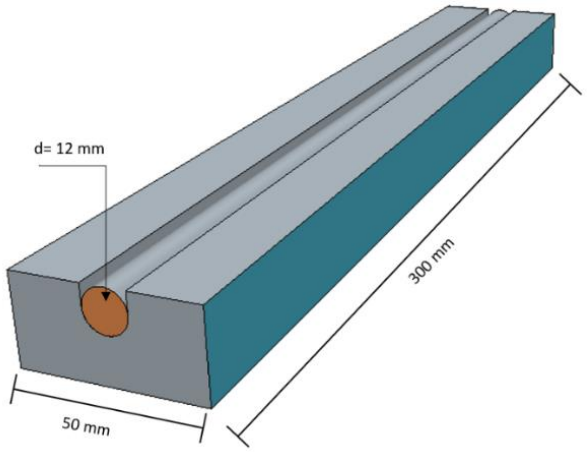

Abbildung 6: Repräsentatives Element aus der PCM-Hybrid-Kassette

Für die Simulation wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Dichte des PCM ist in beiden Phasen (fest/flüssig) konstant ($\rho = const$)
- Als HTF wird Wasser verwendet
- Die Eingangstemperatur des HTFs beträgt konstant 296 K
- Die Fluidgeschwindigkeit am Inlet in den Rohren beträgt 0,2 m/s
- Zu Beginn der Simulation ist der PCM-Speicher vollständig beladen und hat eine Temperatur von 303,1 K. Das PCM liegt daher im flüssigen Zustand vor.
- Es wird ein isothermes Schmelzverhalten angenommen
- Der Phasenwechsel findet bei einer festen Temperatur statt ($T_s = T_l$)
- Es wurde ein repräsentatives Element simuliert

Zusätzlich wurden andere Stoffdaten für das PCM verwendet. Die Stoffdaten für ATS 30 von der Firma Axiotherm wurden genutzt. Diese sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Stoffeigenschaften des ATS 30 von der Firma Axiotherm

Größe	Symbol	Einheit	Wert
Dichte	ρ	kg/m³	1300
Spez. Wärmekapazität	c_p	J/(kgK)	2000
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(mK)	0,6
Schmelzenthalpie	H_{Lat}	J/kg	220000
Schmelztemperatur	T_m	°C	30

In den folgenden Ergebnissen wurden zwei Geometrievarianten miteinander verglichen. Der Typ der PCM-Hybrid-Kassette mit den außenseitigen Aussparungen ist identisch, jedoch variiert lediglich die Dicke der PCM-Hybrid-Kassette. Es wurden zwei verschiedene Dicken untersucht: einmal 25 mm und einmal 20 mm. In den nachfolgenden Abbildungen wird der Festphasenanteil ("solid volume fraction") im Verlauf der Zeit dargestellt. Abbildung 7 zeigt das Ergebnis für die 25 mm dicke PCM-Hybrid-Kassette.

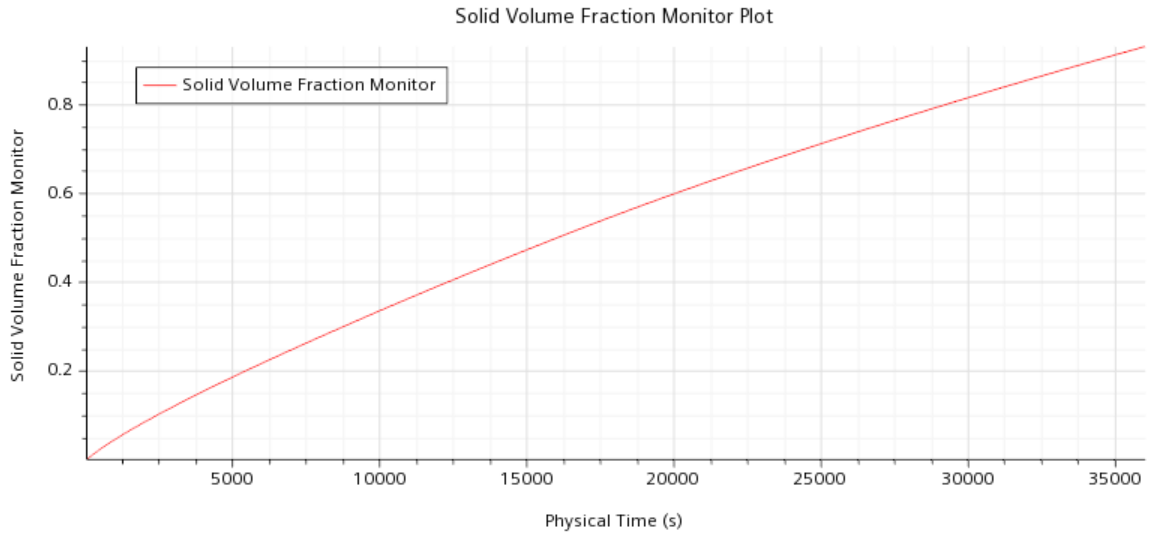

Abbildung 7: Festphasenanteil der Hybridkassette (d = 25 mm) über der Zeit

Nach 10 Stunden Entladezeit mit den zuvor genannten Betriebsparametern wurde eine Entladung von etwa 92 % erreicht. Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 8 den Verlauf des Festphasenanteils über der Zeit für eine Dicke von 20 mm.

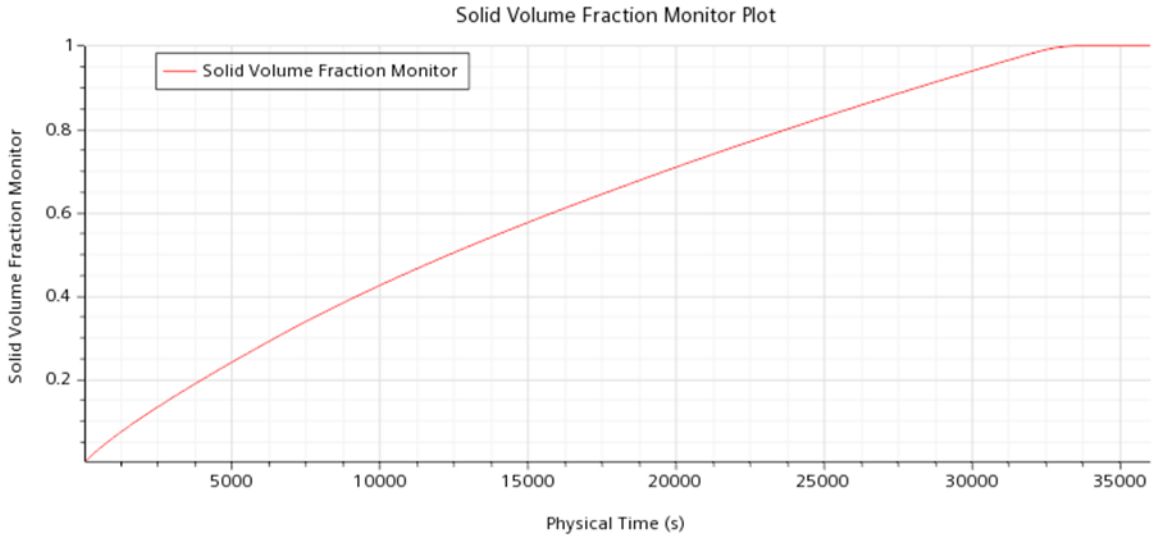

Abbildung 8: Festphasenanteil der Hybridkassette (d = 20 mm) über der Zeit

Bei der dünneren Geometrie (d=20 mm) ist erkennbar, dass die Zeit für eine vollständige Entladung unter 10 Stunden liegt. Es werden etwa 9,17 Stunden für eine vollständige Entladung benötigt. Diese verkürzte Entladezeit ergibt sich aus dem geringen Anteil an PCM in der PCM-Hybrid-Kassette und der größeren Wärmeübertragungsfläche der Rohre. Zusätzlich wurde die

Austrittstemperatur des HTFs im Verlauf der Zeit erfasst. Die Ergebnisse sind in den Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt.

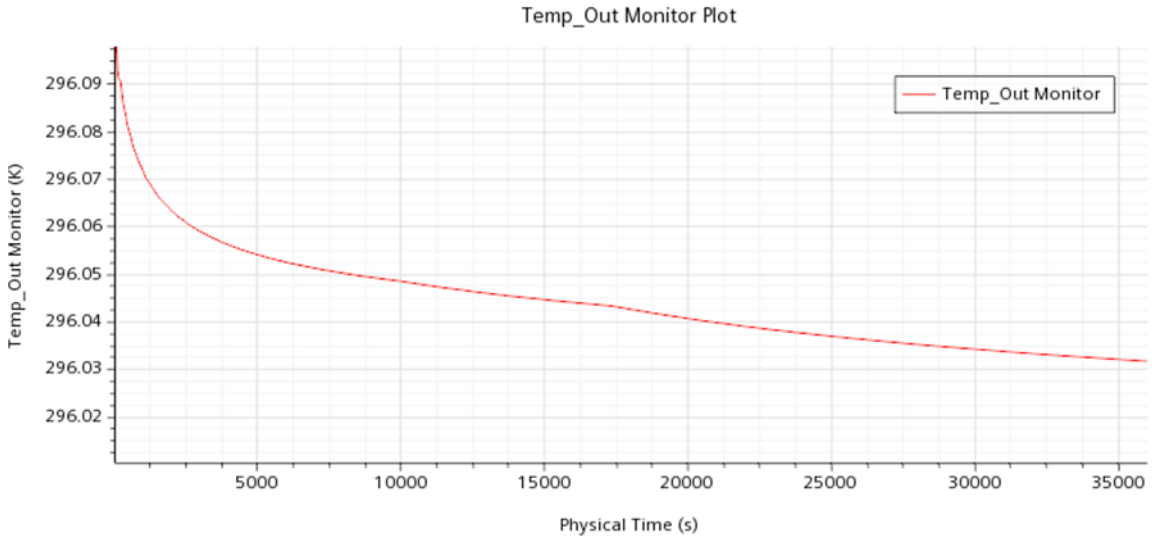

Abbildung 9: Austrittstemperatur des HTFs über der Zeit bei der Hybridkassette (d = 25 mm)

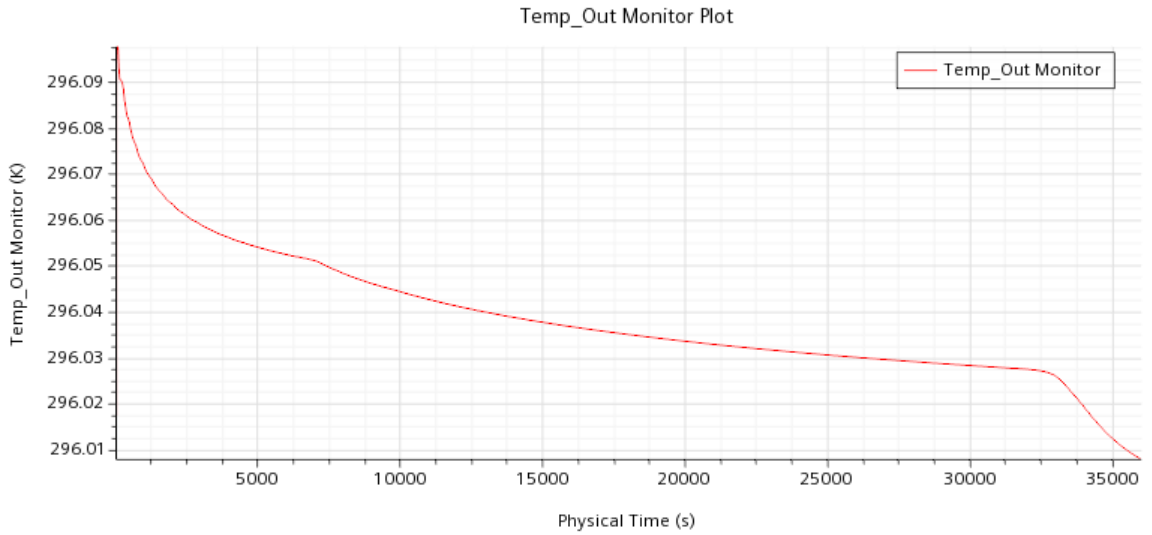

Abbildung 10: Austrittstemperatur des HTFs über der Zeit bei der Hybridkassette (d = 20 mm)

Es lässt sich erkennen, dass bei den gewählten Parametern die Austrittstemperatur kaum Veränderungen aufweist. Dies könnte auf die begrenzte Wärmeleitung der Kunststoffrohre, der Kunststoffummantelung der Hybridkassette und des PCMs zurückzuführen sein. Es könnte angenommen werden, dass die hier gewählte Strömungsgeschwindigkeit für den späteren praktischen Einsatz zu hoch angesetzt wurde.

Nachdem die ersten Simulationen bezüglich der Entladezeit mit der neuen Geometrie durchgeführt wurden, wurden als nächstes dynamische Simulationen durchgeführt. In diesen Simulationen wird ein kompletter Entlade- und Beladungszyklus betrachtet. Zunächst wurde die vollständig beladene PCM-Hybridkassette bis zu 99 % entladen. Anschließend wurde die PCM-Hybridkassette mit der integrierten thermischen Aktivierung wieder beladen. Die untersuchte Geometrie besitzt eine Dicke von 25 mm, da eine dünnere PCM-Hybrid-Kassette zu

wenig PCM aufnehmen würde und somit die Speicherkapazität zu gering wäre. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Dichte des PCM ist in beiden Phasen (fest/flüssig) konstant ($\rho = const$).
- Es herrscht nur Wärmeleitung innerhalb des PCMs.
- Als HTF wird Wasser verwendet.
- Die Eingangstemperatur des HTFs beträgt konstant 318,15 K.
- Die Fluidgeschwindigkeit am Inlet in den Rohren beträgt 0,2 m/s.
- Zu Beginn der Simulation ist der PCM-Speicher vollständig beladen und hat eine Temperatur von 303,1 K. Das PCM liegt entsprechend im flüssigen Zustand vor.
- Es wird ein isothermes Schmelzverhalten angenommen.
- Der Phasenwechsel findet bei einer festen Temperatur statt ($T_s = T_l$).
- Es wurde ein repräsentatives Element simuliert.
- Es wurde ATS30 als PCM verwendet.

Die Ergebnisse der dynamischen Simulation sind in Abbildung 11 dargestellt.

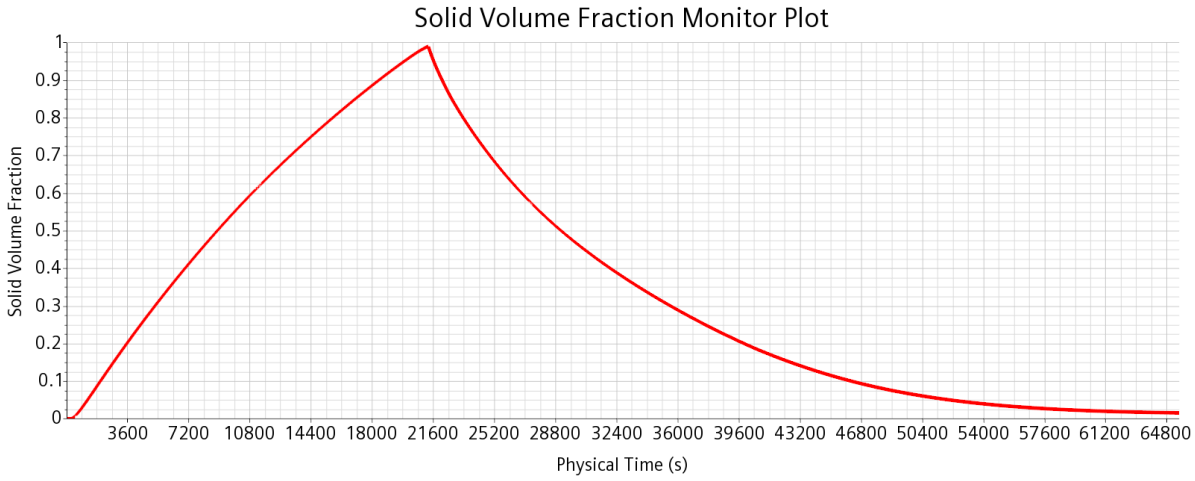

Abbildung 11: Festphasenanteil der Hybridkassette (d=25 mm) über der Zeit

Die passive Entladung der PCM-Hybrid-Kassette dauerte etwa 6 Stunden. Unter passiver Entladung wird der Prozess verstanden, bei dem die Wärme aus der Kassette in den Innenraum und die Umgebung abgegeben wird. Der entsprechende Beladevorgang, bei dem die Kassette mit 318,15 K warmem Wasser beladen wurde, dauerte über 12 Stunden. Allerdings wurde nach 6 Stunden eine Beladung von 85 % erreicht. Dieser hier untersuchte Zyklus entspricht einer Entladung und Beladung von insgesamt 99 %. Im weiteren Verlauf des Projekts sollen verschiedene Betriebsstrategien verglichen werden, um die optimale Geometrie der PCM-Hybrid-Kassette zu identifizieren.

Die folgenden vier Betriebsstrategien wurden untersucht:

- Be- und Entladung auf 80 %
- Be- und Entladung auf 85 %

- Be- und Entladung auf 90 %
- Be- und Entladung auf 95 %

Während des Beladevorgangs wurde ein konstanter Massenstrom für das Wärmeträgerfluid verwendet, während dieser beim Entladevorgang auf null gesetzt wurde. Als Kriterium für den Ladezustand der PCM-Hybridkassette wurde der Flüssigphasenanteil genutzt. Die PCM-Hybridkassette gilt als vollständig aufgeschmolzen bei einem Beladezustand von 100 %.

Für diese Simulationen wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Dichte des PCM ist in beiden Phasen (fest/flüssig) konstant ($\rho = const$).
- Als HTF wird Wasser verwendet.
- Die Eingangstemperatur des HTFs beträgt konstant 65 °C.
- Die Fluidgeschwindigkeit am Inlet in den Rohren beträgt 0,2 m/s.
- Zu Beginn der Simulation ist der PCM-Speicher vollständig entladen und hat eine Temperatur von 20 °C. Das PCM liegt daher im festen Zustand vor.
- Der Phasenübergang findet im Temperaturintervall statt ($T_s \neq T_l$).
- Es wurde ein repräsentatives Element simuliert.

ATS30 wurde erneut als PCM verwendet. Anstelle einer festen Schmelztemperatur wurde diesmal ein Schmelzintervall angenommen. Die Stoffdaten sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Für die Simulationen verwendete Stoffeigenschaften des PCM

Größe	Symbol	Einheit	Wert
Dichte	ρ	kg/m³	1300
Spez. Wärmekapazität	c_p	J/(kgK)	2000
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(mK)	0,6
Schmelzenthalpie	H_{Lat}	J/kg	236000
Schmelztemperatur	T_m	°C	32-24

Im Gegensatz zu den vorherigen Simulationen ist die PCM-Hybrid-Kassette in diesem Fall vollständig entladen und im thermischen Gleichgewicht mit dem Innenraum. Anschließend wird die PCM-Hybrid-Kassette je nach gewählter Betriebsstrategie auf den gewünschten Ladezustand beladen und dann wieder auf den gewählten Ladezustand entladen. Die Entladung erfolgt wie zuvor passiv, während die Beladung aktiv erfolgt. Insgesamt werden zwei Beladungs- und ein Entladevorgang simuliert. Die Ergebnisse der vier unterschiedlichen Betriebsstrategien sind in den Abbildung 12 bis Abbildung 15 dargestellt.

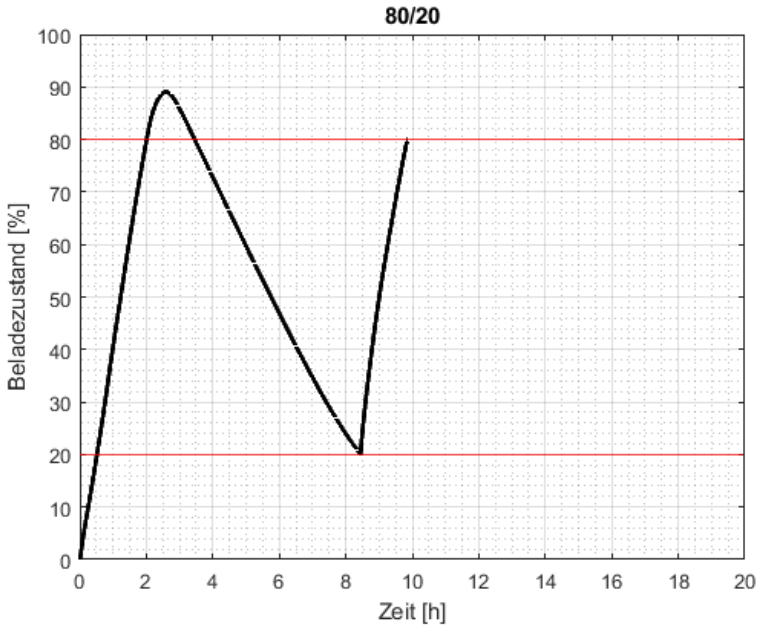

Abbildung 12: Thermisches Verhalten der Hybridkassette über der Zeit für die Betriebsstrategie Be- und Entladung 80 %

Die erste Beladung (von einem Ausgangszustand von 20 °C) mit 65 °C warmem Wasser auf 80 % dauert etwa 2,01 Stunden. Die passive Entladung der PCM-Kassette auf 20 % benötigt ungefähr 6,43 Stunden. Die zweite Beladung von 20 % auf 80 % dauert 1,4 Stunden.

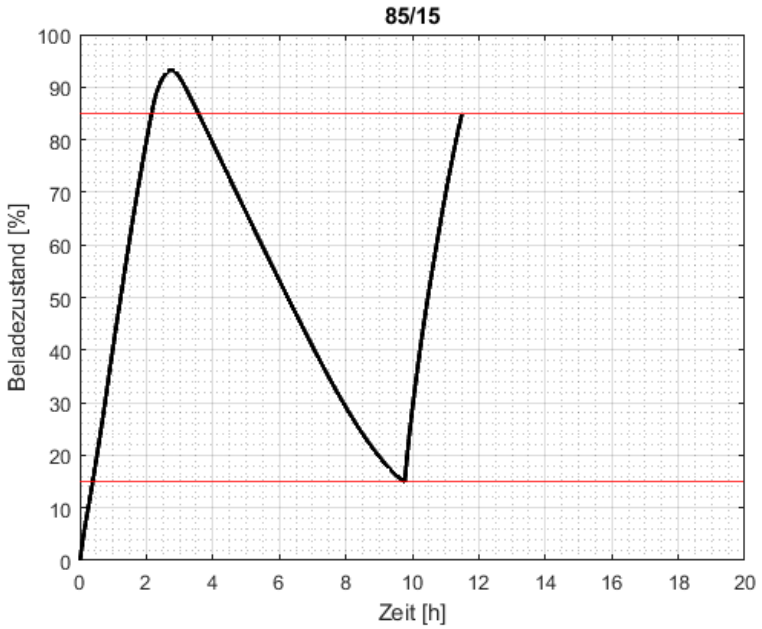

Abbildung 13: Thermisches Verhalten der Hybridkassette über der Zeit für die Betriebsstrategie Be- und Entladung 85 %

Die erste Beladung (von einem Ausgangszustand von 20 °C) mit 65 °C warmem Wasser auf 85 % dauert etwa 2,16 Stunden. Die passive Entladung der PCM-Kassette auf 15 % benötigt ungefähr 7,61 Stunden. Die zweite Beladung von 15 % auf 85 % dauert 1,72 Stunden.

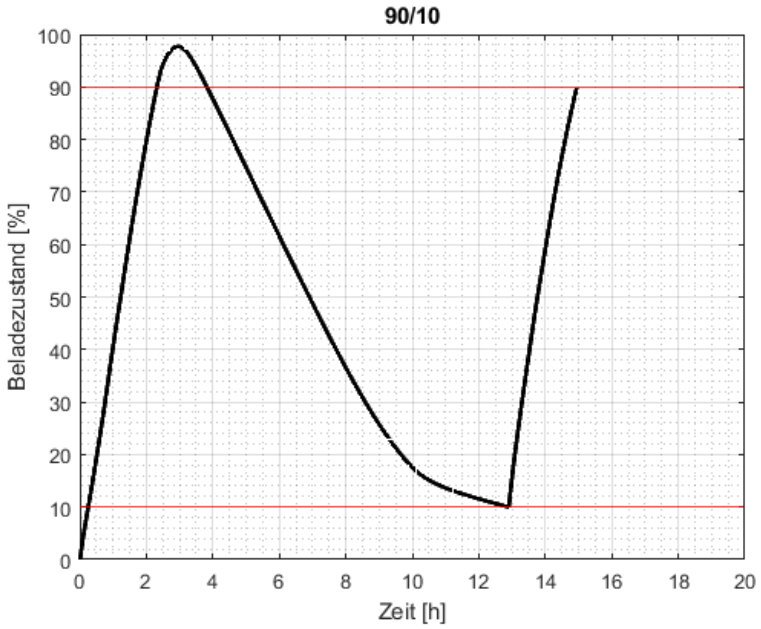

Abbildung 14: Thermisches Verhalten der Hybridkassette über der Zeit für die Betriebsstrategie Be- und Entladung 90 %

Die erste Beladung (von einem Ausgangszustand von 20 °C) mit 65 °C warmem Wasser auf 90 % dauert etwa 2,32 Stunden. Die passive Entladung der PCM-Kassette auf 10 % benötigt ungefähr 10,58 Stunden. Die zweite Beladung von 10 % auf 90 % dauert 2,04 Stunden.

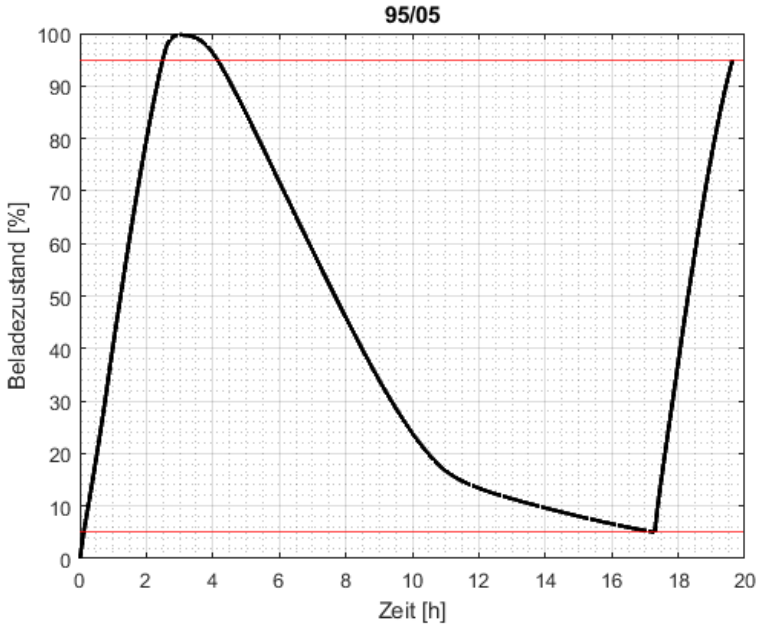

Abbildung 15: Thermisches Verhalten der Hybridkassette über der Zeit für die Betriebsstrategie Be- und Entladung 95 %

Die erste Beladung (von einem Ausgangszustand von 20 °C) mit 65 °C warmem Wasser auf 95 % dauert etwa 2,49 Stunden. Die passive Entladung der PCM-Kassette auf 5 % benötigt ungefähr 14,80 Stunden. Die zweite Beladung von 5 % auf 95 % dauert 2,34 Stunden.

Zusätzlich zu den Ladezuständen wurden auch die Wärmestromdichten an der Innenwand und Außenwand ausgewertet. In den Abbildung 16 bis Abbildung 19 sind die Wärmestromdichten für die jeweilige Betriebsstrategie dargestellt.

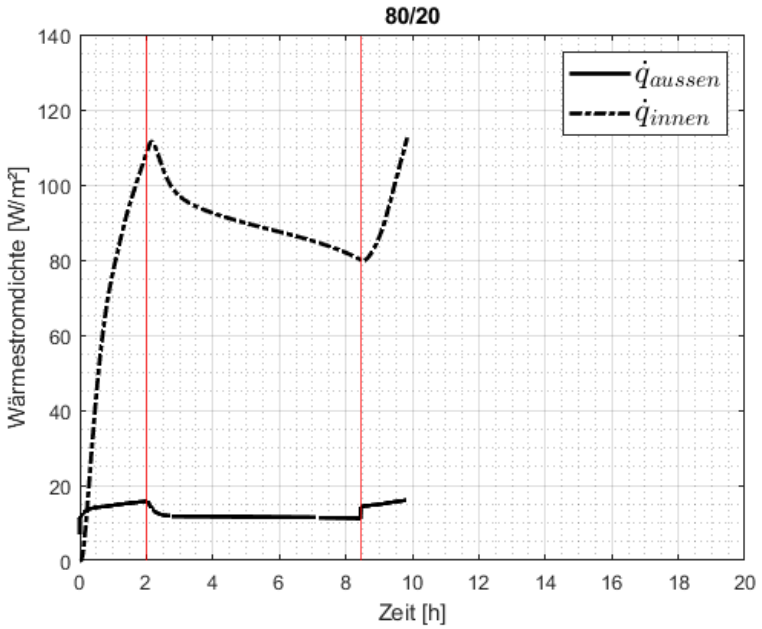

Abbildung 16: Wärmestromdichten über der Zeit (Betriebsstrategie Be- und Entladung 80 %)

Für die Temperierung des Innenraums ist die Wärmestromdichte während des passiven Entladungsvorgangs entscheidend. Bei der passiven Entladung (Betriebsstrategie Be- und Entladen auf 80 %) liegt diese Wärmestromdichte im Bereich von 80-110 W/m². Zusätzlich ist es wichtig, die Wärmestromdichte, die über die Außenwand abgeführt wird, möglichst gering zu halten.

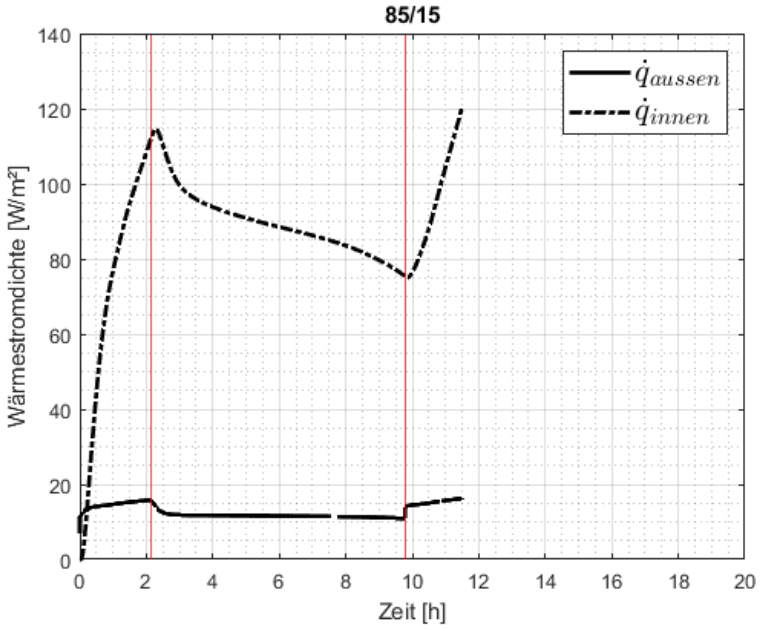

Abbildung 17: Wärmestromdichten über der Zeit (Betriebsstrategie Be-und Entladung 85 %)

Bei der passiven Entladung (Betriebsstrategie Be- und Entladen auf 85 %) liegt diese Wärmestromdichte im Bereich von 75-115 W/m². Außerdem bleibt die Wärmestromdichte, die über die Außenwand abgeführt wird, unverändert.

Die erste Beladung (von einem Ausgangszustand von 20 °C) mit 65 °C warmem Wasser auf 85 % dauert etwa 2,16 Stunden. Die passive Entladung der PCM-Kassette auf 15 % benötigt ungefähr 7,61 Stunden. Die zweite Beladung von 15 % auf 85 % dauert 1,72 Stunden.

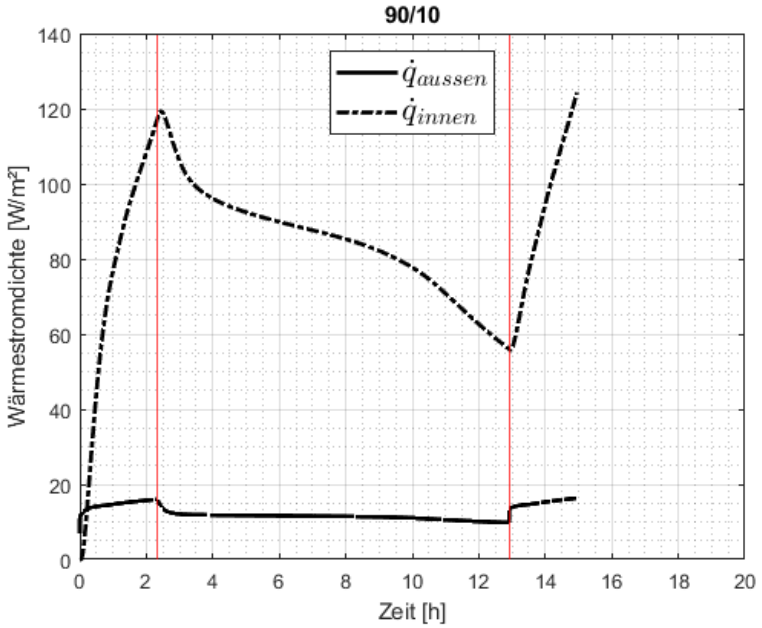

Abbildung 18: Wärmestromdichten über der Zeit (Betriebsstrategie Be- und Entladung 90 %)

Bei der passiven Entladung (Betriebsstrategie Be- und Entladen auf 90 %) liegt diese Wärmestromdichte im Bereich von 55-120 W/m². Zudem bleibt die Wärmestromdichte, die über die Außenwand abgeführt wird, unverändert.

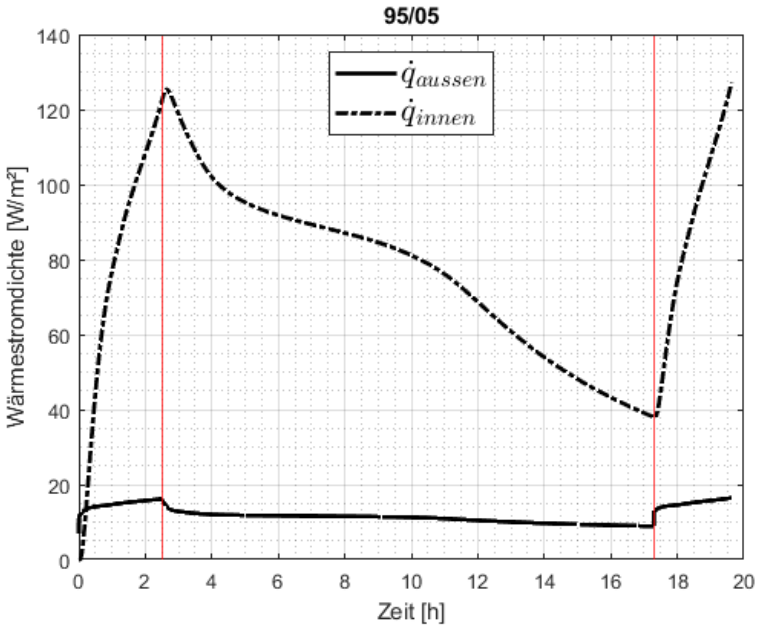

Abbildung 19: Wärmestromdichten über der Zeit (Be-und Entladung 95 %)

Bei der passiven Entladung (Betriebsstrategie Be- und Entladen auf 80 %) liegt die Wärmestromdichte im Bereich von 40-125 W/m². Die Wärmestromdichte über die Außenwand bleibt unverändert.

Aus diesen Untersuchungen zeigt sich, dass eine Be- und Entladung auf 85 % für die passive Wärmeabgabe an den Innenraum am besten geeignet ist. Dies liegt an der hohen Wärmestromdichte. Bei weiterer Entladung der PCM-Hybrid-Kassette nimmt die Wärmestromdichte ab.

Die zuvor untersuchten Fälle wiesen eine hohe Eintrittstemperatur des HTFs auf, um eine schnelle Beladung zu gewährleisten. Um den Gebrauch von Wärmepumpen mit einzubeziehen, wurde die PCM-Hybrid-Kassette weiterentwickelt und untersucht. Die Weiterentwicklung bestand darin, herkömmliche Kapillarrohrmatten anstelle der bisherigen Rohre zu verwenden. Diese sind einfacher in der Installation, senken die Kosten und verbessern die Handhabung der PCM-Hybrid-Kassette. Auf dem Markt gibt es in der Regel Kapillarrohrmatten mit definierten Abständen zwischen den Kapillarrohren. Diese Abstände betragen in der Regel 10, 20 oder 30 mm. Die Verwendung von 10 mm Kapillarrohrmatten ist aufgrund der Herstellparameter des Blasformens nicht geeignet. Daher konzentrierten sich die weiteren Untersuchungen auf Kapillarrohrmatten mit einem Abstand von 20 oder 30 mm. Zudem wurde eine Geometrievariante, die beidseitige Aussparungen besitzt, ebenfalls untersucht. In Abbildung 20 sind Entwürfe der PCM-Hybrid-Kassette dargestellt.

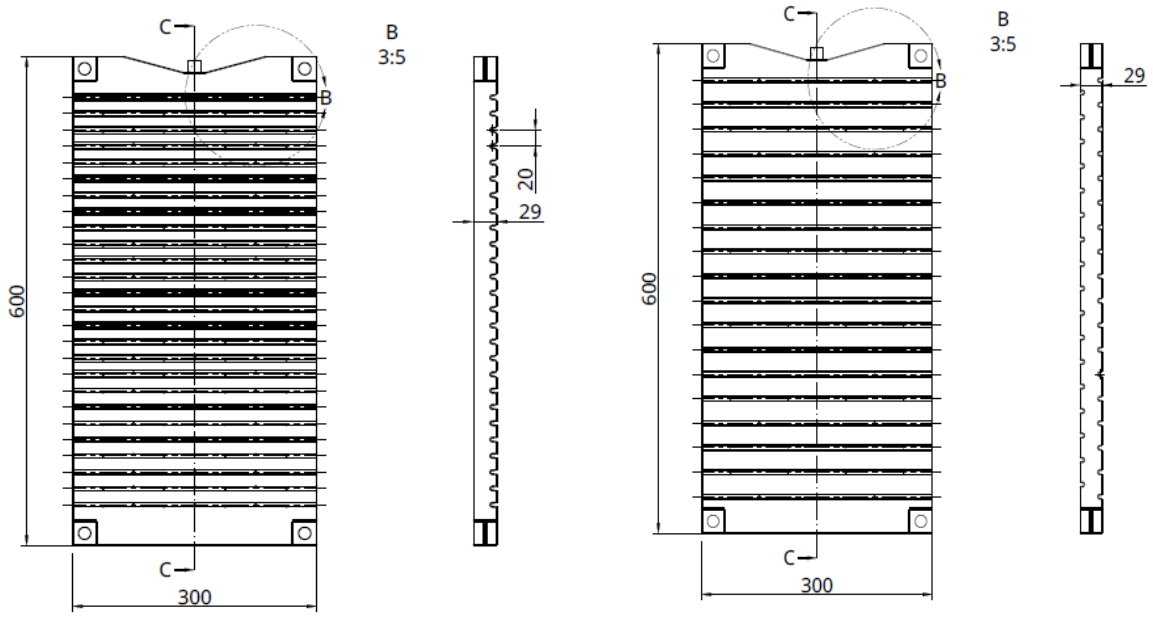

Abbildung 20: Hybridkassette mit einseitiger Aussparung für Kapillarrohrmatte (links) und Hybridkassette mit beidseitiger Aussparung für Kapillarrohrmatte (rechts)

Es wurden drei verschiedene Geometrievarianten mit Kapillarrohrmatten untersucht:

1. PCM-Hybrid-Kassette mit einseitiger Kapillarrohrmatte, Teilung von 30 mm
2. PCM-Hybrid-Kassette mit einseitiger Kapillarrohrmatte, Teilung von 20 mm
3. PCM-Hybrid-Kassette mit beidseitiger Kapillarrohrmatte, Teilung von 30 mm.

In Abbildung 21 sind die repräsentativen Elemente der PCM-Hybrid-Kassette für diese drei Geometrievarianten dargestellt.

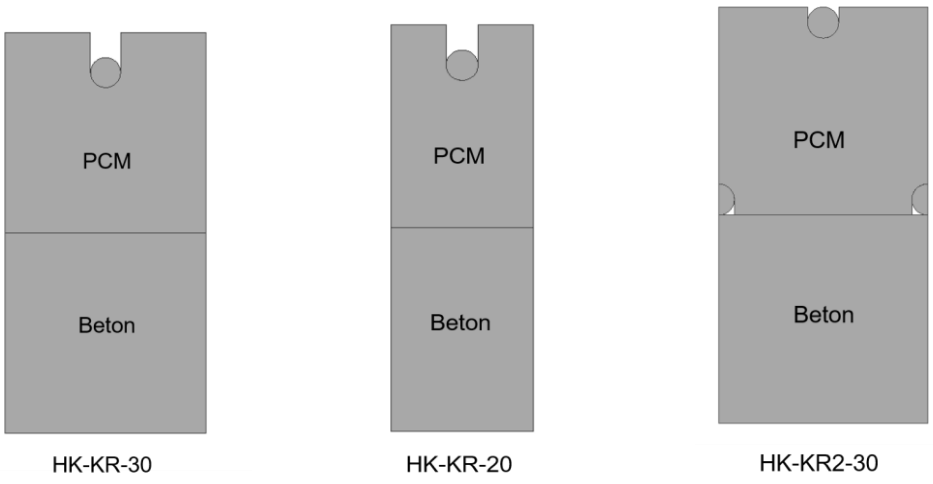

Abbildung 21: Vorderansicht der repräsentativen Elemente aus der Hybridkassette: einseitige Kapillarrohrmatte mit 30 mm Teilung (links), einseitige Kapillarrohrmatte mit 20 mm Teilung (Mitte) und zwei Kapillarrohrmatten mit 30 mm Teilung (rechts)

Es wurden Simulationen durchgeführt, um das thermische Verhalten beim Beladen zu untersuchen. Hierbei wurden jeweils für alle drei Geometrien die Vorlauftemperatur so gewählt,

dass ein Temperaturunterschied ΔT von 5, 10 oder 15 K zur Liquidustemperatur (hier 34 °C) besteht. Die PCM-Hybrid-Kassette wurde auf 85 % ihrer Kapazität beladen, wobei die integrierte thermische Aktivierung verwendet wurde.

Folgende Annahmen wurden für die Simulation getroffen:

- Die Dichte des PCM ist in beiden Phasen (fest/flüssig) konstant ($\rho = const$).
- Es herrscht nur Wärmeleitung innerhalb des PCMs.
- Als HTF wird Wasser verwendet.
- Die Fluidgeschwindigkeit am Inlet in den Rohren beträgt 0,2 m/s.
- Zu Beginn der Simulation ist der PCM-Speicher vollständig entladen und hat eine Temperatur von 20 °C. Das PCM liegt entsprechend im festen Zustand vor.
- Der Phasenwechsel findet bei einem Temperaturintervall statt ($T_s \neq T_l$).
- Es wurde ein repräsentatives Element simuliert (Abbildung 21).

In Abbildung 22 sind die verschiedenen Wärmestromdichten für die Hybridkassette mit einseitiger Aussparung und einer Kapillarrohrmatte mit einem Abstand von 30 mm dargestellt. Die oberen Kurven repräsentieren die Wärmestromdichten, die durch die Innenwand abgegeben werden, während die unteren Kurven die Wärmestromdichten darstellen, die an die Umgebung abgegeben werden. Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Vorlauftemperaturen werden durch verschiedene Farben gekennzeichnet, wobei rot für ΔT = 15 K, gelb für ΔT = 10 K und blau für ΔT = 5 K steht.

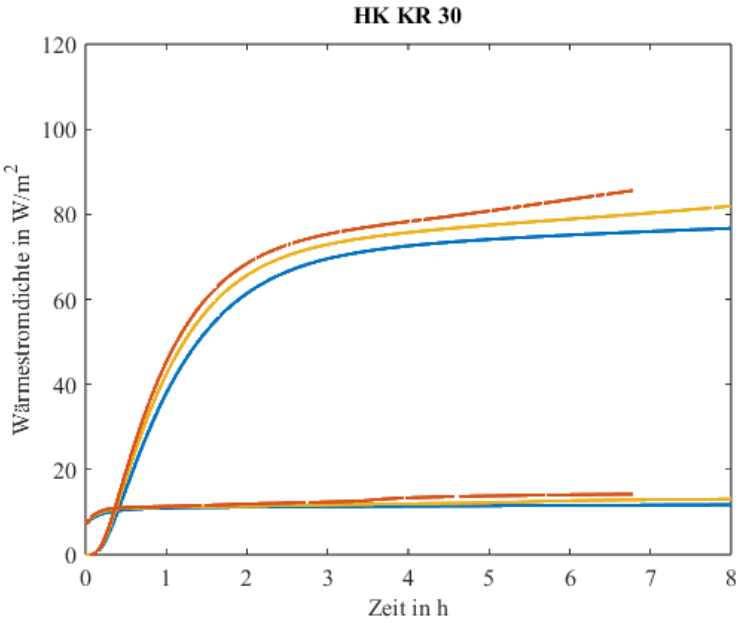

Abbildung 22: Wärmestromdichten über der Zeit (Betriebsstrategie Be-und Entladung 85 %) für die Hybridkassette mit einseitiger Aussparung für die Kapillarrohrmatte mit 30 mm Abstand

Es ist ersichtlich, dass unabhängig von den drei gewählten Vorlauftemperaturen die abgegebene Wärmestromdichte an die Umgebung bei etwa 10 W/m² liegt, was deutlich niedriger ist als die Wärmestromdichte, die in den Innenraum abgegeben wird. Diese liegt während der Beladung zwischen 70 und 80 W/m². Abbildung 23 zeigt die unterschiedlichen

Wärmestromdichten für die Hybridkassette mit einseitiger Aussparung und einer Kapillarrohrmatte mit einem Abstand von 20 mm.

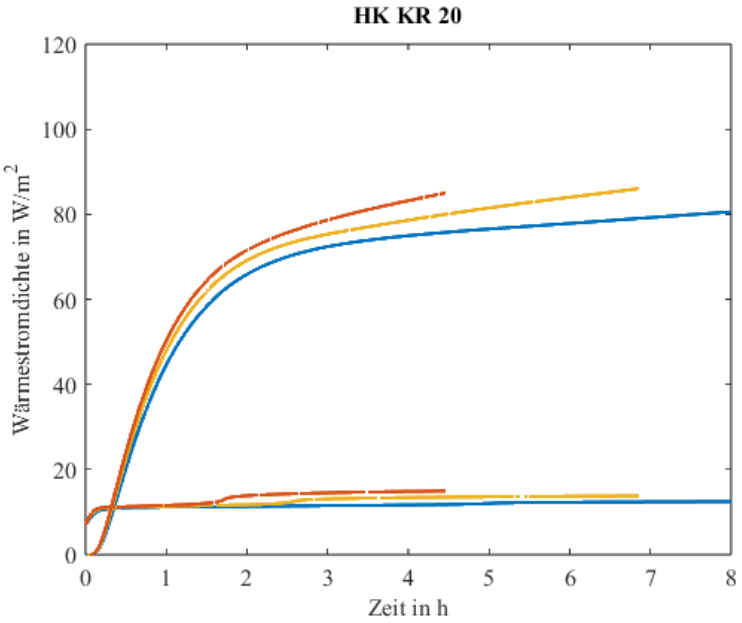

Abbildung 23: Wärmestromdichten über der Zeit (Betriebsstrategie Be-und Entladung 85 %) für die Hybridkassette mit einseitiger Aussparung für die Kapillarrohrmatte mit 20 mm Abstand

Auch hier zeigen sich ähnliche Verläufe der Wärmestromdichten wie bei den vorherigen Geometrien mit Kapillarrohrmatten. Die Kurven für die Wärmestromdichten der Hybridkassette mit beidseitiger Aussparung für eine Kapillarrohrmatte mit 30 mm Abstand sind in Abbildung 24 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Wärmestromdichte an die Umgebung bei etwa 10 W/m² liegt und die Wärmestromdichte an den Innenraum zwischen 70 und 80 W/m² während der Beladung beträgt.

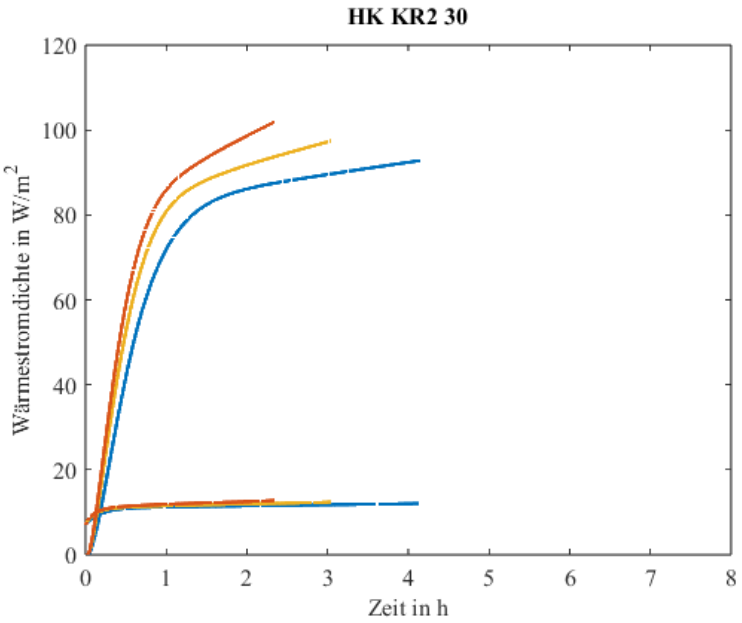

Abbildung 24: Wärmestromdichten über der Zeit (Betriebsstrategie Be- und Entladung 85 %) für die Hybridkassette mit beidseitiger Aussparung für die Kapillarrohrmatte mit 30 mm Abstand

Die dritte Geometrie mit der beidseitigen Anbringung der Kapillarrohrmatte zeigt in der Tat eine deutlich steilere Steigung zu Beginn der Beladung, was aufgrund der näheren Position zur Betonschale zu einer schnelleren und intensiveren Wärmeübertragung führt. Dadurch werden höhere Wärmestromdichten in kürzerer Zeit abgegeben. Dies spiegelt sich auch in den kürzeren Beladezeiten auf 85 % wider. Die Beladezeiten der unterschiedlichen Geometrien in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur sind in Abbildung 25 dargestellt.

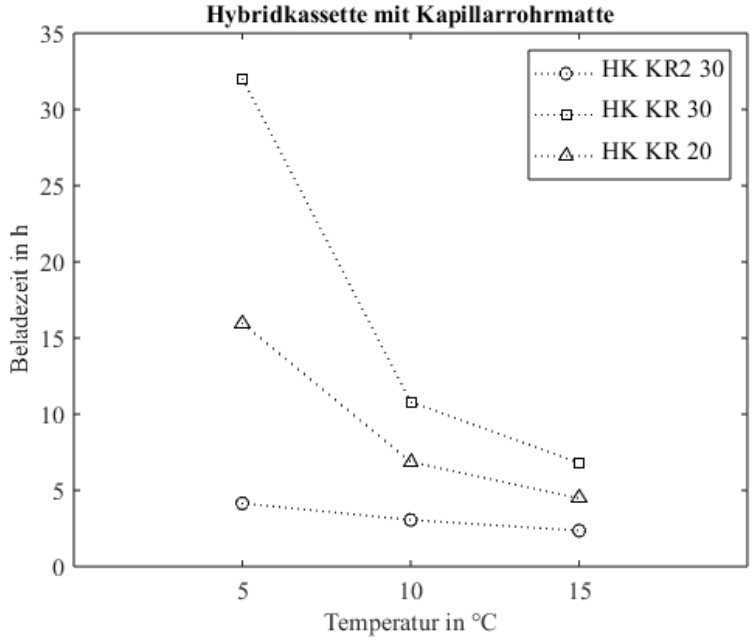

Abbildung 25: Beladezeiten auf 85 % über die Vorlauftemperaturen für die drei Geometrien

Es ist erkennbar, dass die erste Geometrie (mit einem Kapillarrohrabstand von 30 mm) die längsten Beladezeiten aufweist. Dies ist auf die geringere Wärmeaustauschfläche der Hybridkassette zurückzuführen. Im Gegensatz dazu verfügt die zweite Geometrie (mit einem Kapillarrohrabstand von 20 mm) über kürzere Beladezeiten aufgrund einer größeren Wärmeaustauschfläche. Die dritte Geometrie zeigt im Vergleich zu den ersten beiden Geometrien die geringsten Beladezeiten. Zudem ist bei den ersten beiden Geometrien eine deutliche Abnahme der Beladezeit bei steigenden Vorlauftemperaturen zu erkennen. Dieser Trend ist bei der dritten Geometrie weniger ausgeprägt. Daher führt eine Erhöhung der Vorlauftemperatur bei der dritten Geometrie nicht zu einer signifikanten Reduktion der Beladezeit.

Folglich ist die PCM-Hybrid-Kassette mit beidseitiger Aussparung für den im Projekt festgelegten Heizungsfall am besten geeignet. Somit wurde der Meilenstein M4 erreicht, indem ein Demonstrator für das PCM-System erfolgreich vorgelegt wurde.

Arbeitspaket 3c: Tests und Zertifizierung PCM und PCM-O

Im Rahmen des Arbeitspakets 3a wurde eng mit dem CAE zusammengearbeitet. Während der Entwicklung der PCM-Hybrid-Kassette und bei der Betrachtung des Heizungsanwendungsfalls ergaben sich spezifische Randbedingungen, die bei den Tests der PCM-Hybrid-Kassette berücksichtigt werden mussten. Es war von entscheidender Bedeutung sicherzustellen, dass keine übermäßig hohen Strömungsgeschwindigkeiten in den Kapillarrohrmatten auftreten, da diese andernfalls zu einem erheblichen Druckverlust führen könnten, ohne einen signifikanten Beitrag zur Verbesserung der Wärmeübertragung zu liefern. Zusätzlich wurde die Eintrittstemperatur so gewählt, dass eine optimale Nutzung von Wärmepumpen (bei niedrigem COP) während des späteren Betriebs des multifunktionalen Fassadenelements gewährleistet ist.

Arbeitspaket 9: Test eines Demonstrators

Gemeinsam mit den Partnern TUK und ZAE wurden die Spezifikationen des Demonstrators definiert und relevante Betriebsszenarien erörtert. Die Ergebnisse der in AP 3 entwickelten Simulationsmodelle wurden hierbei als Referenz herangezogen und aufbereitet, um den Demonstrator entsprechend zu dimensionieren. Weiterhin konnten die Modelle herangezogen werden, um bestimmte Regelstrategien zu definieren.

Arbeitspaket 11: Öffentlichkeitsarbeit

Die Projektergebnisse werden derzeit noch eine wissenschaftliche Publikation aufbereitet und sollen demnächst bei einer Fachzeitschrift wie Renewable Energy, Energies oder Journal of Energy Storage, o.ä., eingereicht werden.

Paderborn, den 26.09.2024

Prof. Dr.-Ing. Julia Riese

Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik

Fakultät für Maschinenbau

Universität Paderborn

Projektleiterin