

Schlussbericht vom 15.06.2026

zum IGF-Vorhaben Nr. 01IF22617N

Thema

Entwicklung regelbarer Vakuumdämmelemente zur bedarfsgerechten Anpassung des Wärmedurchgangs in Gebäudehüllen und -strukturen sowie der thermischen Aktivierung von Speichermassen (ReVaD)

Berichtszeitraum

01.11.2022 bis 31.12.2025

Forschungsvereinigung

Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V.
Pfaffenwaldring 6A, 70569 Stuttgart

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1 (FE 1)

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung, Universität Stuttgart (IGTE)
Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart

Forschungseinrichtung 2 (FE 2)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Technische Thermodynamik
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

Forschungseinrichtung 3 (FE 3)

Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung (DITF)
Körbschälstraße 26, 73770 Denkendorf

Inhaltsverzeichnis

1	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	3
1.1	Arbeitspaket 1: Definition der Einsatzszenarien und Spezifikationen (FE 1, 2, 3)	6
1.2	Arbeitspaket 2: Numerische Untersuchung der Energieeinspar- und Flexibilisierungspotentiale regelbarer Wärmedämmungen für Gebäudehüllen und Speichermassen (FE 1).....	7
1.3	Arbeitspaket 3: Entwicklung eines Metallhydrid-Reaktors zur definierten Einstellung des Wasserstoffdrucks im Vakuumdämmpaneel (FE 2 (DLR))	19
1.4	Arbeitspaket 4: Entwicklung eines textilen Vakuumdämmpaneels mit definierten Poreneigenschaften (FE 3)	23
1.5	Arbeitspaket 5: Integration und Untersuchung der Interaktion und des Betriebsverhaltens von Paneel und Reaktor in Kombination (FE 2 + 3).....	28
1.6	Arbeitspaket 6: Upscaling von Funktionsmuster Labor zu Funktionsmuster Gebäude und Integration in Bauteil-Demonstratoren (FE 1, FE 2, FE 3)	33
1.7	Arbeitspaket 7: Erprobung und Test des Funktionsmusters „Gebäude“ (FE 1, FE 2, FE 3).....	36
1.8	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen.....	45
2	Verwendung der Zuwendung	51
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	51
4	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....	52
5	Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	56
5.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende).....	57
5.2	Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)	59
6	Literaturverzeichnis	61
7	Anhang.....	63

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Adaptive Gebäudehüllen und die gezielte Nutzbarmachung thermischer Speichermassen stellen vielversprechende Ansätze dar, um den Heiz- und Kühlergiebedarf von Gebäuden zu reduzieren und zugleich die energetische Flexibilität des Gebäudebetriebs zu erhöhen. Ein im Herbst 2020 in der Fachzeitschrift Science erschienener Kommentar von A. Henry et.al nennt als eine der fünf großen Herausforderungen hin zu einer weltweiten Dekarbonisierung die Entwicklung adaptiver Gebäudehüllen (orig.: ‚Variable conductance building envelopes‘). [1]

Während Wärmedämmungen nach Stand der Technik einen möglichst konstant niedrigen Wärmedurchgang anstreben, ermöglichen regelbare Dämmelemente eine situationsabhängige Anpassung des Wärmetransports. Dadurch kann ein Bauteil je nach äußeren und inneren Randbedingungen entweder wärmedämmend wirken oder gezielt thermisch gekoppelt werden – bspw. zur Abfuhr von Wärme, zur Nutzung niedriger Außentemperaturen für die Kühlung oder zur zeitlichen Verschiebung von Wärmelasten durch die Einbindung gebäudeinterner Speichermassen.

Gegenstand des Forschungsvorhabens ReVaD ist die Entwicklung und Untersuchung regelbarer Vakuum-Dämmelemente, deren Wärmeleitfähigkeit über den Gasdruck in Dämmpaneelen mit textilem Füllkern beeinflusst wird. Das technologische Grundprinzip des Vorhabens beruht auf der Kopplung eines textilbasierten Vakuumdämmpaneels mit einem extern angeordneten Metallhydrid-Reaktor. Der Reaktor dient dazu, Wasserstoff reversibel aufzunehmen oder abzugeben und dadurch den Gasdruck im Paneel einzustellen. Durch die räumliche Trennung von Reaktor und Paneel kann das Metallhydrid gezielt temperiert werden, ohne die gesamte Paneelstruktur thermisch beeinflussen zu müssen. Gleichzeitig eröffnet diese Systemarchitektur die Möglichkeit, den Gasstrom zwischen Reaktor und Paneel zeitweise zu unterbrechen und damit Haltezustände mit reduziertem Energiebedarf zu realisieren. Das Prinzip dieses Systems ist in Abbildung 1 gezeigt.

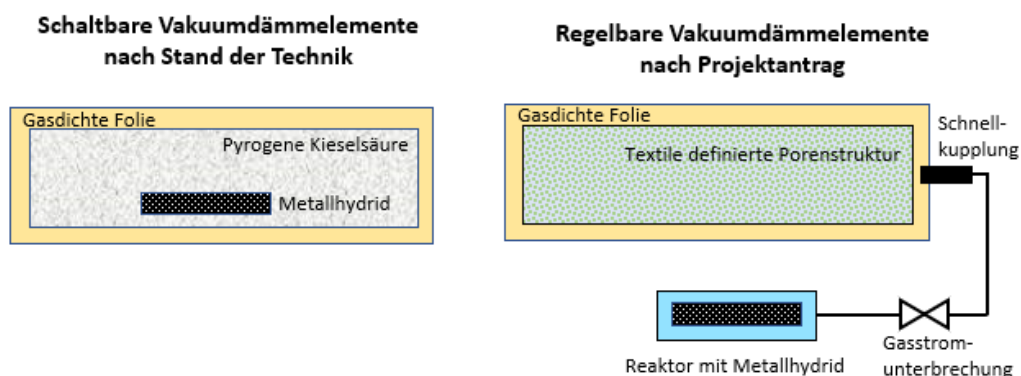


Abbildung 1: Prinzip schaltbarer Vakuumdämmelemente nach dem Stand der Technik und im Projekt entwickeltes System regelbarer Vakuumdämmelemente.

Wesentliche Herausforderungen liegen dabei in der reproduzierbaren Einstellung des Gasdrucks, der Dynamik des Schaltvorgangs, dem Energiebedarf des Regelmechanismus, der Dichtheit der Komponenten sowie der Übertragbarkeit vom Laborfunktionsmuster auf anwendungsnahe Bauteilmaßstäbe.

Um die Potentiale regelbarer Dämmelemente im Gebäudebereich näher untersuchen zu können, werden umfangreiche Simulationen verschiedener Anwendungsszenarien und Nutzungsmöglichkeiten regelbarer Dämmelemente durchgeführt. Hierfür wird eine eigene Simulationsumgebung aufgebaut, da etablierte Gebäudesimulationsprogramme die freie zeitabhängige Veränderung der Wärmeleitfähigkeit massebehafteter

opaker Bauteilschichten nur eingeschränkt abbilden können. Die Simulationsmodelle ermöglichen es, regelbare Außen- und Innenwände physikalisch konsistent in ein thermisches Raummodell einzubinden und deren Einfluss auf Heiz- und Kühlenergiebedarf, Raumtemperaturverhalten sowie die Nutzung thermischer Speichermassen zu untersuchen. Die Untersuchungen richten sich auf zwei wesentliche Anwendungsfelder: zum einen auf regelbare Außenwände als Bestandteil adaptiver Gebäudehüllen, zum anderen auf regelbare Innenwände zur Nutzung thermischer Speichermassen. Betrachtet werden dabei unter anderem unterschiedliche Schalfaktoren, Fensterflächenanteile, Sonnenschutzvarianten, interne Wärmeabgaben, Speicherkapazitäten sowie Neubau- und Bestandskonstruktionen. Für regelbare Innenwände wird untersucht, inwieweit durch gezielte thermische Kopplung und Entkopplung bzw. durch aktive Be- und Entladung von Speichermassen der Nutzenergiebedarf reduziert oder zeitlich verschoben werden kann.

Die numerischen Untersuchungen dienen damit sowohl der Potenzialabschätzung als auch der Einordnung der experimentellen Ergebnisse und der Ableitung geeigneter Zielgrößen für die technische Entwicklung von regelbaren Vakuum-Dämmelementen.

Zur Einordnung der nachfolgenden Arbeits- und Ergebnisdarstellung werden die zentralen Begriffe des Vorhabens wie folgt verwendet:

- **Regelbares Vakuumdämmelement** bezeichnet ein Dämmelement, dessen effektive Wärmeleitfähigkeit durch Veränderung des Gasdrucks innerhalb eines evakuierten bzw. teilgefüllten Paneels gezielt beeinflusst werden kann. Im Vorhaben wird hierfür Wasserstoff als Arbeitsgas betrachtet, da dessen hohe Wärmeleitfähigkeit eine deutliche Veränderung des Wärmedurchgangs ermöglicht.
- **Schalfaktor** beschreibt das Verhältnis zwischen maximaler und minimaler effektiver Wärmeleitfähigkeit des Dämmelements. Er ist damit eine zentrale Kenngröße zur Bewertung der regelbaren Dämmwirkung und beeinflusst maßgeblich das energetische Potenzial der Anwendung.
- **Metallhydrid-Reaktor** bezeichnet die thermochemische Reaktionskomponente, mit der Wasserstoff durch Temperaturänderung reversibel absorbiert oder desorbiert wird. Über diese Reaktion wird der Gasdruck im Paneel eingestellt. Im Vorhaben werden hierfür geeignete Metallhydridmaterialien charakterisiert, Reaktorkonzepte entwickelt und deren Betriebsverhalten untersucht.
- **Textiles Vakuumdämmpaneel** bezeichnet die Paneelkomponente mit textilem Füllkern, vakuumdichter Hülle und Gasanschluss. Der textile Füllkern muss gleichzeitig eine geringe Wärmeleitung, geeignete Poreneigenschaften für den Knudsen-Effekt sowie ausreichende Druck- und Dauerfestigkeit unter Vakuumbedingungen aufweisen.
- **Regelbare Außenwand** bzw. regelbare Außendämmung beschreibt den Anwendungsfall, bei dem regelbare Dämmelemente in die Gebäudehülle integriert werden. Ziel ist es, den Wärmeaustausch zwischen Innenraum und Außenklima abhängig von Temperaturen, Solarstrahlung und Kühl- bzw. Heizbedarf gezielt zu beeinflussen.
- **Regelbare Innenwand** bzw. regelbare Innendämmung beschreibt den Anwendungsfall, bei dem an Innenwänden angeordnete regelbare Dämmelemente zur thermischen Kopplung oder Entkopplung gebäudeinterner Speichermassen eingesetzt werden. Dadurch kann die wirksame thermische Trägheit eines Raumes verändert und gegebenenfalls eine zeitliche Verschiebung von thermischen Lasten (Heizen/Kühlen) unterstützt werden.

- **Funktionsmuster Labor, Funktionsmuster Gebäude und Bauteildemonstrator** bezeichnen die im Projekt betrachteten Entwicklungsstufen. Das Funktionsmuster Labor dient dem grundlegenden experimentellen Funktionsnachweis der gekoppelten Komponenten. Das Funktionsmuster Gebäude und der darauf aufbauende Bauteildemonstrator übertragen das Prinzip auf größere Paneelabmessungen und eine anwendungsnähere Bauteilintegration.

Essenziell für die Bearbeitung sind damit folgende Forschungsfragen, auf die sich die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse beziehen:

- Welche Einsatzszenarien, Anforderungen und Randbedingungen ergeben sich für regelbare Vakuum-Dämmelemente in Gebäudehüllen und bei der Nutzung gebäudeinterner Speichermassen?
- Welche energetischen Einspar- und Flexibilisierungspotenziale ergeben sich für regelbare Außen- und Innenwände in Abhängigkeit von Schalfaktor, Bauteilaufbau, Fensterflächenanteil, Sonnenschutz, Speichermasse und Regelstrategie?
- Wie muss ein textiler Füllkern ausgelegt werden, damit er unter Vakuumbedingungen ausreichend druckstabil ist und zugleich geeignete Poreneigenschaften für eine gasdruckabhängige Wärmeleitfähigkeit bereitstellt?
- Welche Metallhydridmaterialien und Reaktorkonzepte eignen sich zur reversiblen, dynamischen und energieeffizienten Einstellung des Wasserstoffdrucks im Vakuumdämmpaneel?
- Wie lassen sich Reaktor, Paneel, Gasanschluss, Verbindungstechnik und Trennmechanismus zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem koppeln?
- Kann der Funktionsnachweis der regelbaren Vakuumwärmedämmung zunächst im Labormaßstab und anschließend in einem skalierten, anwendungsnahen Fassadendemonstrator erbracht werden?
- Welche konstruktiven, messtechnischen und betrieblichen Grenzen zeigen sich beim Upscaling und welche Optimierungsbedarfe resultieren daraus für eine spätere industrielle Weiterentwicklung?

Über die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse zur Beantwortung dieser Forschungsfragen wird im Folgenden gegliedert anhand der Arbeitspakete des Projektplans berichtet. Die Bearbeitung beginnt mit der Definition der Einsatzszenarien und Spezifikationen, führt über die simulative Potenzialbewertung, die Entwicklung von Reaktor und Paneel sowie deren Kopplung zum Funktionsmuster Labor und schließt mit dem Upscaling sowie der Erprobung eines anwendungsnahen Bauteildemonstrators.

Abbildung 2 zeigt die Arbeitspakete des Forschungsvorhabens und die Meilensteine in Form von skalierten Funktionsdemonstratoren.

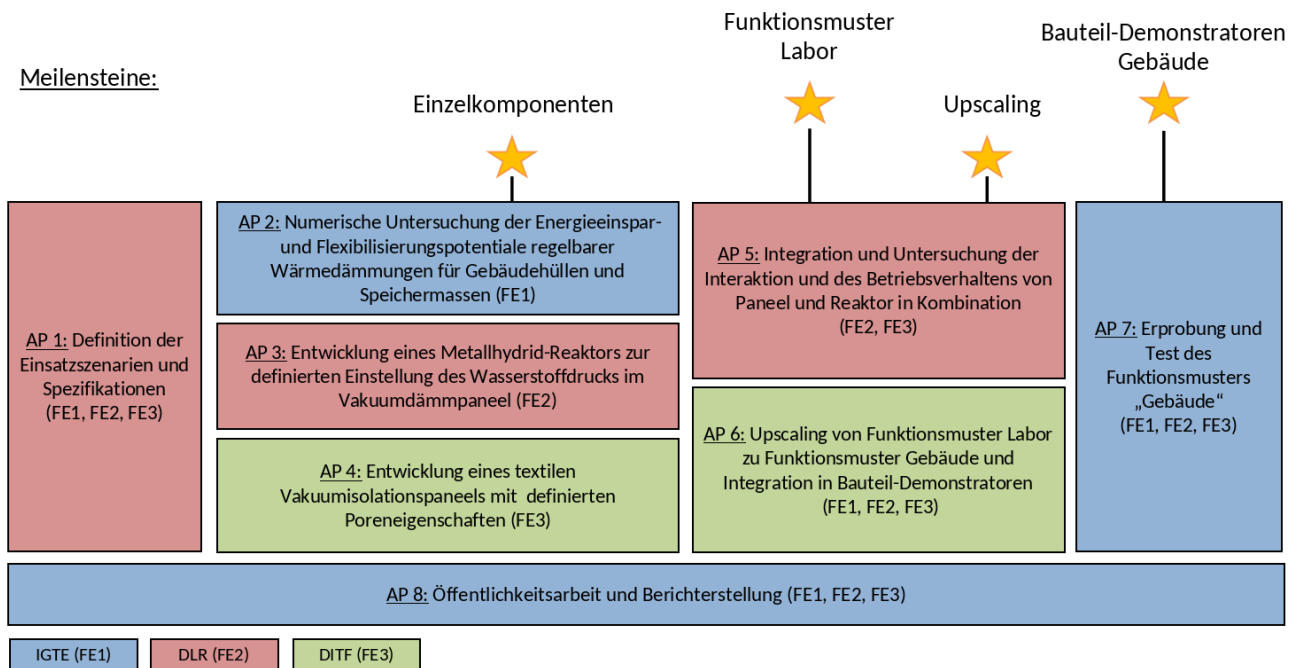


Abbildung 2: Übersicht der Arbeitspakete und Meilensteine im IGF-Projekt ReVaD.

1.1 Arbeitspaket 1: Definition der Einsatzszenarien und Spezifikationen (FE 1, 2, 3)

In einer umfangreichen Anforderungsliste wurde zusammengetragen und festgehalten, welche Einsatzszenarien vorstellbar und welche Spezifikationen, Randbedingungen, Gesetze und Verordnungen hinsichtlich regelbarer Wärmedämmung zu berücksichtigen sind. Die Recherchen und Überlegungen wurden im Projektverlauf immer wieder basierend auf neuen Erkenntnissen überarbeitet und angepasst.

Gemeinsam mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) wurde eine Anforderungsliste mit detaillierten Vorgaben u.a. zu konstruktiven, materialtechnischen, sicherheitstechnischen, betrieblichen und funktionalen Anforderungen erstellt. Die darin gelisteten Anforderungen bzw. Randbedingungen sind gegliedert nach den Bereichen „Anwendung, Untersuchung Funktionsmuster, Thermisch-physikalische Kenngrößen“. Beispielsweise können sich Anforderungen an die Sicherheit bei experimentellen Untersuchungen von Paneelen stark von denen bei deren Anwendung unterscheiden. Ähnliches gilt für Anforderungen hinsichtlich der Langzeitstabilität. Ein Beispiel für eine physikalische Randbedingung ist die erforderliche Porengröße des Dämmkerns für die maximale Wirksamkeit des Knudsen-Effekts zur Variation des Wärmedurchgangs. In den folgenden Arbeitspaketen wird auf die Erfüllung der Anforderungsliste hingearbeitet; diese gibt somit eine grobe Struktur für die weitere Bearbeitung des Projekts. Aufgrund neuer Erkenntnisse abgeleitete Randbedingungen werden im Laufe der Projektbearbeitung kontinuierlich berücksichtigt.

Ergänzend dazu wurde eine Potentialanalyse zu Einsatzbereichen der regelbaren Dämmelemente durchgeführt. Bezüglich der Anwendung der Paneele wurde die Anbringung der Dämmelemente an der Fassade als wichtige konstruktive Aufgabe identifiziert. Konventionelle (nicht regelbare) Vakuumdämmelemente werden häufig direkt mit der Fassade verklebt. Dies ist beim Aufbau der regelbaren Vakuumdämmelemente unpraktikabel. Daraus wird abgeleitet, dass eine Realisierung des Systems besonders im Bereich des Modulbaus bzw. Fertighausbaus denkbar ist. Dieser Eindruck wurde durch die späteren Erfahrungen am anwendungsnahen Demonstrator (AP 7) bestätigt. In diesen Bereichen können Dämmelemente in Modulbauweise als

fertiges Fassadenelement aufgebaut sein, die montiert geliefert und an tragenden Bauteilen befestigt werden oder im Bereich des Fertighausbaus als Teil ganzer Wandbauteile angeliefert werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Recherchen und Simulationen (AP 2) zeigen, dass es entscheidend ist, dass die tragenden Bauteile hinter den regelbaren Dämmelementen eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit haben, damit der Schalfaktor der Module nicht wesentlich durch diese limitiert wird. Beim Anwendungsfall der innenliegenden Dämmung zur aktiven Nutzung gebäudeinterner Speichermassen wurden Konstruktionen erarbeitet, die in einer Einheit aus regelbarem Dämmelement und Heizmatte direkt an Wände von Bestandsgebäuden montiert werden können.

Das Thema des Brandschutzes wurde gemeinsam mit dem PA thematisiert und erste konzeptionelle Lösungsvorschläge erarbeitet, die je nach zukünftiger Nutzung der Technologie und Anwendungsfall spezifisch angepasst und verfeinert werden können. Hierbei wurde deutlich, dass die Dichtigkeit der Komponenten und Verbindungsstücke essenziell ist und zudem eine möglichst geringe Wasserstoffmenge ein wichtiges Auslegungskriterium ist. Da die Paneele im Betrieb stets im Unterdruck sind, wird die Luft bei einer auftretenden Undichtigkeit tendenziell in die Paneele eingesaugt, ein massiver Wasserstoffaustritt ist im Unterdruck zunächst nicht erwartbar. Die potentiell gasförmige Wasserstoffmenge sollte im Verhältnis zum umgebenden Volumen idealerweise so ausgelegt werden, dass sich kein globales explosives Gemisch bilden kann. Notmechanismen und eine funktionale Ventilkette, die im Brandfall den Wasserstoff in den Reaktor zurückziehen, können ein weiterer Baustein eines zukünftigen Sicherheitskonzepts sein. Vergleichbare Reaktoren wie die im Projekt verwendeten wurden von TÜV Süd im Auftrag von FE 2 hinsichtlich ihrer Brandbeständigkeit erfolgreich und ohne Schadverhalten getestet. Der Einsatz alternativer Gase mit hoher Wärmeleitfähigkeit (z.B. Helium) ist prinzipiell denkbar zur Variation der Dämmfähigkeit der Paneele – jedoch nur als offenes System mittels externer Gasversorgung und Vakuumpumpenbetrieb, thermochemische Reaktionssysteme sind zur Gasdruckregelung von Edelgasen nicht einsetzbar und diese für offene Systeme zu teuer. Eine vollständige Ausführung der Brandschutzkonzepte ist zum geplanten Entwicklungsstand der regelbaren Dämmelemente zum Projektende noch nicht zielführend, die konzeptionellen Überlegungen zeigen aber die prinzipielle Umsetzbarkeit des Systems.

Aufbauend auf den zusammengetragenen Anforderungen, wurde das Funktionsmuster Labor (FM-Labor) konzipiert. Es soll eine Größe von 30 x 30 cm aufweisen (AP 4). Das Funktionsmuster Gebäude (FM-Gebäude) hat eine Größe von 50 x 50 cm. Im anwendungsnahen Demonstrator (AP 6 und 7) werden vier dieser Elemente zu einem 1 m² (1 m x 1 m) großen Fassadenelement verbunden, dessen Wasserstoffinhalt über einen angeschlossenen Metallhydrid-Reaktor kontrolliert wird. Details zur Ausführung der beiden Funktionsmuster sind in den AP 4 und 6 beschrieben.

1.2 Arbeitspaket 2: Numerische Untersuchung der Energieeinspar- und Flexibilisierungspotenziale regelbarer Wärmedämmungen für Gebäudehüllen und Speichermassen (FE 1)

Ziel des Arbeitspakets 2 ist die numerische Bewertung der Energieeinspar- und Flexibilisierungspotenziale regelbarer Wärmedämmungen für adaptive Gebäudehüllen sowie für thermisch aktivierbare Speichermassen. Dazu wurden die relevanten Randbedingungen für Neubau- und Bestandsgebäude festgelegt, auf dieser Grundlage thermisch-energetische Gebäudesimulationsmodelle aufgebaut, Referenzbedarfe für Heizen und Kühlen bestimmt und Modellansätze für veränderliche Dämmschichteigenschaften und aktivierbare Speichermassen erweitert. Ein weiteres Ziel bestand darin, Sensitivitätsanalysen zu unterschiedlichen Einflussparametern durchzuführen, darunter Wärmeleitfähigkeitsbereiche, Mindestoberflächentemperaturen,

technische Ausstattungen wie Sonnenschutz sowie unterschiedliche Regelungsstrategien. Die untersuchten Parameter wurden in Parameterstudien hinsichtlich ihres Einflusses auf den Energiebedarf bewertet, um daraus geeignete Einsatzbereiche und Potenziale der regelbaren Wärmedämmung abzuleiten.

Anforderungen an die Modellerstellung regelbarer Dämmelemente für Gebäudehüllen und Innenwände

Für die Simulation regelbarer Dämmelemente an Außen- und Innenwänden muss eine Simulationsumgebung bzw. ein -programm genutzt werden, bei der Wandschichten und Materialien über die Zeitschritte der Simulation veränderlich sind, um die Wärmeleitfähigkeit der Wand variieren zu können. Üblicherweise eingesetzte Simulationsmodelle in thermisch-energetischen Gebäudesimulationsprogrammen erfüllen dieses Kriterium nicht. Für die Modellierung regelbarer Gebäudehüllen und Innenwände sind hierbei insbesondere Einschränkungen bei vorab festgelegten Materialeigenschaften, bei massebehafteten schaltbaren Schichten, bei der freien zeitabhängigen Vorgabe der Wärmeleitfähigkeit $\lambda(t)$, bei physikalisch unzureichenden Ersatzmodellen opaker Bauteile sowie bei der Einbindung externer Regelungsansätze relevant.

Vor diesem Hintergrund wurde eine eigenständige Simulationsumgebung in Matlab/Simscape aufgebaut. Sie ermöglicht die zeitlich veränderliche Vorgabe relevanter Materialparameter, die Berücksichtigung massebehafteter Schichten, eine konsistente thermische und strahlungsbezogene Bilanzierung sowie die externe Regelung von Dämmelementen an Gebäudehüllen und Innenwänden. Zur Validierung der Simulationsumgebung wurden Simulationen mit unveränderlichen Materialeigenschaften an Außenwänden durchgeführt, sodass die Ergebnisse mit denen aus bestehenden häufig für thermisch-energetische Simulationen eingesetzten Softwareumgebungen wie bspw. TRNSYS verglichen werden konnten. Diese Vergleichsrechnungen zeigten für den stationären und instationären Jahressimulationsverlauf Abweichungen des Heiz- und Kühlenergiebedarfs beziehungsweise der Heiz- und Kühlleistung von weniger als 5 %, sodass diese Umgebung für die weiteren Untersuchungen geeignet ist.

Modellerstellung und Methodik

Die Simulationen werden als instationäre Jahressimulationen durchgeführt. Bewertet wird der Nutzenergiebedarf eines Beispielraums für Heizen und Kühlen unter definierten klimatischen, nutzungsbezogenen, bauphysikalischen und regelungstechnischen Randbedingungen. Der Beispielraum wird in Anlehnung an VDI 6020 [19] als thermisches Zonenmodell abgebildet. Die raumumschließenden Bauteile stehen über konvektiven und radiativen Wärmeaustausch mit der Raumluft sowie untereinander in Wechselwirkung.

Als äußere Randbedingungen werden Klimadaten des Testreferenzjahres 12 mit der Referenzstation Mannheim für den Standort Stuttgart verwendet. Die Sollwerte der Raumtemperatur werden in Anlehnung an DIN EN 16798-1 [8] mit 20 °C für Heizen und 26 °C für Kühlen festgelegt. Das Heiz- und Kühlsystem wird als idealer Heizer beziehungsweise idealer Kühler (ideal: mit unbegrenzter verfügbarer Leistung sowie ohne Trägheit) modelliert, die Ergebnisse sind daher als Nutzenergiebedarf des Raums und nicht als Endenergiebedarf eines Anlagensystems zu interpretieren.

Innere Wärmeabgaben durch Personen, Beleuchtung und elektrische Geräte sowie Lüftung und Infiltration werden zeitabhängig berücksichtigt. Der Raum wird an Werktagen von 8:00 Uhr bis 17:00 Uhr durch eine Person belegt. Für die Personenwärme werden 100 W angesetzt, die Wärmeabgabe der Beleuchtung beträgt 87,5 W und die elektrischen Geräte werden mit 200 W berücksichtigt. Während der Belegungszeit wird ein Luftwechsel von $n = 1,0 \text{ h}^{-1}$ angesetzt, außerhalb der Belegungszeit wird ausschließlich der Infiltrationsluftwechsel von $n = 0,1 \text{ h}^{-1}$ berücksichtigt. [7, 16, 18]

Für die regelbare Außenwand wird die Wärmeleitfähigkeit der schaltbaren Schicht in Abhängigkeit von Raumtemperatur, Heiz- und Kühlsollwert sowie der außenseitigen Oberflächentemperatur der Außenwand ϑ_{so} angepasst. Befindet sich die Raumtemperatur zwischen Heiz- und Kühlsollwert, bleibt die Wärmeleitfähigkeit unverändert. Im Heizfall wird die Wärmeleitfähigkeit nur dann erhöht, wenn die Raumtemperatur unterhalb des Heizsollwertes liegt und die außenseitige Oberflächentemperatur der Außenwand ein gegenüber dem Heizsollwert nutzbares Temperaturniveau aufweist. Im Kühlfall wird die Wärmeleitfähigkeit erhöht, wenn die Raumtemperatur oberhalb des Kühlsollwertes liegt und die außenseitige Oberflächentemperatur der Außenwand unterhalb des Kühlsollwertes liegt. Dadurch kann im Heizfall ein Wärmeeintrag in den Raum und im Kühlfall eine Wärmeabfuhr aus dem Raum unterstützt werden.

Zusätzlich wird die raumseitige Innenoberflächentemperatur der Außenwand als begrenzende Randbedingung berücksichtigt. Die Mindestoberflächentemperatur $\vartheta_{si,min}=19^{\circ}\text{C}$ bezieht sich auf die raumseitige Oberfläche der regelbaren Außenwand und wird eingeführt, um eine zu starke Abkühlung der inneren Wandoberfläche sowie mögliche Tauwasser- bzw. Kondensationsrisiken zu vermeiden. Wird diese Mindesttemperatur unterschritten, wird eine weitere Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit nicht zugelassen bzw. diese entsprechend verringert.

Der Schaltfaktor SF beschreibt dabei das Verhältnis zwischen geringleitendem und (vergleichsweise) hochleitendem Zustand der regelbaren Schicht mit $\lambda_{max}=\lambda_{min} \cdot SF$.

Die bauphysikalischen Kennwerte der raumumschließenden Bauteile sind in Anhang 1, Abbildung 6 zusammengefasst und werden mit ihren jeweiligen Flächen, Randbedingungen und bauphysikalischen Kennwerten in das Simulationsmodell übernommen. Innenwand, Innentür, Geschossdecke und Fußboden werden auf der dem Raum abgewandten Seite als adiabate Bauteile angesetzt. Damit wird für diese Bauteile kein Wärmestrom über die jeweilige Außenseite berücksichtigt. Die Außenwand und das Fenster werden hingegen mit externen Randbedingungen beaufschlagt und stehen damit im thermischen Austausch mit dem Außenklima.

Für den Fall „Neubau“ wird für die Außenwand ein leichtes Bauteil angesetzt. Der Aufbau besteht aus einer äußeren Brettschalung, einer Dämmschicht und einer inneren Brettschalung. Der Wärmedurchgangskoeffizient U beträgt etwa $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Geschossdecke und der Fußboden werden mit identischem Schichtaufbau modelliert. Der Wärmedurchgangskoeffizient dieser Bauteile beträgt etwa $0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Innenwand und die Innentür werden aufgrund der adiabaten Randbedingung nicht als wärmeübertragende Bauteile betrachtet, ihre thermische Speichermasse wird jedoch im Raummodell berücksichtigt.

Für den Fall „Bestand“ wird die als „Neubau“ bezeichnete Außenwand an eine bestehende Wand der Baualtersklasse 1969 - 1978 hinzugefügt und modelliert. Hierzu wurden Referenzschichtaufbauten aus [4] entnommen und angewendet. Anzumerken ist hierbei, dass lediglich das Mauerwerk, jedoch nicht der Innen- oder Außenputz betrachtet wurde. Dabei soll untersucht werden, inwieweit ein bestehender speichermassebehafteter Wandaufbau das Potenzial eines regelbaren Außenwandbauteils im Falle einer Nachrüstung beeinflusst.

Tabelle 1: Wandaufbau für die Baualtersklasse 1969 - 1978 inkl. regelbarem Dämmelement

Bauteil	Fläche m ²	Zustand -	Aufbau -	Dicke mm	Dichte kg/m ³	Wärmeleit- fähigkeit W/(mK)	Wärmedurch- lasswiderstand R (m ² K)/W
Außen- wand [4] + Regelba- res Däm- mele- ment	1-WWR	Extern	Bimshohl- blockstein	240	1.600	0,56	0,42
			Brettschalung	10	500	0,140	3,987
			Dämmung	123	75	0,032	
			Brettschalung	10	500	0,140	

Für alle untersuchten Varianten wird im Simulationsmodell ein einheitlicher Fenstertyp verwendet. Die wärme- und strahlungstechnischen Kennwerte werden aus der hinterlegten Berkeley Lab WINDOW v7.4.6.0 DOE-2-Datendatei übernommen. Verwendet wird die Verglasung mit der Window ID 201 und der Beschreibung 2-WSV_#3_Ar90. [17] Die Verglasung besteht aus einer Zweifach-Wärmeschutzverglasung mit dem Aufbau 6/16/6 und einer Argonfüllung im Scheibenzwischenraum. Die angesetzten Kennwerte sind in Anhang 1, Tabelle 8 zusammengefasst.

Regelbare Außenwanddämmung

Für den Untersuchungsgegenstand der regelbaren Außenwand basiert die Variantenmatrix auf einer systematischen Kombination aus Gebäudestandard, Window-to-Wall-Ratio (WWR), Schaltfaktor, Mindestoberflächentemperatur, internen Wärmeabgaben, Sonnenschutz und Speicherkapazität. Im Fokus der Auswertung stehen der Neubauzustand, Window-to-Wall-Ratios von 10 % bis 80 % und Schaltfaktoren (SF) von 1 bis 1.000. Mit zunehmendem WWR erhöht sich die Fensterfläche, während die opake Außenwandfläche als wirksame Fläche der regelbaren Gebäudehülle abnimmt.

Der Heizenergiebedarf zeigt über die untersuchten Schaltfaktoren und Window-to-Wall-Ratios (WWR) nur marginale Veränderungen. Die regelbare Außenwand wirkt sich im Heizfall daher nur untergeordnet auf den Nutzenergiebedarf aus.

Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt der weiteren Auswertung auf dem Kühlenergiebedarf, bei dem die Anpassung der Wärmeleitfähigkeit ein deutlich größeres Einsparpotenzial zeigt.

Die Auswertung des Kühlenergiebedarfs in Abbildung 3 zeigt für alle untersuchten WWR einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Schaltfaktor und dem flächenbezogenen Nutzenergiebedarf für Kühlen. Mit zunehmendem Schaltfaktor nimmt der Kühlenergiebedarf zunächst deutlich ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich mit steigendem Schaltfaktor die thermische Kopplung der regelbaren Außenwand mit dem Außenklima deutlich erhöhen lässt, wodurch Wärme wirksamer aus dem Raum beziehungsweise aus den inneren Wandbereichen abgeführt werden kann.

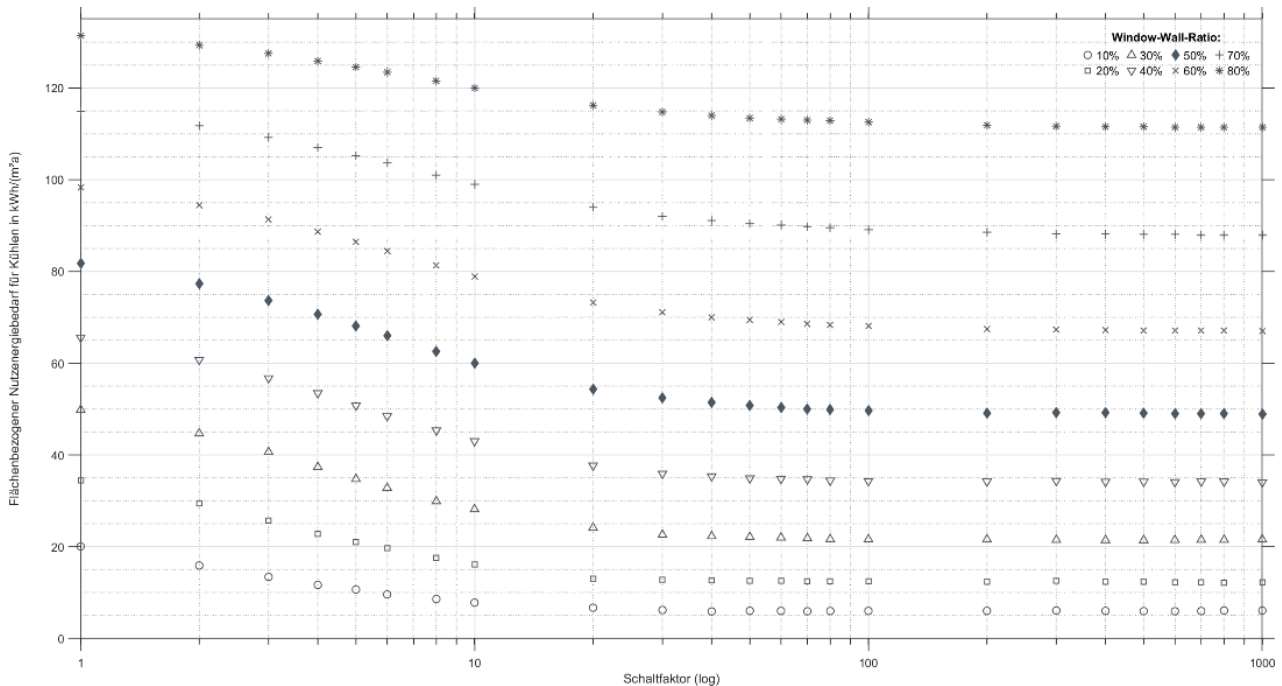


Abbildung 3: Nutzenergiebedarf für Kühlen in Abhängigkeit der Window-to-Wall-Ratio (WWR)

Die Kurvenverläufe der verschiedenen WWR weisen eine vergleichbare abnehmende Charakteristik auf und verlaufen näherungsweise äquidistant. Die Unterschiede zwischen den WWR zeigen sich vor allem in einer vertikalen Verschiebung des Bedarfsniveaus. Mit zunehmendem Fensterflächenanteil steigt der flächenbezogene Kühlenergiebedarf infolge höherer solarer Wärmeeinträge über die transparente Gebäudehülle. Bei hohen Schaltfaktoren flachen die Kurven zunehmend ab. Dieses Sättigungsverhalten zeigt, dass die Wärmeleitung innerhalb der regelbaren Außenwand ab einem bestimmten Schaltfaktor nicht mehr den dominierenden thermischen Widerstand darstellt, stattdessen begrenzen Wärmeübergangskoeffizienten und verfügbare Temperaturdifferenzen den maximal möglichen Wärmestrom. Die relative Darstellung (Einsparungen, bezogen auf die nicht regelbare Dämmung ($SF = 1$)) bestätigt das Sättigungsverhalten und sind in Anhang 1, Abbildung 30 dargestellt. Mit zunehmendem Schaltfaktor steigt die Einsparung zunächst deutlich an, bei höheren Schaltfaktoren bewirken zusätzliche Erhöhungen nur noch geringe weitere Einsparungen. Ab etwa $SF = 50$ bis 100 ist nur noch eine geringe Zunahme der Einsparung erkennbar. Kleine WWR erreichen die höchsten prozentualen Einsparungen. Es resultieren maximale Kühlenergieeinsparungen von rund 70 % bei $WWR = 10\%$, während die Einsparung bei $WWR = 80\%$ nur noch etwa 15 % beträgt. Der relative Beitrag der regelbaren opaken Außenwand zur Kühlenergiebedarfsreduzierung nimmt somit mit zunehmendem Fensterflächenanteil deutlich ab.

Vergleich der Mindestoberflächentemperatur der Innenwandoberfläche

Die Mindestoberflächentemperatur bezieht sich auf die raumseitige Innenoberfläche der regelbaren Außenwand. Sie wird als begrenzende Randbedingung eingeführt, um eine zu starke Abkühlung der inneren Wandoberfläche und damit mögliche Tauwasser- bzw. Kondensationsrisiken zu vermeiden. Da Feuchteprozesse im Modell nicht abgebildet werden, wird die Aktivierung bzw. Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit nur zugelassen, solange die innere Oberflächentemperatur der Außenwand oberhalb des vorgegebenen Grenzwertes bleibt. Die Mindestoberflächentemperatur wirkt insbesondere bei hohen Schaltfaktoren als begrenzende Randbedingung. Bei $\vartheta_{Si,min} = 16^\circ\text{C}$ wird eine Kühlenergieeinsparung von etwa 72 % erreicht, während bei

$\vartheta_{si,min}=19\text{ }^{\circ}\text{C}$ etwa 64 % erreicht werden. Die Erhöhung der Mindestoberflächentemperatur von 16°C auf 19°C reduziert das maximale Einsparpotenzial damit um rund 8 Prozentpunkte.

Vergleich unterschiedlicher Nutzungsarten

Zur Abbildung unterschiedlicher Nutzungen wurden die internen Wärmeabgaben des Raums variiert. Dabei steht der Wohnraum für eine geringe, das Büro für eine mittlere und der Seminarraum für eine hohe interne Wärmeabgabe. Die betrachtete interne Wärmeabgabe umfasst die Wärmefreisetzung durch Personen und Geräte und wurde im Bereich von 100 bis 800 W angesetzt. Die Beleuchtungsleistung bleibt unverändert und wird nicht als zusätzlicher Variationsparameter berücksichtigt. Die Mindesttemperatur der raumseitigen Innenoberfläche der Außenwand wurde entsprechend den Standardparametern mit $\vartheta_{si,min}=19^{\circ}\text{C}$ angesetzt.

Mit zunehmender interner Wärmeabgabe nimmt das relative Einsparpotenzial der regelbaren Außenwand ab. Bei einer geringen internen Wärmeabgabe von 100 W wird eine maximale Kühlenergieeinsparung von etwa 69 % erreicht. Bei einer hohen internen Wärmeabgabe von 800 W sinkt die maximale Einsparung auf etwa 54 %. Die regelbare Außenwand bleibt damit auch bei höheren internen Wärmeabgaben wirksam, kann den zunehmenden Kühlbedarf jedoch nicht proportional kompensieren. Der verbleibende Kühlbedarf liegt insbesondere in Zeiträumen, in denen hohe interne Wärmeabgaben auftreten und gleichzeitig nur eine begrenzte nutzbare Temperaturdifferenz zwischen Raum und Außenluft zur Verfügung steht.

Vergleich von Sonnenschutz und regelbarer Außenwand

Abbildung 4 ergänzt die Auswertung um den Vergleich von Sonnenschutz, regelbarer Außenwand und der kombinierten Anwendung beider Maßnahmen. Als gemeinsame Referenz dient die Variante ohne Sonnenschutz im nicht regelbaren Zustand der Außenwand ($SF = 1$). In diesem Zustand erfolgt keine adaptive Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der regelbaren Schicht. Der flächenbezogene Nutzenergiebedarf für Kühlen beträgt bei dieser Referenz $34,4\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Durch den Einsatz eines außenliegenden Sonnenschutzes sinkt der Kühlenergiebedarf auf $13,8\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, was einer Reduktion um 60 % entspricht. Das maximale Potenzial der regelbaren Außenwand ohne Sonnenschutz wird beim höchsten untersuchten Schaltfaktor von 1.000 erreicht. In diesem Fall reduziert sich der Kühlenergiebedarf auf $12,3\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, entsprechend einer Reduktion um 64 %. Aus dem Kurvenverlauf wird zudem ersichtlich, dass ohne Sonnenschutz etwa ein Schaltfaktor von $SF \approx 20$ erforderlich ist, um ein Einsparniveau in der Größenordnung der Referenzvariante mit Sonnenschutz zu erreichen.

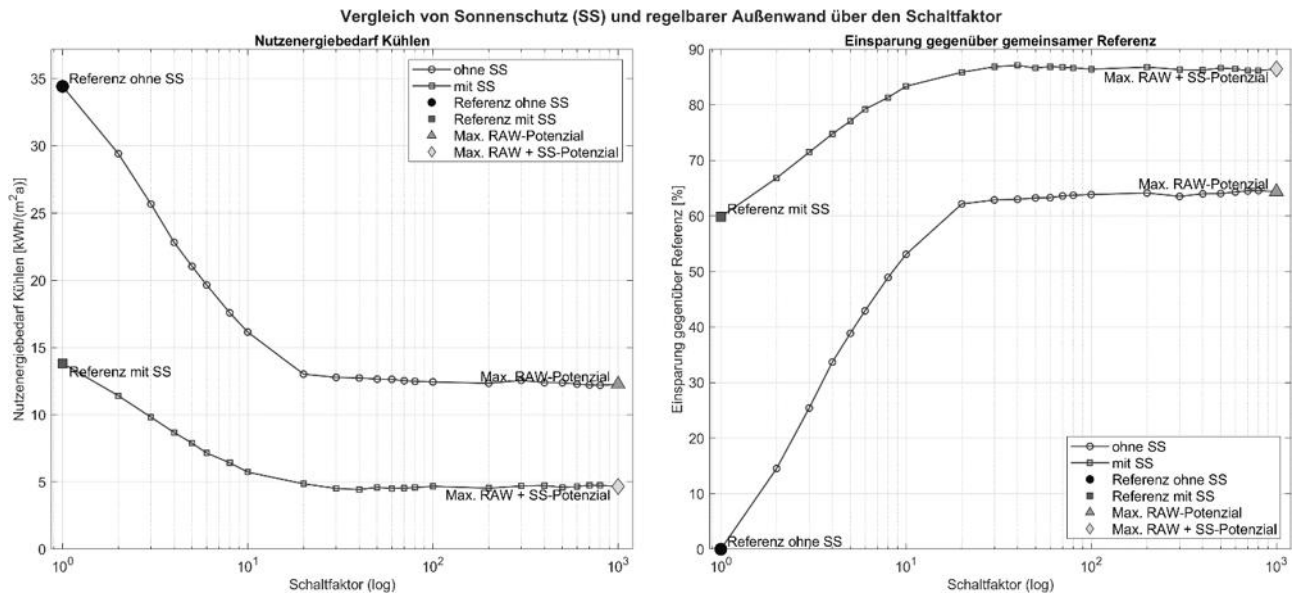


Abbildung 4: Vergleich von Sonnenschutz (SS) und regelbarer Außenwand über den Schaltfaktor. Links ist der flächenbezogene Nutzenergiebedarf für Kühlen dargestellt, rechts die prozentuale Einsparung gegenüber der gemeinsamen Referenz ohne Sonnenschutz und ohne regelbare Außenwand bei SF = 1

Die Kombination aus Sonnenschutz und regelbarer Außenwand (RAW) führt zur maximalen Reduktion des Kühlenergiebedarfs. Mit einem sehr hohen Schaltfaktor SF = 1.000 beträgt der Kühlenergiebedarf etwa 4,7 kWh/(m²a). Dies entspricht einer Reduktion von rund 87 % gegenüber der gemeinsamen Referenz.

Tabelle 2: Einsparung gegenüber der Referenz ohne Sonnenschutz (SS)

Variante	$Q_{\text{Kühlen}}$ in kWh/(m²a)	Einsparung in %
Referenz ohne SS	34,43	0,0
Referenz mit SS	13,82	59,9
regelbare Außenwand (max. RAW-Potenzial)	12,27	64,4
Sonnenschutz + regelbare Außenwand (max. RAW + SS-Potenzial)	4,66	86,5

Die Gegenüberstellung zeigt, dass Sonnenschutz und regelbare Außenwand unterschiedliche Wirkmechanismen aufweisen. Der Sonnenschutz reduziert primär die solaren Gewinne über die Verglasung während der Einstrahlungszeiten. Die regelbare Außenwand ist dagegen an nutzbare Temperaturdifferenzen zwischen Raum, Bauteil und Außenluft gekoppelt und kann auch außerhalb direkter Sonneneinstrahlung zur Wärmeabfuhr beitragen. Beide Maßnahmen ergänzen sich daher räumlich und zeitlich. Der Sonnenschutz reduziert den solaren Eintrag, während die regelbare Außenwand den verbleibenden Kühlbedarf über das opake Bauteil minimiert.

Einsatz an bestehender Außenwand

Ergänzend wurde die regelbare Außenwand als Nachrüstvariante im Bestand untersucht. Dazu wurde der regelbare Außenwandaufbau auf eine für die Baualtersklasse 1969 bis 1978 typische Bestandswand übertragen [4]. Ziel ist es zu bewerten, inwieweit die regelbare Dämmschicht auch im sanierten Bestandsaufbau zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs beitragen kann.

Zur Bewertung des sanierten Bestandsaufbaus mit regelbarem Dämmelement werden in Abbildung 5 der Gesamtwärmedurchlasswiderstand und die prozentualen Widerstandsanteile der einzelnen Schichten, die

energetische Wirkung im Bestand sowie der Vergleich mit dem Neubau zusammenfassend dargestellt. Der Zustand $SF = 1$ beschreibt den Referenzzustand ohne wirksame Schaltbarkeit, da die maximale Wärmeleitfähigkeit der regelbaren Dämmschicht der minimalen Wärmeleitfähigkeit entspricht. Mit zunehmendem Schaltfaktor sinkt der Wärmedurchlasswiderstand der regelbaren Schicht deutlich, sodass sich der maßgebende Widerstandsanteil im sanierten Bestand zunehmend auf die nicht regelbare 24-cm-Bestandswand verlagert. Ab etwa $SF \approx 9$ liegt der Widerstand der regelbaren Schicht in der Größenordnung des Widerstands der Bestandswand. Bei hohen Schaltfaktoren begrenzt daher die Bestandswand den minimal erreichbaren Gesamtwärmedurchlasswiderstand.

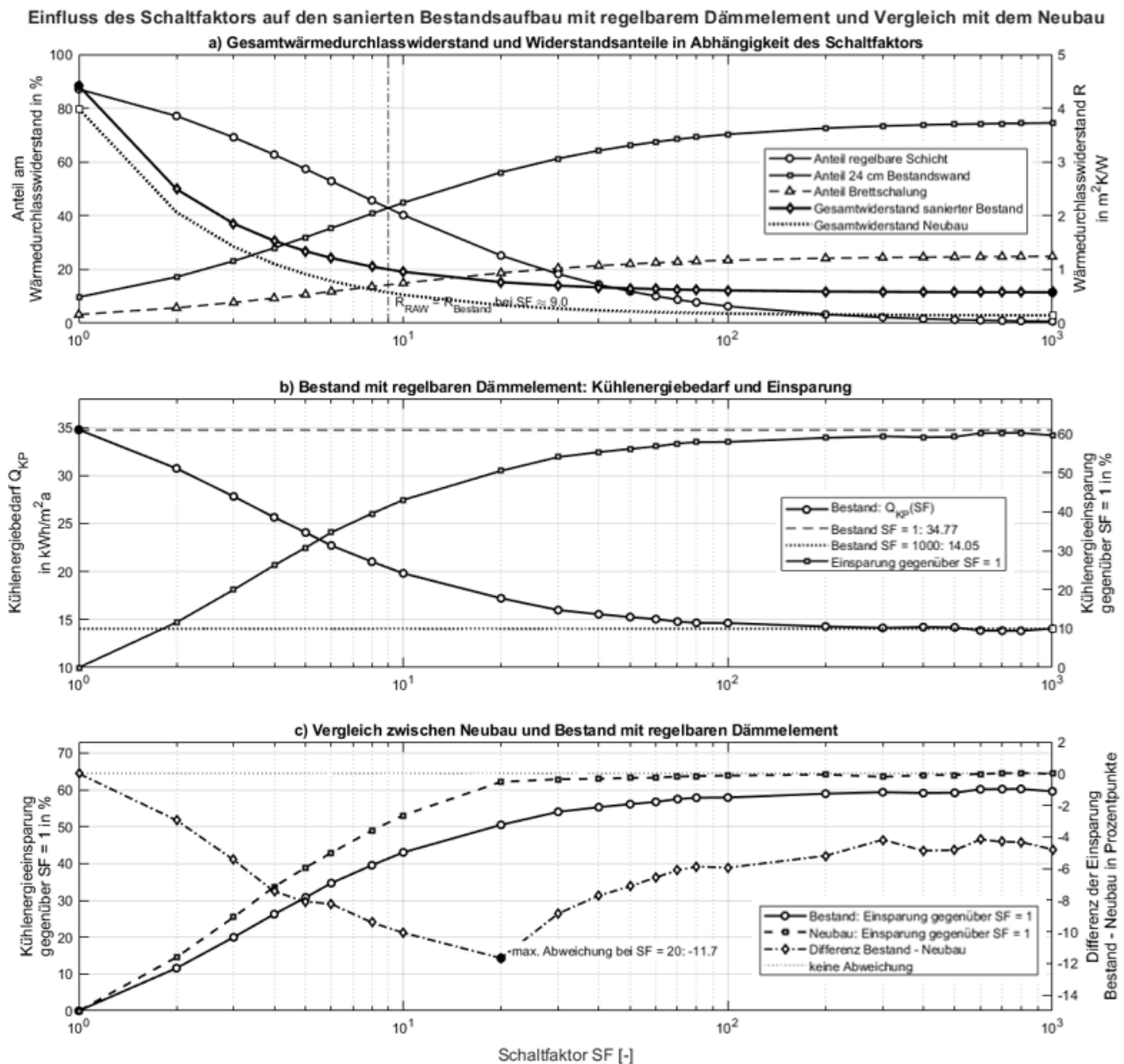


Abbildung 5: Einfluss des Schaltfaktors auf den sanierten Bestandsaufbau mit regelbarem Dämmelement und Vergleich mit dem Neubau. Teilbild a) zeigt den Gesamtwärmedurchlasswiderstand sowie die prozentualen Anteile der einzelnen Schichten am Gesamtwärmedurchlasswiderstand in Abhängigkeit des Schaltfaktors. Teilbild b) stellt für den sanierten Bestand den Kühlenergiebedarf und die Einsparung gegenüber dem Referenzzustand $SF = 1$ dar. Teilbild c) vergleicht die Kühlenergieeinsparung des sanierten Bestands mit derjenigen des Neubaus, jeweils bezogen auf den eigenen Referenzzustand $SF=1$. Die rechte Achse zeigt die Differenz der Einsparungen in Prozentpunkten.

Für den sanierten Bestand sinkt der Kühlenergiebedarf von etwa 34,8 kWh/(m²a) bei SF = 1 auf etwa 14,1 kWh/(m²a) bei SF = 1.000. Dies entspricht einer Einsparung von rund 60 % gegenüber dem Referenzzustand. Der größte zusätzliche Nutzen entsteht im niedrigen bis mittleren Schaltfaktorbereich. Bei hohen Schaltfaktoren flacht die Kurve ab, da die regelbare Schicht bereits weitgehend im hochleitenden Zustand vorliegt und die konstanten Widerstandsanteile des Bestandsbauteils den weiteren Wärmetransport begrenzen.

Der Vergleich mit dem Neubau zeigt, dass die Reduktion des Kühlenergiebedarfs im sanierten Bestand geringer ausfällt. Die Einsparungen werden dabei jeweils auf den eigenen Referenzzustand SF = 1 bezogen. Deshalb beträgt die Differenz bei SF = 1 definitionsgemäß 0 Prozentpunkte, obwohl die absoluten Wärmedurchlasswiderstände der beiden Wandaufbauten unterschiedlich sind. Die größte Abweichung tritt bei etwa SF = 20 auf, dort liegt die Kühlenergieeinsparung des sanierten Bestands um rund 11,7 Prozentpunkte unter derjenigen des Neubaus. Insgesamt zeigt sich, dass das regelbare Dämmelement auch im sanierten Bestand ein deutliches Einsparpotenzial besitzt, die maximal nutzbare Wirkung jedoch durch den nicht regelbaren Anteil des Bestandbauteils begrenzt wird.

Regelbare Innenwand

Für die regelbare Innenwand werden zwei grundsätzliche Anwendungsfälle untersucht. Im ersten Anwendungsfall wird die Innenwand ohne externe Beladung betrachtet (OEB). Die Speicherwirkung resultiert dabei ausschließlich aus der thermischen Masse der Innenwand und aus der veränderbaren Kopplung zwischen Raum und Speichermasse. Eine aktive thermische Be- oder Entladung der Speichermasse erfolgt nicht. Die Bewertung kann daher unmittelbar über die Veränderung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs des idealen Heiz-/Kühlsystems erfolgen. Eine Reduktion dieser Größen ist in diesem Anwendungsfall als energetische Einsparung gegenüber dem jeweiligen Referenzzustand zu bewerten.

Im zweiten Anwendungsfall wird die regelbare Innenwand mit einer externen thermischen Be- und Entladung der Speichermasse kombiniert (MEB), wobei die Speichermasse außerhalb der Belegungszeit gezielt be- oder entladen werden kann. Während der Belegungszeit wird die Innenwand nur dann thermisch an den Raum gekoppelt, wenn die resultierende Wärmestromrichtung die Heiz- oder Kühllast reduzieren kann. Die Innenwand wirkt in diesem Fall als regelbares thermisches Übergabesystem zwischen Speichermasse und Raum.

Die untersuchte Innenwand wird als raumseitiges speicherwirksames Bauteil betrachtet. Der Begriff Innenwand bezieht sich im Folgenden somit auf die betrachtete Speichermasse und nicht auf eine Geschossdecke oder ein anderes raumseitiges Speicherbauteil. Der Wandaufbau besteht aus einem Speicherkern und einem raumseitig angeordneten regelbaren Element. Dieses regelbare Element verändert den thermischen Widerstand zwischen Raum und Speichermasse. Im niedrigleitenden Zustand ist der Speicherkern weitgehend vom Raum entkoppelt. Im hochleitenden Zustand wird die thermische Kopplung erhöht, sodass Wärme zwischen Raum und Speicherkern übertragen werden kann.

RV1 stellt die Ausgangsregelung dar: In dieser Variante wird die Innenwand während der Belegung nur dann an den Raum gekoppelt, wenn die Temperaturverhältnisse zwischen Speicherkern, raumseitiger Innenwandoberfläche und Raumluft einen für den jeweiligen Betriebsfall nutzbaren Wärmestrom ermöglichen. Zur eindeutigen Bewertung der thermischen Wirkrichtung wird eine Mindesttemperaturdifferenz von 0,2 K angesetzt. Im Heizfall müssen sowohl der Speicherkern als auch die raumseitige Innenwandoberfläche unter Berücksichtigung der Mindesttemperaturdifferenz oberhalb der Raumlufttemperatur liegen. Im Kühlfall gelten die umgekehrten Bedingungen. RV1 vermeidet dadurch ein Entgegenwirken der Innenwand zum idealen

Heiz-/Kühlsystem. Gleichzeitig wird vorhandenes Speicherpotenzial erst dann genutzt, wenn es bereits an der raumseitigen Oberfläche wirksam ist.

RV2 erweitert RV1 um die Temperatur an der Grenzfläche zwischen regelbarem Element und Speicherkern. Dadurch wird nicht nur geprüft, ob die raumseitige Oberfläche bereits wirksam ist, sondern auch, ob hinter dem regelbaren Element bereits ein nutzbares thermisches Potenzial vorhanden ist. Für die aktive Nutzung müssen Speicherkern, Grenzfläche und raumseitige Oberfläche den für den Heiz- beziehungsweise Kühlfall erforderlichen Temperaturgradienten aufweisen. Zusätzlich kann eine vorbereitende Kopplung freigegeben werden, wenn Speicherkern und Grenzfläche bereits nutzbares Potenzial besitzen, die raumseitige Oberfläche jedoch nur innerhalb einer Toleranz von 0,2 K noch nicht vollständig wirksam ist.

RV3 basiert auf RV2 und ergänzt eine zeitliche Vorkonditionierung vor Beginn der Belegungszeit. Das regelbare Element kann bereits im Zeitraum von zwei Stunden vor Nutzungsbeginn leitfähiger geschaltet werden, wenn im Speicherkern und an der Grenzfläche ein nutzbares Temperaturniveau vorhanden ist. Dadurch steht das Speicherpotenzial früher an der raumseitigen Oberfläche zur Verfügung, sodass die Innenwand bereits zu Belegungsbeginn zur Verringerung der Heiz- bzw. Kühllast genutzt werden kann.

Die energetische Bewertung unterscheidet zwischen der über die regelbare Innenwand bereitgestellten Heiz- beziehungsweise Kühlenergie und dem verbleibenden Energiebedarf des idealen Heiz-/Kühlsystems. Die Innenwand kann während der Belegungszeit Wärme an den Raum abgeben oder Wärme aus dem Raum aufnehmen. Diese Energie reduziert den Anteil, der durch das ideale Heiz-/Kühlsystem gedeckt werden muss.

Tabelle 3: Untersuchungsfälle

Variante	Untersuchungsfall	Kurzbeschreibung	Bewertungsziel
OEB	Innenwand ohne externe Beladung	keine aktive Be- oder Entladung; nur variable Kopplung der Speichermasse an den Raum	Bewertung des passiven Einsparpotenzials durch veränderbare thermische Kopplung
MEB	Innenwand mit externer Beladung	Speicher wird außerhalb der Belegung be- oder entladen und während der Belegung bedarfsabhängig gekoppelt	Bewertung der Lastverschiebung und der Entlastung des idealen Heiz-/Kühlsystems
MEB 1.1	RV1	Kopplung nur bei nutzbarer raumseitiger Oberfläche	Ausgangsregelung
MEB 1.2	RV2	zusätzliche Prüfung der Grenzflächentemperatur (Temperatur zwischen zwei Wandschichten)	frühere Erkennung und Nutzung von Speicherpotenzial
MEB 1.3	RV3	Grenzflächenregelung mit Vorkonditionierung vor Belegungsbeginn	Frühzeitige Bereitstellung des thermischen Potenzials an der Raumseite

Zur Einordnung der untersuchten Varianten sind die wesentlichen Randbedingungen der regelbaren Innenwand in Anhang 1, Tabelle 9 zusammengefasst. Dabei wird zwischen dem Betrieb ohne externe Beladung (OEB) und dem Betrieb mit externer Beladung (MEB) unterschieden. Während im Fall ohne externe Beladung ausschließlich die passive thermische Kopplung der vorhandenen Speichermasse bewertet wird, steht im Fall mit externer Beladung die zeitliche Trennung von Speicherbeladung und Speichernutzung im Vordergrund.

Ergebnisse der regelbaren Innenwand ohne externe Beladung

Abbildung 6 zeigt den Einfluss der regelbaren Innenwand ohne externe Beladung auf die Aufteilung von Heiz- und Kühlenergiebedarf sowie auf den daraus resultierenden Heiz- und Kühlenergiebedarf. Die Auswertung unterscheidet zwischen ungeschalteten Vergleichszuständen (statisch) und einer saisonal geschalteten

Betriebsweise der Innenwand. Betrachtet werden ein konstanter gedämmter Innenwandzustand mit $\lambda_{\text{gedämmt}} = 0,032 \text{ W/(mK)}$ und ein konstanter ungedämmter bzw. hochleitender Innenwandzustand mit $\lambda_{\text{ungedämmt}} = 1.000 \text{ W/(mK)}$. Der ungedämmte Zustand dient als Referenz für eine thermisch dauerhaft an den Raum gekoppelte Innenwand. Zusätzlich wird die Außenwandqualität über den Wärmedurchgangskoeffizienten U_{AW} variiert. Der maximale U_{AW} ist dabei als Grenz- bzw. Sensitivitätsfall zu interpretieren und nicht als repräsentativer Standardfall einer üblichen massiven Außenwand.

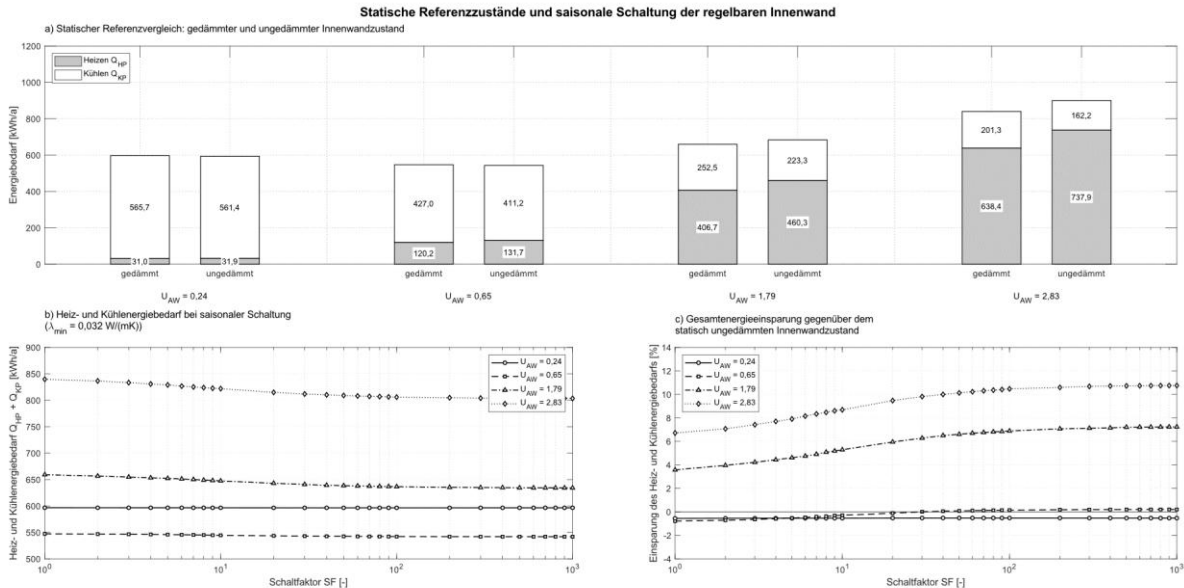


Abbildung 6: Statische Referenzzustände und saisonale Schaltung der regelbaren Innenwand ohne externe Beladung. Teilbild a) zeigt den statischen Vergleich zwischen einem über den gesamten Simulationszeitraum gedämmten Innenwandzustand $\lambda_{\text{gedämmt}}=0,032\text{W/(mK)}$ und einem ungedämmten Innenwandzustand $\lambda_{\text{ungedämmt}} = 1.000\text{W/(mK)}$ für unterschiedliche Außenwandqualitäten U_{AW} . Die Balken sind aus Heizenergiebedarf (Q_{HP}) und Kühlenergiebedarf (Q_{KP}) gestapelt. Teilbild b) zeigt den Heiz- und Kühlenergiebedarf der saisonal geschalteten Variante mit $\lambda_{\text{min}}=0,032\text{W/mK}$ in Abhängigkeit des Schaltfaktors. Teilbild c) stellt die relative Einsparung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs gegenüber dem statisch ungedämmten Innenwandzustand dar.

Teilbild a) zeigt die Aufteilung des Energiebedarfs in Heiz- und Kühlenergiebedarf für die ungeschalteten Innenwandzustände (statisch). Dabei wird deutlich, dass sich mit zunehmendem U_{AW} -Wert vor allem das Verhältnis zwischen Heiz- und Kühlenergiebedarf verändert. Während der Heizenergiebedarf mit steigendem U_{AW} zunimmt, sinkt der Kühlenergiebedarf. Bei $U_{\text{AW}} = 0,65 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ führt die Reduktion des Kühlenergiebedarfs in der betrachteten Raumkonfiguration dazu, dass der zusammengefasste Heiz- und Kühlenergiebedarf niedriger liegt als bei $U_{\text{AW}} = 0,24 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Der Vergleich zwischen gedämmtem und ungedämmtem Innenwandzustand verdeutlicht den Zielkonflikt zwischen Heiz- und Kühlfall. Im Heizfall ist die thermische Entkopplung der Speichermasse vorteilhaft, da während der Wiederaufheizung zu Beginn der Belegung weniger Wärme an die Speichermasse abgegeben wird. Im Kühlfall kann dagegen eine stärkere Kopplung vorteilhaft sein, da Wärme während der Belegung in die Speichermasse aufgenommen und in unbelegten Zeiten an den Raum abgegeben wird. Für die Bewertung ist daher die kombinierte Betrachtung von Heiz- und Kühlenergiebedarf maßgebend.

Teilbild b) zeigt den Heiz- und Kühlenergiebedarf der saisonal geschalteten Variante mit $\lambda_{\text{min}} = 0,032 \text{ W/(mK)}$ in Abhängigkeit des Schaltfaktors. Mit zunehmendem Schaltfaktor sinkt der zusammengefasste Heiz- und Kühlenergiebedarf bei allen betrachteten U_{AW} -Werten. Die Wirkung ist jedoch stark vom U_{AW} -Wert abhängig. Bei sehr gut gedämmten Außenwänden ist die Reduktion gering, während sie bei höherem U_{AW} -Wert

deutlicher ausfällt. Die saisonale Schaltung der Innenwand ist daher als Zusatzwirkung innerhalb eines jeweils konstanten Außenwandzustands zu bewerten.

Teilbild c) zeigt die relative Einsparung gegenüber dem dauerhaft ungedämmten Innenwandzustand. Bei niedrigen U_{AW} -Werten die Einsparung nahe null. Bei höheren U_{AW} -Werten steigt die relative Einsparung mit zunehmendem Schaltfaktor an.

Insgesamt zeigt die regelbare Innenwand ohne externe Beladung ein passives energetisches Potenzial. Dieses Potenzial hängt jedoch deutlich von der Außenwandqualität, vom Schaltfaktor und von der Aufteilung zwischen Heiz- und Kühlenergiebedarf ab. Die Außenwandqualität bestimmt weiterhin das absolute Bedarfsniveau, während die saisonale Schaltung der Innenwand eine zusätzliche Reduktion innerhalb des jeweiligen Außenwandzustands bewirkt.

Ergebnisse der regelbaren Innenwand mit externer Beladung

Die regelbare Innenwand mit externer Beladung wird als aktives Speichersystem untersucht, bei dem Speicherbeladung und Speichernutzung zeitlich voneinander getrennt sind. Außerhalb der Belegungszeit wird dem Speicherkern thermische Energie zugeführt beziehungsweise entzogen. Während der Belegungszeit wird die gespeicherte thermische Energie über das regelbare Element an den Raum gekoppelt, sofern die resultierende Wärmestromrichtung die Heiz- bzw. Kühllast reduziert.

Die Bewertung beschreibt daher nicht unmittelbar eine Energieeinsparung des Gesamtsystems, sondern zunächst eine Entlastung des idealen Heiz-/Kühlsystems während der Belegungszeit. Der verbleibende Heiz- bzw. Kühlenergiebedarf beschreibt die Wärmemenge, die nach Nutzung der aktiv beladenen Innenwand weiterhin durch den idealen Heizer bzw. Kühler bereitzustellen ist. Eine Reduktion dieser Größen zeigt somit, dass Heiz- oder Kühlenergie zeitlich auf die Speicherbeladung außerhalb der Belegungszeit verlagert wurde.

Als Bezugsfall dient die Referenzvariante R0 ohne aktive Speicherfunktion. Die Raumkonditionierung erfolgt in diesem Fall während der Belegungszeit ausschließlich über das ideale Heiz-/Kühlsystem.

Tabelle 4 stellt ausgewählte Ergebnisfälle der regelbaren Innenwand mit externer Beladung gegenüber. RV1, RV2 und RV3 beschreiben den jeweiligen Regelungsansatz, während B0 und V11 Parametervarianten innerhalb der Variantenmatrix kennzeichnen. B0 beschreibt die Basisvariante der jeweiligen Regelungsvariante. V11 wird ergänzend aufgeführt, da diese Variante innerhalb der untersuchten Variantenmatrix den niedrigsten verbleibenden Heiz- und Kühlenergiebedarf des idealen Heiz-/Kühlsystems erreicht. Die dargestellten Werte zeigen den verbleibenden Heiz- und Kühlenergiebedarf des idealen Heiz-/Kühlsystems nach Nutzung der aktiv beladenen Innenwand.

Tabelle 4: Vergleich der Regelvarianten der regelbaren Innenwand mit externer Beladung. Dargestellt ist die Änderung gegenüber der Referenzvariante R0 ohne aktive Speicherbeladung.

Fall	SF/Beladungsleistung	Änderung gegenüber R0
RV1-B0	1.000 / 500 W	+0,94 kWh/a
RV2-B0	1.000 / 500 W	-87,08 kWh/a (-14,6 %)
RV3-V11	1.000 / 1.000 W	-113,39 kWh/a (-19,0 %)

Zusammenfassung

Die entwickelte Simulationsumgebung ermöglicht die Abbildung regelbarer Bauteile über zeitlich veränderliche physikalische Eigenschaften. Dadurch können regelbare Außenwände und Innenwände mit variabler

Wärmeleitfähigkeit, thermischer Speichermasse und externer Regelungslogik im instationären Simulationsverlauf untersucht werden.

Für die regelbare Außenwand zeigt sich ein deutliches Potenzial zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs. Das Einsparpotenzial hängt wesentlich vom Schaltfaktor, vom Fensterflächenanteil, von der inneren Wärmeabgabe, von der zulässigen Mindestoberflächentemperatur und von der Speicherkapazität ab. Die maximal untersuchte Reduktion des Kühlenergiebedarfs beträgt rund 72 % gegenüber dem jeweiligen Referenzfall.

Die regelbare Innenwand ohne externe Beladung zeigt ein passives Einsparpotenzial durch die veränderbare thermische Kopplung der Speichermasse an den Raum. Im Kühlfall kann Wärme während der Belegung in die Speichermasse aufgenommen und teilweise in unbelegte Zeiten verschoben werden, in denen keine aktive Kühlung erfolgt. Im Heizfall liegt der Nutzen dagegen vor allem in der thermischen Entkopplung der Speichermasse, wodurch während der Wiederaufheizung zu Beginn der Belegung der Wärmestrom in Richtung Speichermasse reduziert wird. Die Ergebnisse zeigen, dass bei sehr gut gedämmten Außenwänden nur ein geringes zusätzliches Einsparpotenzial durch die saisonal geschaltete Innenwand besteht. Mit zunehmendem U_{AW} -Wert steigt die Wirkung der regelbaren Innenwand innerhalb der untersuchten Varianten. Die maximal ausgewiesene relative Reduktion des Heiz- und Kühlenergiebedarfs beträgt rund 11 % und tritt bei der Außenwandvariante mit dem höchsten betrachteten U_{AW} -Wert auf.

Mit externer Beladung wird die regelbare Innenwand als aktives Speichersystem genutzt. Thermische Energie wird außerhalb der Belegungszeit im Speicherkern bereitgestellt und während der Belegung zur Entlastung des idealen Heiz-/Kühlsystems eingesetzt. Die Reduktion des verbleibenden Heiz- und Kühlenergiebedarfs beschreibt in diesem Fall primär eine Lastverschiebung und keine vollständige Energieeinsparung des Gesamtsystems. Die Regelstrategie ist dabei entscheidend für die Nutzbarkeit des bereitgestellten Speicherpotenzials. Die hierbei maximale Verringerung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs (ideales System) beträgt rund 19 % gegenüber der Referenzvariante ohne aktive Speicherfunktion.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass regelbare Bauteile sowohl zur Reduktion des Heiz- und Kühlenergiebedarfs als auch zur zeitlichen Verschiebung von Heiz- und Kühllasten beitragen können. Voraussetzung ist, dass Schaltfaktor, Speicherkapazität, thermische Kopplung und Regelstrategie auf die Nutzungs- und Klimarandbedingungen abgestimmt sind.

1.3 Arbeitspaket 3: Entwicklung eines Metallhydrid-Reaktors zur definierten Einstellung des Wasserstoffdrucks im Vakuumdämmpaneel (FE 2 (DLR))

Ziel des Arbeitspakets war die Entwicklung einer Reaktoreinheit auf Basis thermochemischer Metallhydridreaktionen zur gezielten und reversiblen Einstellung des Gasdrucks in der Paneelkomponente. Die Arbeiten umfassten die Materialauswahl und -charakterisierung, die Konzeption und Konstruktion des Reaktors, den experimentellen Funktionsnachweis sowie die Untersuchung von Betriebsverhalten und Energiebedarf.

Materialauswahl und Charakterisierung

Auf Basis der in AP 1 festgelegten Spezifikationen wurde mittels literaturbasierter Recherche eine Auswahl verfügbarer Metallhydridmaterialien zur Anwendung im Vakuum durchgeführt. Wesentliche Auswahlkriterien waren die Druck- und Temperaturgleichgewichte der Materialien, um die nötigen Gasdrücke bei geringem Energiebedarf zur Umtemperierung präzise einstellen zu können, sowie die Zyklenstabilität und Robustheit gegenüber Fremdgaseinflüssen durch potentielle Leckagen.

Als besonders vielversprechend wurde die Legierung $\text{LaNi}_{4.1}\text{Al}_{0.52}\text{Mn}_{0.38}$ aus der Gruppe des Typs AB_5 identifiziert. Für dieses Material wurde ermittelt, dass der Auslegungsdruckbereich von 1 – 1000 mbar durch Temperierung im Bereich von ca. –5 bis 130°C erzielt werden kann, wie in Abbildung 7 dargestellt. Dieser Temperaturbereich ist technisch gut umsetzbar, so dass die LaNi -Legierung als Reaktionsmaterial ausgewählt wurde. Ergänzend wurde ZrNi (Typ AB) untersucht, das insbesondere sehr tiefe Vakuumdrücke bei Raumtemperatur generieren kann und damit einem kaskadierten Reaktionsbetrieb [11] zur beschleunigten und energieeffizienten Gasdruckeinstellung hätte dienen können. ZrNi zeigte jedoch eine ungünstig langsame Reaktionskinetik sowie kein ausreichend zyklenstables Verhalten und wurde daher für die angedachte Nutzung nicht weiterverfolgt.

Da konventionelle Messmethoden zur Charakterisierung des Reaktionsverhaltens bei den hier nötigen Untersuchungen im Vakuum an ihre Auflösungsgrenzen stoßen und eine adäquate Bestimmung des Reaktionsverhaltens kaum möglich ist, wurde eine modifizierte Messmethodik entwickelt, um die sorgfältige Charakterisierung der Gleichgewichtslagen von Metallhydriden im Unterdruck zu gewährleisten. Ein entsprechender Teststand wurde bei FE 2 unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen an Vakuum- und Wasserstoffeignung (insbesondere Dichtigkeit und präzise Instrumentierung) aufgebaut. Die Ergebnisse der Materialcharakterisierungen wurden in zwei Publikationen veröffentlicht [9, 10].

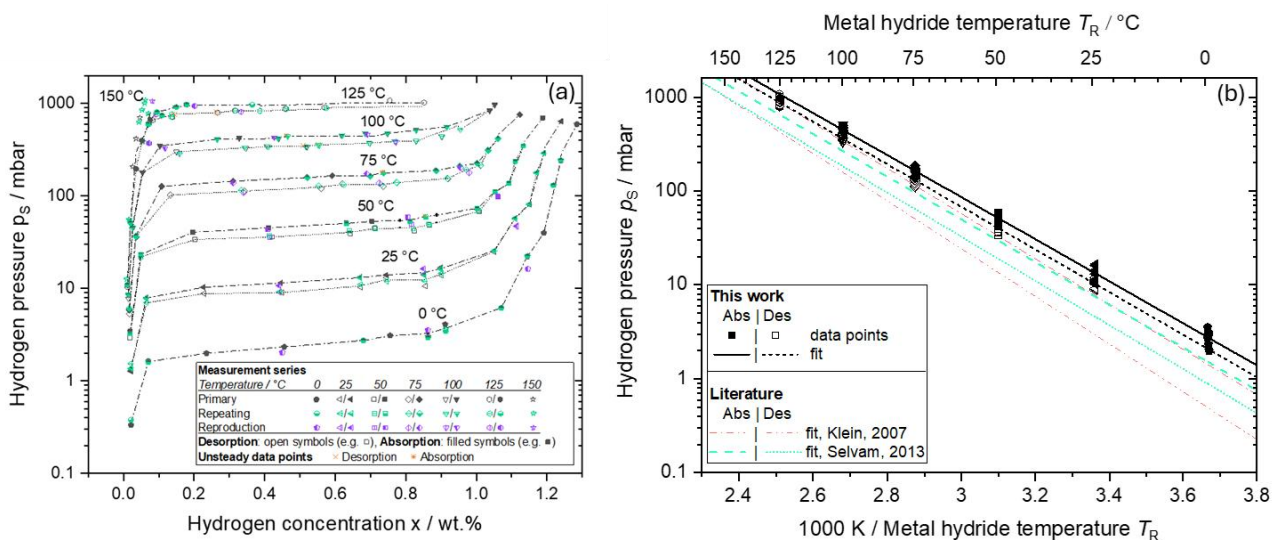


Abbildung 7: Experimentell bestimmte Gleichgewichtsdaten des verwendeten Metallhydridmaterials $\text{LaNi}_{4.1}\text{Al}_{0.52}\text{Mn}_{0.38}$ [9]. (a) Konzentrations-Druck-Temperaturkurven, (b) resultierende Van't Hoff Gleichgewichtsgeraden mit Literatur-Vergleichsdaten.

Reaktorkonzeption und Fertigung

Basierend auf analytischen Auslegungsberechnungen wurden zunächst der Bauraum für das pulverförmige Reaktionsmaterial sowie notwendige Wärmeübertragungsstrukturen abgeschätzt und grundlegende geometrische sowie thermodynamische Randbedingungen definiert, ausgehend von den festgelegten Paneelvolumina, Arbeitsdrücken und Metallhydrid-Temperaturen. Ergänzend wurden simulative und experimentelle Parameterstudien zum Einsatz thermoelektrischer Module (Peltier-Elemente) durchgeführt, um die gezielte Temperierung und einen möglichst dynamischen und energieeffizienten Betrieb der Reaktoreinheit zu gewährleisten.

Auf dieser Grundlage wurden verschiedene Reaktorkonzepte erarbeitet, aufgebaut und getestet. Im Fokus stand ein Reaktordesign mit thermischer Entkopplung, dessen wesentliches Konstruktionsmerkmal darin

besteht, dass ausschließlich die Metallhydridmasse über Peltier-Elemente bedarfsgerecht temperiert wird, während das Reaktorgehäuse thermisch weitgehend konstant bleibt. Dadurch lässt sich die Temperatur im Reaktionsmaterial hochdynamisch ändern, was die Variation des Gasdrucks beschleunigt und die Energieeffizienz steigert. Weitere Auslegungskriterien waren geringe thermische Masse, gute Konnektivität zum Panel sowie die Möglichkeit zur Unterbrechung des Gastroms mittels Ventils. Daneben wurde eine Leichtbauvariante ohne thermische Entkopplung entwickelt, die bei vereinfachtem Aufbau eine leichtere Skalierbarkeit bietet. Beide Reaktorvarianten sind in Abbildung 8 dargestellt.

Die Reaktoreinheiten wurden durch Kombination additiver und klassischer Fertigungsverfahren als Funktionsmuster aufgebaut, auf Dichtigkeit geprüft und mit dem zuvor charakterisierten Metallhydrid $\text{LaNi}_{4.1}\text{Al}_{0.52}\text{Mn}_{0.38}$ befüllt.

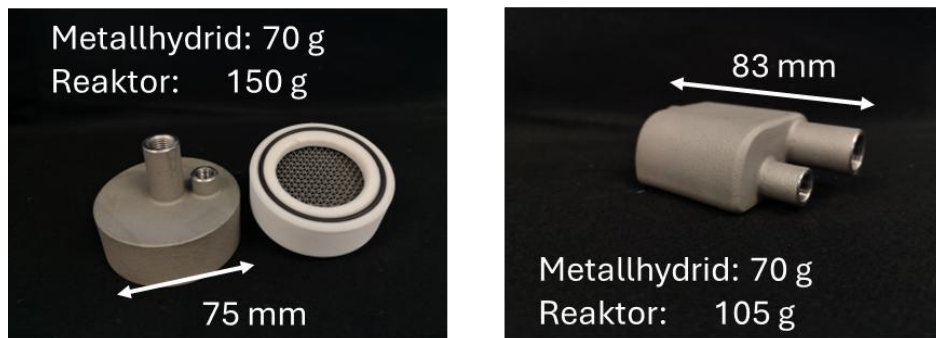


Abbildung 8: Darstellung von zwei der entwickelten Metallhydrid-Reaktorvarianten zur thermisch getriebenen Wasserstoffdruckregelung zur Kopplung mit Dämmpaneelen. Links: Reaktor mit thermischer Entkopplung zwischen aktivem und passivem Reaktorteil [13], Rechts: Leichtbauvariante des Reaktors ohne thermische Entkopplung [12]. Bildquelle: FE 2.

Experimenteller Funktionsnachweis

Der mit Metallhydrid befüllte Reaktor wurde in der entsprechenden Testinfrastruktur an FE 2 charakterisiert. Ausgehend von den Materialuntersuchungen sowie den analytischen und simulativen Vorstudien wurde das Verhalten des Reaktors mit den bisherigen Ergebnissen abgeglichen. Die zuvor für das reine Metallhydrid ermittelte Reaktionscharakteristik ließ sich im Reaktorbetrieb verifizieren, mit guter Übereinstimmung der Gleichgewichtslagen von Temperatur und Druck zwischen reiner Materialuntersuchung und temperaturgesteuerter Gasdruckeinstellung mittels Reaktors.

Die eingesetzten Peltier-Elemente hielten der Betriebsüberprüfung stand. Es konnten Temperaturen von -10 bis 150 °C eingestellt und durch Umpolung der Spannung das Reaktionsmaterial sowohl geheizt als auch gekühlt werden. Der gesamte Zieldruckbereich von 1 – 1000 mbar wurde erfolgreich abgedeckt. Die korrekte Funktion der thermischen Entkopplung ließ sich durch thermische Messungen an Reaktionspart und Gehäuse nachweisen.

Eine Gasdruckerhöhung von 5 auf 970 mbar wurde innerhalb von 8 Minuten erzielt. Der umgekehrte Prozess der Druckabsenkung benötigte mit ca. 30 Minuten deutlich länger, da hier mehrere Faktoren zusammenwirken: Die Absorption ist exotherm und erfordert eine aktive Kühlung des Reaktionsmaterials, die über Peltier-Elemente grundsätzlich weniger leistungsfähig ist als die Beheizung. Zudem stellt der Stofftransport von Wasserstoff im Vakuum eine Limitation dar, da mit sinkendem Druck die treibende Druckdifferenz für den Gastransport zum Reaktionsmaterial abnimmt. Insgesamt lassen sich die Betriebsuntersuchungen als erfolgreicher Funktionsnachweis der thermochemischen Gasdruckeinstellung zusammenfassen. Die Zeitverläufe des

Reaktorverhalten für Metallhydridtemperatur, Reaktorgehäusetemperatur sowie Gasdruck sind in Abbildung 9 gezeigt.

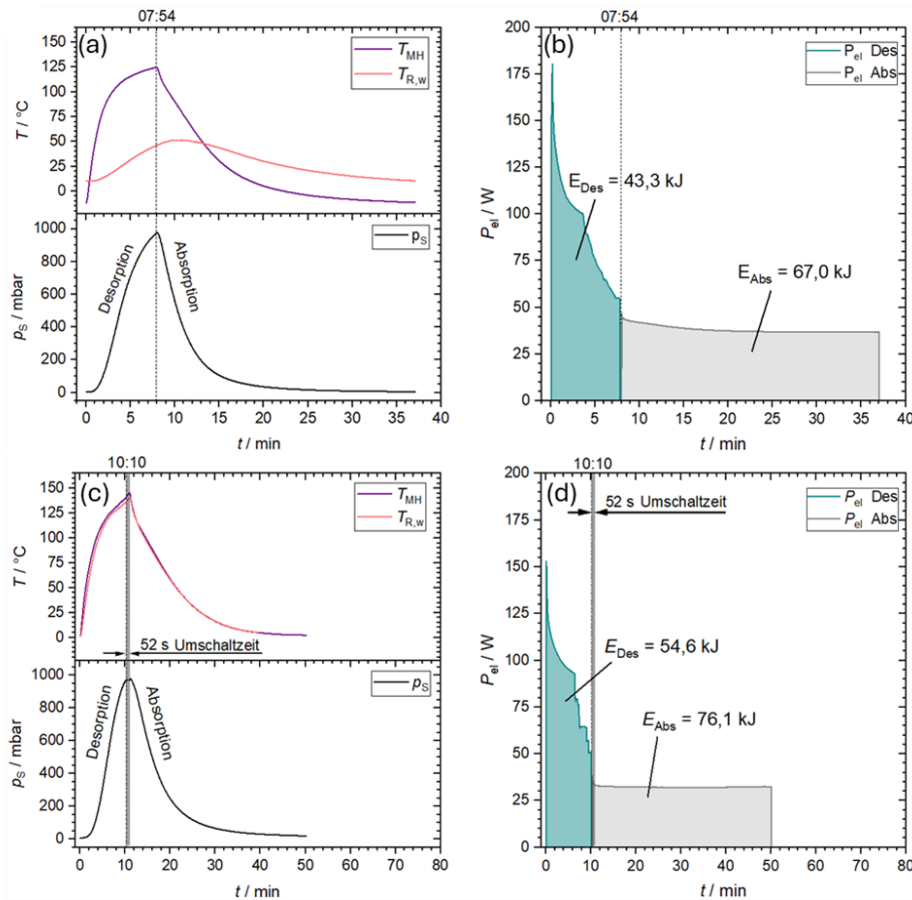


Abbildung 9: Betriebsverhalten der thermochemischen Steuerung des Gasdrucks (p_s) in den Reaktorvarianten (a) thermische Entkopplung von aktivem Metallhydrid (T_{MH}) [13] und passivem Reaktorgehäuse ($T_{R,w}$) und (c) Leichtbaureaktor. Erforderlicher Bedarf an elektrischer Leistung (P) und resultierender kumulierter Energie (E) für die Reaktionshalbzzyklen Desorption (Des) und Absorption (Abs) für den thermischen entkoppelten (b) und den Leichtbau-Reaktor (d). Bildquelle FE 2.

Betriebsverhalten und Energiebedarf

Neben der Reaktionsdynamik spielt das thermische Verhalten des Reaktors bezüglich des Regelungszugriffs eine zentrale Rolle bei der kontrollierten Gasdruckeinstellung. Die thermische Entkopplung der Reaktionsseite vom Reaktorgehäuse führt zur Verringerung der aufzubringenden Wärmemenge für den Reaktorbetrieb sowie zu reduzierten Wärmeverlusten an die Umgebung. Für den vollen Betriebsbereich wurde ein Energiebedarf von 43,3 kJ für die druckerhöhende Desorption und 67,0 kJ für die drucksenkende Absorption ermittelt, wie in Abbildung 9 darstellt. In einer Parameterstudie zu Dynamik und Energiebedarf wurden optimale Werte der elektrischen Spannung für den Reaktorbetrieb ermittelt und der Betrieb entsprechend optimiert. Daraus ließ sich zudem eine Betriebsstrategie zur Spannungssteuerung ableiten. Eine ausgearbeitete Regelstrategie wurde dabei nicht umgesetzt; die Steuerung erfolgte manuell ohne automatisierte Regelung.

Zur weiteren Optimierung des Energiebedarfs kann eine geeignete Betriebsstrategie beitragen, etwa durch die Nutzung passiver Abkühlphasen. Weiterführende Untersuchungen zum Betriebsverhalten im gekoppelten System mit der Paneelkomponente wurden im Rahmen von AP 5 durchgeführt.

1.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung eines textilen Vakuumdämmpaneels mit definierten Poreneigenschaften (FE 3)

Das AP 4 ist in drei Arbeitsbereiche unterteilt: Material, Struktur und Paneel. Der Arbeitsbereich Material umfasste den Aufbau und die Inbetriebnahme einer Vakuumkammer mit Messsoftware. In einem Prüfprozess wurde die Festigkeit von Garnen unter Vakuumbedingungen untersucht. Im Arbeitsbereich Struktur erfolgte die Entwicklung eines textilen Füllkernes auf der Basis von Abstandsgestricken. Im Arbeitsbereich Paneel wurden Testpaneele hergestellt und mit verschiedenen Folientypen, Anschlusssystemen und Füge Technologien auf Dichtheit getestet.

Arbeitsbereich Material

Zunächst wurden Fasermaterialien hinsichtlich ihrer Vakuum-Beständigkeit qualifiziert. Es wurde dazu ein Prüfprozess entwickelt, mit dem die Ausgasung von textilen Materialien anhand der Druckerhöhung in Vakuumsystemen untersucht werden kann. Polyester (Polyethylenterephthalat) und Glas zeigen unterschiedliche Ausgasungsverhalten, die mit ihrer Gefügestruktur als Polymer und kristalline Struktur erklärt werden können. Die Auslagerung im Vakuum hat keine negative Auswirkung auf die Festigkeit von Polyester, sondern erhöht die Festigkeitswerte Höchstzugkraft und Dehnung bei multifilen und monofilen Garnen signifikant um ca. 20 %.

Weiterhin wurde die Auswirkung der Auslagerung im Wasserstoff auf die Festigkeit ermittelt. Die geplanten Wasserstoff-Expositionsversuche konnten aufgrund regulatorischer und sicherheitstechnischer Anforderungen nicht durchgeführt werden. Obwohl die angestrebten Versuchsbedingungen (0,01–1 bar, bis 80 °C) technisch machbar und zeitlich realisierbar sind, erfordern Arbeiten mit Wasserstoff in gasförmiger Form – auch unter Niedrigdruckbedingungen – spezialisierte Laborinfrastruktur, entsprechende Genehmigungen und Sicherheitszertifizierungen konnten bei FE 3 im Rahmen des Projektes nicht realisiert werden.

Statt der experimentellen Durchführung wurde daher ein umfassendes Literatur-Review erstellt, das die verfügbaren Forschungsergebnisse zu Wasserstoff-Polymer-Interaktionen systematisiert. Dies ermöglichte eine evidenzbasierte Extrapolation auf die geplanten Randbedingungen und eine valide Prognose der zu erwartenden mechanischen Degradationseffekte. Eine Wasserstoff-Exposition von PET (72 h bei 1 bar, 27 °C) zeigt in der amorphen Phase Strukturdegradation, was insgesamt zu reduzierter Zugfestigkeit von etwa 20 % führt; weiterhin zu einem erhöhtem Diffusionskoeffizient (Faktor 2,5) und dem Übergang von duktilem zu sprödem Bruchverhalten [2]. Wasserstoff-Sorption in Kunststoffen geschieht vor allem in amorphen Bereichen, ohne die kristalline Phase zu beeinflussen. [14] Hochkristallines PET-Fasermaterial, wie im textilen Stützkern verwendet, interagiert entsprechend weniger mit Wasserstoff. Unter den Bedingungen im Paneel (0,01–1 bar) ist zu erwarten, dass diese Effekte durch die niedrigere Wasserstoff-Konzentration zusätzlich weniger ausgeprägt sind. Signifikante Festigkeitsverluste sind daher nicht zu erwarten.

Arbeitsbereich Struktur

Porosität, Wärmeleitfähigkeit und Kompressionsverhalten stellend die kritischen Eigenschaften von Textilien für den Einsatz als Füllkern in regelbaren Vakuumdämmelementen dar. Die Kompression ist die Dickenänderung unter der aus dem Vakuum im Paneel resultierenden Flächenpressung auf den Füllkern. Um dieses Kompressionsverhalten zu quantifizieren, wurde eine Druckluftpresse modifiziert, sodass eine dem Vakuum entsprechende Flächenpressung von 1 bar = 10 N/cm² statisch simuliert werden kann. Grundlage für die Entwicklung von textilen Strukturen ist die Analyse und Verifizierung von grundlegenden Aufbaustrukturen

wie Geweben, Gestriken, Vliesen (Spinn-/Nadelvlies) und Abstandsgestriken. Diese wurden unter Einbeziehung des PA beschafft und untersucht.

Abbildung 10 zeigt Mikroskopaufnahmen der Materialien und die charakteristischen Eigenschaften. Bei allen textilen Füllmaterialien wurde eine signifikante Dickenänderung der Kernstruktur bei der Beaufschlagung von 10 N/cm^2 beobachtet. Die Wärmeleitfähigkeiten der untersuchten Textilien liegen im Bereich gängiger Dämmmaterialien. Vliese zeigen ein gutes Kompressionsverhalten, jedoch ist die Wärmeleitfähigkeit hoch.

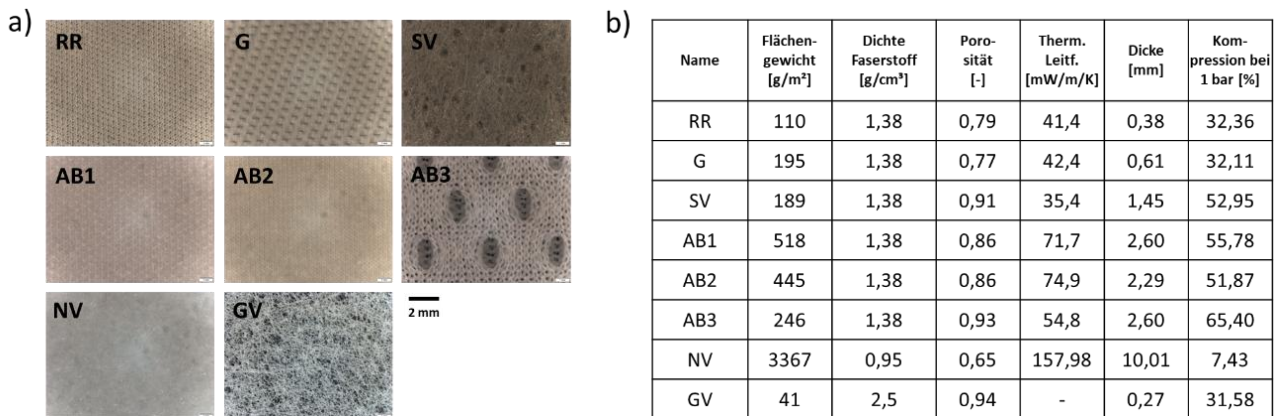


Abbildung 10: Textile Materialien für den textilen Füllkern. a) Mikroskopaufnahmen b) Eigenschaften.

Bei Standard-Abstandsstrukturen sind die Wärmeleitfähigkeiten in technologisch geeigneten Bereichen, jedoch sind die verfügbaren Strukturen nicht ausreichend kompressionsstabil. Weiterhin wurde bei der Vermessung der Materialien in Testpaneelen (vakuiert) festgestellt, dass die Wärmeleitung in der komprimierten textilen Struktur die Effekte der druckabhängigen Wärmeleitfähigkeit in porösen Strukturen (Knudsen-Effekt) dominiert, sodass durch die Dickenänderung und erhöhte Kompression im evakuierten Zustand höhere Wärmeleitfähigkeiten gemessen wurden. Die Kompressionscharakteristik der textilen Kernmaterialien wurde daher als entscheidender Parameter für die erzielbaren Schaltfaktoren identifiziert. Da keine Abstandsstrukturen mit hohen Porositäten und den notwendigen Steifigkeiten beschafft werden konnten, wurde die Entwicklung von drucksteifen Abstandsgestriken durch FE 3 vorgenommen.

Durch Anpassungen von Garn und Strickparametern wurden auf der Double-Jersey-Rundstrickmaschine (Mayer & Cie OJVA 1.6 EE) 18 verschiedene Abstands-Gestricke parametrisiert und hergestellt. Dazu wurden die Garne für der Ober- und Unterseite und der Durchmesser des als Polfaden verwendeten Monofils variiert; weiterhin der Abstand von Zylinder und Rippscheibe zur Einstellung der Dicke der Struktur. Abbildung 11 zeigt die Kompressionseigenschaften der entwickelten Strukturen a) mit texturiertem, nicht schrumpffähigen Garn b) mit glattem Garn mit 30 % Restschrumpf jeweils in Ober- und Unterseite. Niedrige Kompressionswerte um etwa 10 % wurden vor allem durch die Abstandsgestricke mit niedrigem Rippscheibenabstand unter Verwendung der Schrumpfgarne realisiert. Abbildung 11 c) zeigt den Einfluss des Rippscheibenabstandes auf die Dicke der Abstandsgestricke anhand von Mikroskopaufnahmen des Querschnittes.

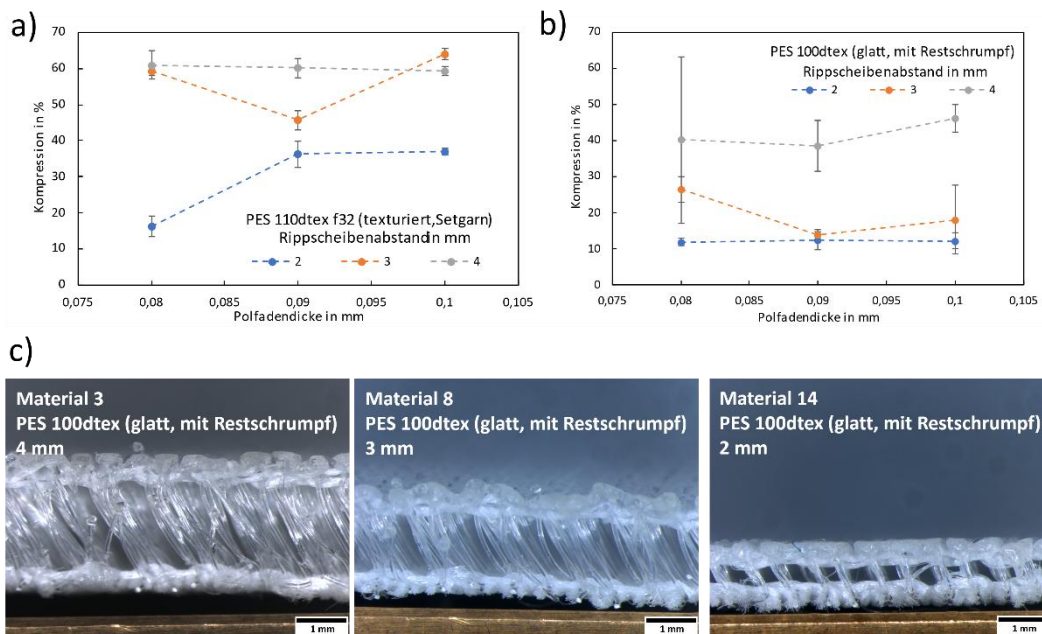


Abbildung 11: Kompressionsverhalten von Abstandsgestriken aus texturierten Set-Garnen und b) glatten Garnen mit Restschumpf c) Mikroskopaufnahmen der Abstandsgestricke aus Garnen mit Restschumpf.

Die Bestimmung des Kompressionsverhaltens erfolgte mit der umgebauten Presse zunächst statisch. Die Dauerfestigkeit der Strukturen wurde durch eine servo-hydraulische Zugprüfmaschine (Zwick-Röll Retroline) ermittelt. Es wurde ein trapezförmiges Kraftprofil zwischen 250 N und 2.500 N aufgeprägt, was in Kombination mit der verwendeten Stempelfläche von 250 cm² einem Zyklus zwischen 0 mbar und 900 mbar Paneelinnendruck abbildet. Es wurden 1.500 Druckzyklen gefahren.

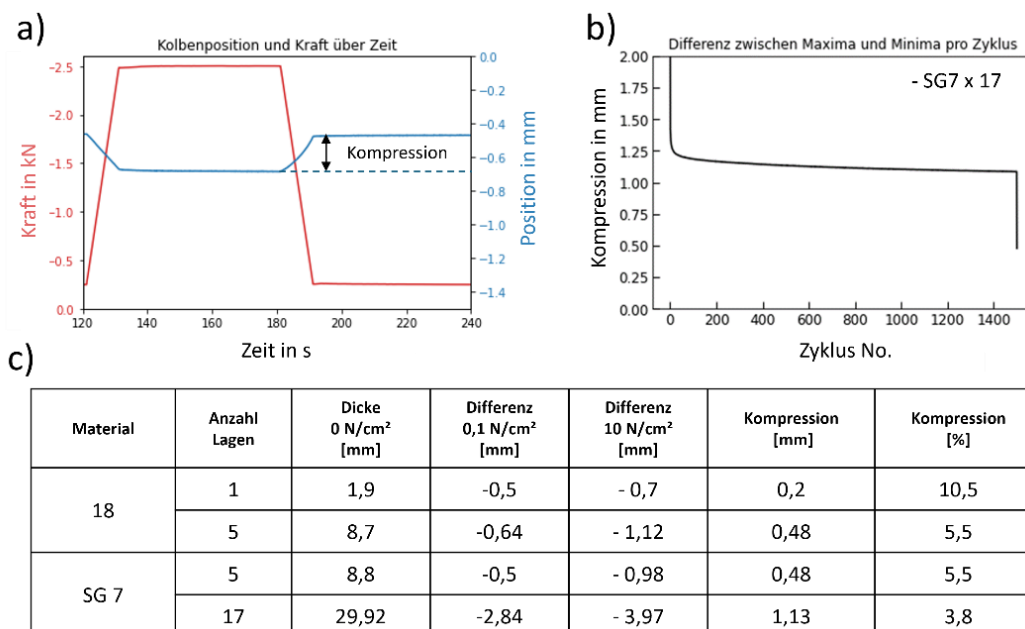
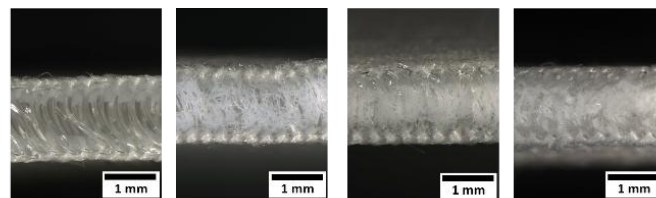


Abbildung 12: a) Druckwechselzyklus zur Untersuchung der Druckwechselfestigkeit der Füllkernstrukturen b) Kompression des gefüllten Abstandsgestrickes SG7 bei 1500 Wechselbelastungen c) Berechnung der relativen Kompression für ungefüllte (18) und gefüllte (SG 7) Abstandsstrukturen.

Es zeigt sich, dass die Kompression der Abstandsgestricke nicht durch die Integration der Garne im Polfadenraum beeinflusst wird. Die relative Kompression sinkt mit der Anzahl der Lagen, bei 17 verwendeten Lagen auf 3,8 %.

Nachdem die Kompressionseigenschaften der Abstandsgestricke eingestellt werden konnten, wurden die Poreneigenschaften optimiert. Die Porengröße in Filamentgarne wird durch die Porosität und den Faserdurchmesser eingestellt. [15] Durch die Wahl der Feinheit des Füllfadens kann die Porengröße im Polfadenraum von Abstandsgestricke angepasst werden. Die Kombination aus niedrigem Rippscheibenabstand (2 mm) und dünnem Polfaden (80 μm) wurde als Struktur mit minimaler Kompression und als Ausgangspunkt der Entwicklung des optimalen Porendurchmessers herangezogen. Durch Schussfadenführer wurden an der Double-Jersey-Rundstrickmaschine Garne verschiedener Filamentdurchmesser integriert. Abbildung 13 zeigt die Querschnitte einiger Abstandstrukturen. Zur Einstellung des Porendurchmessers im Polfadenraum wurde die Garnfeinheit und die Anzahl der Polfäden variiert.

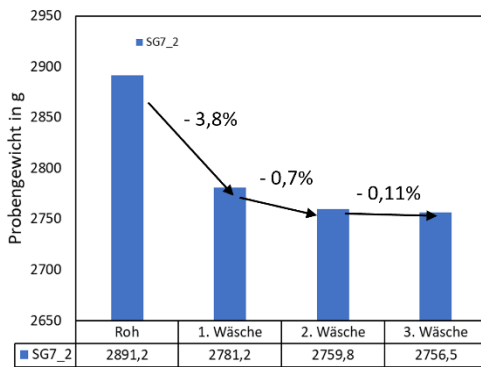


Material		18	SG6	SG3	SG7
Garn Oberseite		PES 100 dtex			
Polfaden		Monofil PES 0,08			
Garn Unterseite		PES 100 dtex			
Füllgarn	m_Y [dtex]	Ohne Füllgarn	167	167	167
	n_F		32	144	256
	d_F [μm]		22	10	7
Dicke Abstandsgestrick [mm]		1,55	1,75	1,7	2,00
Porosität		0,83	0,75	0,76	0,76
Wärmeleitfähigkeit [mW/m/K] (Einplattengerät DITF)		66	45	51	-
Mittlerer Porendurchmesser Polfadenraum		> 500 μm	82	40	29

Abbildung 13: Abstandsgestricke mit unterschiedlicher Porengröße im Polfadenraum.

Die Strukturen haben ähnliche Wärmeleitfähigkeiten wie die ungefüllten Abstandsgestricke, sind aber unwesentlich dicker und weniger porös. Die mittleren Modellporendurchmesser der Strukturen liegen im Bereich zwischen 29 und 82 μm .

Bei ersten Evakuierungsversuchen stellte sich die Ausgasung der Paneelkerne durch die Wasserbeladung des Fasermaterials und die Prozessschmierstoffe als kritisch heraus. Da Wasser und flüchtige Prozesshilfsmittel den Reaktor zerstören können, wurden die Füllkernmaterialien vor der Paneelfertigung gewaschen und dann unter Vakuum ausgeheizt. Durch die Verwendung eines speziellen Waschmittels für synthetische Faserstoffe (Perlavin PAM, Dr. Petry, Reutlingen) und eines darauf abgestimmten Entschäumers (Perifoam, Dr. Petry, Reutlingen) konnte die Abstandsgestricke für den Einsatz im Vakuum vorbereitet werden. Der Waschprozess wurde in Abstimmung mit Dr. Petry entwickelt. Abbildung 14 zeigt den Gewichtsverlust einer Materialprobe nach aufeinanderfolgenden Waschgängen.



No.	Zeitpunkt	Gewichtsverlust
1	Rohgestrick	0,00%
2	Pflegeleicht intensiv 60°C (2%/60g Kieralon 2,5%75g Soda), Pflegeleicht intensiv 60°C ohne Waschm., Lufttrocknen	3,80%
3	Pflegeleicht intensiv 60°C (2%/60g Kieralon 2,5%75g Soda) 2x Pflegeleicht intensiv 60°C ohne Waschm., 2x Spülen mit Aquadest, Schleudern 5min bei 600Umin, Lufttrocknen	4,54%
4	Buntwäsche 60°C, 60g Perlavin PAM, 60g Soda, 3g Perifoam, Pflegeleicht intensiv 60°C ohne Waschm., Schleudern 5min bei 600Umin, Lufttrocknen	4,66%

Abbildung 14: Gewichtsverlust des Gestrickes während den auf das Stricken folgenden Waschgängen.

Die Abstandsgestricke wurden an den DITF stückweise in Trommelwaschmaschinen gewaschen, was für die geringen Mengen von einigen Metern am wirtschaftlichsten ist. Durch die dichte Struktur der gefüllten Abstandsgestricke ist dieser Waschprozess nicht optimal und musste mehrmals durchgeführt werden. In kontinuierlichen industriellen Waschprozessen, die standardmäßig bei Abstandgestriken angewendet werden, ist eine vollständige Entfernung der Spul- und Maschinenöle aus der Struktur in einem Waschgang möglich.

Arbeitsbereich Paneel

Im Arbeitsbereich Paneel wurden vakuumbeständige Konfektions- und Abdichtungstechniken für die Testpaneele entwickelt. Das Paneel besteht grundlegend aus einem textilen Füllkern, welches in einer gasdichten Folie (meist metallisierte Kunststofffolien) versiegelt ist. Neben der Schweißnaht ist besonders die Dichtigkeit des Anschlusses für die Gasdruckregelung kritisch. Es wurde ein Versuchsaufbau zur Bestimmung der Vakuumdichtigkeit von Flanschanschlüssen, Schweißverfahren und -parametern aufgebaut und ein Prüfprozess definiert. Der Versuchsaufbau besteht aus einem Vakuumsystem, in dem mit Drucksensoren für verschiedene Druckbereiche Probepaneele zwischen 0,1 und 1.000 mbar vermessen werden können.

Die Hüllfolien von Vakuumisulationspaneelen (VIPs) bestehen aus mehrlagigen Hochbarriere-Laminaten aus Polymer-, Aluminium- und Siegelschichten, typischerweise z. B. PA/PET-Aluminium-PE-Verbundfolien, die das Eindringen von Luft und Wasserdampf verhindern. Die Gesamtdicke solcher Folien liegt meist im Bereich von etwa 50–400 µm, wobei die eigentliche Aluminiumbarriere typischerweise nur etwa 50 nm bis 10 µm dick ist [3]. Hinsichtlich Wasserstoffdichtigkeit der Folien wurden Berechnungsmodelle entwickelt, die eine Abschätzung der Permeabilität der Folien nach Stand der Technik in Abhängigkeit der Metallschichtdicke und des Wasserstoffpartialdruckes zulassen. Bei einem Paneel von einem Quadratmeter und 3 cm Dicke ergeben sich bei dauerhaftem Paneelinnendruck von 1 bar Wasserstoffmassenverluste von unter 1 % für Standardfolien (10 µm Aluminium), exklusive Verluste durch Fugestellen. Für den Laborbetrieb ist das ausreichend, für einen dauerhaften Einsatz in Gebäuden müssten die Barrieredicken entsprechend angepasst werden.

Als Hülle für den Dämmkern wird ein Folienlaminat in Taschenform, bestehend aus mehreren Kunststoff- und Aluminiumlagen, verwendet, das nach Befüllung an den offenen Kanten verschweißt wird. Zunächst wurden Probepaneele aus, im Vergleich zu marktüblichen Folien von Vakuum-Isulations-Paneeelen günstiger, Probenbeutel folie hergestellt. Erste Versuche zeigten, dass die Leckage der Schweißnähte um ein Vielfaches geringer als die über die Flanschverbindung ist. Für die Probepaneele mit einem Volumen von 300 ml wurden Dichtigkeiten von weniger als $1,25 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ gemessen. Dies ist für die Vermessung der Probepaneele und den Anschluss an den Reaktor ausreichend.

Als Ausgangspunkt wurden ein marktverfügbarer Vakuumanschluss, welcher üblicherweise für Harzinfiltration verwendet wird, und zwei eigene Konzepte auf ihr Dichtverhalten untersucht. Die eigenen Konstruktionen, die auf Polymerdichtungen verzichten und nur breite, metallische Dichtflächen besitzen, weisen dabei eine höhere Dichtheit auf. Der Anschluss wurde hinsichtlich des Bauraums und der Aufbauhöhe optimiert. Dabei kommen verfügbare Halbzeuge wie Pneumatikkomponenten (Festo), Hydraulikkomponenten (S-Lok) und wasserstoffkompatible Flüssigdichtmittel (Loctite 577) zum Einsatz, so dass der Anschluss kostengünstig hergestellt werden kann (siehe Abbildung 15). Als Fügeverfahren zum Verschließen der Paneele wurde das Verfahren des Heischweiens ausgewählt, da es zuverlässig dichte Nähte erzeugt – und auch bei Vakuumisoliationspaneelen eingesetzt wird. Es wurden Probepaneele in zwei Größen aufgebaut (15cm x 23cm und 27cm x 38 cm), an denen erste Dichtigkeitsmessungen durchgeführt wurden.

Der Arbeitsbereich beinhaltet die Konzeption und Fertigung eines Panels mit 35 x 35 cm Kantenlänge für den Aufbau des Funktionsmusters Labor. Als Füllkerne in den Paneelen des Funktionsmusters Labor wurden vom PA gestellte Materialien, aber auch von den DITF hergestellte Abstandsstrukturen verwendet. Dabei werden die Abstandsgestricke, die jeweils eine Dicke von 1,75 mm haben, gestapelt als Füllkern benutzt.

Abbildung 15 a) zeigt die Abmessungen des Funktionsmuster Labor. Zur Stabilisierung der Ecken und um einen sauberen Kantenanschluss im Verbund zu gewährleisten, wurden Kantenelemente aus XPS verwendet.

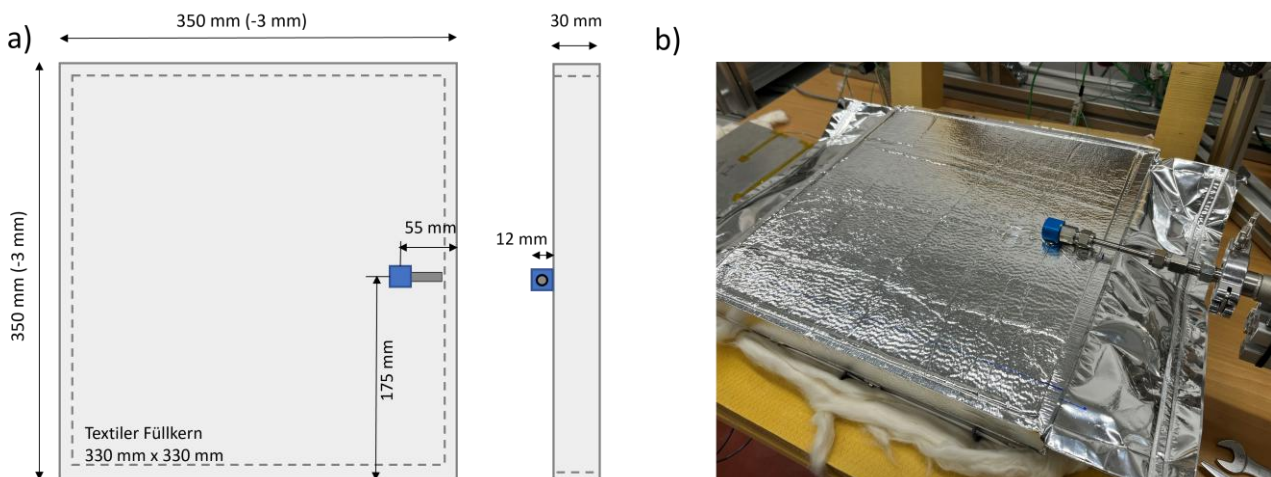


Abbildung 15 a): Skizze des Panels mit textilem Füllkern und Randelementen aus XPS b) Testpanel 35 x 35 cm auf dem adaptierten Einplattenmessgerät an den DITF

AP 4 wurde mit der Entwicklung druckfester, gefllter Abstandsgestricke und der erfolgreichen Herstellung von Paneelen für das Funktionsmuster abgeschlossen.

1.5 Arbeitspaket 5: Integration und Untersuchung der Interaktion und des Betriebsverhaltens von Panel und Reaktor in Kombination (FE 2 + 3)

Ziel des Arbeitspakets ist die Zusammenführung der in AP 3 und AP 4 entwickelten Einzelkomponenten - Metallhydrid-Reaktor und textilbasiertes Vakuumdmmpanel – zu einem gekoppelten Funktionsmuster im Labormastab (FM-Labor, 30x30 cm) sowie die experimentelle Untersuchung des Betriebsverhaltens des Gesamtsystems. Die Arbeiten umfassten die Konzeptionierung der Verbindungstechnik, den Aufbau geeigneter Messinfrastruktur, die Integration der Komponenten, die Charakterisierung des gekoppelten Systems, die iterative Optimierung sowie die Recherche und Integration von Trennmechanismen.

Verbindungstechnik

Für die stoffliche Kopplung von Paneel und Reaktor wurden verschiedene Verbindungstypen charakterisiert und getestet. Standard-Druckluftkomponenten erwiesen sich für Anwendungen mit Wasserstoff als nicht geeignet, da sie zur Abdichtung Kunststoff- und Gummidichtungen verwenden. Durch geeignete Flüssigdichtmittel (Loctite 577) konnten jedoch auch hier dichte, jedoch unlösbare Verbindungen hergestellt werden. Als zielführend stellten sich Swagelok- und Kleinflansch-(KF)-Anschlüsse heraus. Der Kleinflansch wurde für den Laborbetrieb eingesetzt, da er schnell und einfach zu lösen ist. Für die spätere Anwendung bietet S-lok Vorteile hinsichtlich höherer Dichtigkeit und kleinerem Bauraum. Im weiteren Projektverlauf wurde der Gasanschluss am Paneel auf Basis der experimentellen Erfahrungen aus den Kopplungsversuchen verbessert, wodurch eine kompaktere Bauweise, flexible Einbaurichtung, sowie eine erhöhte Dichtigkeit realisiert werden konnten. Abbildung 16 zeigt den Vakuumanschluss des Funktionsmusters Labor.

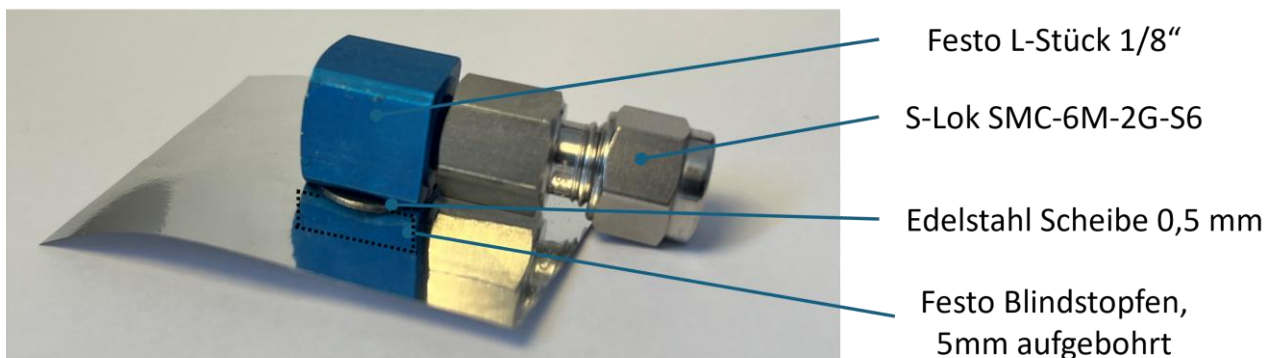


Abbildung 16: Vakuumanschluss am Paneel

Messinfrastruktur und Materialcharakterisierung

Zur Vermessung der textilen Kernmaterialien und der Paneeleigenschaften standen an den beteiligten Forschungseinrichtungen unterschiedliche Messaufbauten zur Verfügung: An FE 2 ein Messaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmpaneelen in Anlehnung an das Einplattenmessverfahren, kombinierbar mit Wasserstoffinfrastruktur und Reaktor. An FE 3 stand ein Aufbau mit beheizter Platte und Guarded Ring Leistungsmessung gegen die ungekühlte Kaltseite (Umgebung), bei dem mit Helium gemessen werden konnte. Zur Absicherung der Vergleichbarkeit wurde ein Ringversuch mit zwei Schaumstoffen (PE und PU) durchgeführt, der zeigte, dass das Einplattenverfahren systematisch etwas höhere Wärmeleitfähigkeiten aufweist, die Messwerte jedoch konsistent und die jeweiligen Aufbauten für ihren vorgesehenen Zweck geeignet sind.

Um die Schalfaktoren der Paneele unter definierten Bedingungen vermessen zu können, wurde das Einplattenmessgerät an FE 3 um eine Helium-Infrastruktur erweitert. Auf die Vermessung mit Wasserstoff wurde an FE 3 aus Sicherheitsgründen verzichtet; Helium ermöglicht die Bestimmung der Schalfaktoren und Schaltbereiche in guter Näherung zu den Stoffeigenschaften von Wasserstoff. Abbildung 17 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Messgerätes an FE 3 zur Vermessung der textilen Materialien für den Füllkern und des Funktionsmusters Labor.

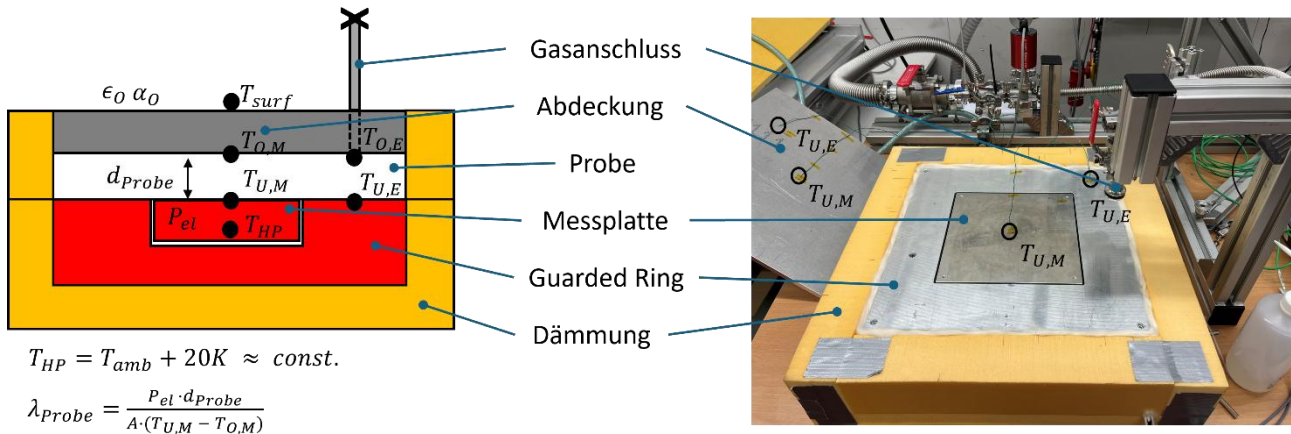


Abbildung 17: Einplattenmessgerät der DITF adaptiert an die Messung der Wärmeleitfähigkeit von regelbaren Vakuumdämmelementen.

Auf dem Gerät wurden bislang nur sehr dünne Proben (< 3 mm) mit niedrigen Wärmeleitfähigkeiten vermessen. Der Messbereich des Aufbaus wurde durch zusätzliche Temperatursensoren und durch zusätzliche Dämmung erweitert, sodass auch höhere Wärmeleitfähigkeiten (bis 0,3 W/(m K)) und dickere Proben (bis 30 mm) vermessen werden können. Durch diese Erweiterungen konnten das Funktionsmuster Labor bei Drücken zwischen 0,1 und 1000 mbar mit Helium vermessen werden.

Integration zum Funktionsmuster Labor

Die Kopplung der Einzelkomponenten stellte anfänglich eine Herausforderung dar: Erste Versuche zeigten zwar qualitative Schalteffekte bei der Flutung von Paneelen mit textilen Füllungen, jedoch führte das unzureichende Kompressionsverhalten der zunächst verfügbaren Kernmaterialien zu Problemen bei Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen. Weiterhin erforderte die Verunreinigung des Vakuums, welche für einen reproduzierbaren Betrieb des Reaktors kritisch ist, und durch Spul- und Maschinenöle verursacht wurde, intensive Reinigungsprozesse für den Füllkern.

Im weiteren Projektverlauf konnte ein geschlossener und gekoppelter Aufbau erfolgreich etabliert werden. Das Funktionsmuster Labor – bestehend aus einem 30 cm×30 cm Paneel mit textiler Kernstruktur, umgeben von einer geschlossenen Folienhülle und versehen mit einem vakuumdichten Gasanschluss, stofflich gekoppelt an die Metallhydrid-Einheit – wurde an FE2 aufgebaut (s. Abbildung 17), da dort die erforderliche Wasserstoff-Infrastruktur zur Verfügung steht (Meilenstein 2: FM-Labor).

Charakterisierung des gekoppelten und optimierten Systems

Abbildung 18 zeigt den an FE 2 aufgebauten Versuchsstand zur Untersuchung der effektiven gasdruckabhängigen Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wasserstoffdrucks (geschlossene Konfiguration) sowie des dynamischen, thermischen Betriebsverhaltens der gekoppelten adaptiven Dämmung im Zusammenspiel mit dem Metallhydrid-Reaktor (offene Konfiguration). Im Fall der geschlossenen Konfiguration zur Charakterisierung der druckabhängigen Wärmeleitfähigkeit wird der Paneel-Prüfkörper in eine nach außen gedämmte Einheit (graue Box) zwischen einer Heiz- und Kühlplatte und einer Messzelle zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eingebracht. Das Paneel wird von unten (Kühlung) und oben (Heizung) auf spezifische Temperaturen einstellt. Im zunächst evakuierten Paneel wird sukzessive der Wasserstoffdruck erhöht, wodurch sich der Wärmestrom und die Wärmeleitfähigkeit über das Paneel ändert, was wiederum mithilfe der Messzelle aufgezeichnet wird. Dabei wird jeweils der stationäre Zustand abgewartet, um die Wärmeleitfähigkeit beim

jeweiligen Druck mit entsprechender Genauigkeit zu bestimmen. In der offenen Konfiguration hingegen wird die graue Box geöffnet und der Aufbau modifiziert: Das Paneel wird von unten beheizt, es findet keine aktive Kühlung statt, sondern die Oberfläche des Paneels ist offen zu den Temperatur- und Strömungszuständen der Umgebung. Das thermische Verhalten wird mittels eines Wärmestromsensors detektiert. Sowohl in der geschlossenen als auch in der offenen Konfiguration kann der Reaktor mit dem Paneel gekoppelt werden. Es werden kontinuierlich reaktor- als auch paneelseitig die Gasdrücke sowie an mehreren Stellen Komponententemperaturen aufgezeichnet.

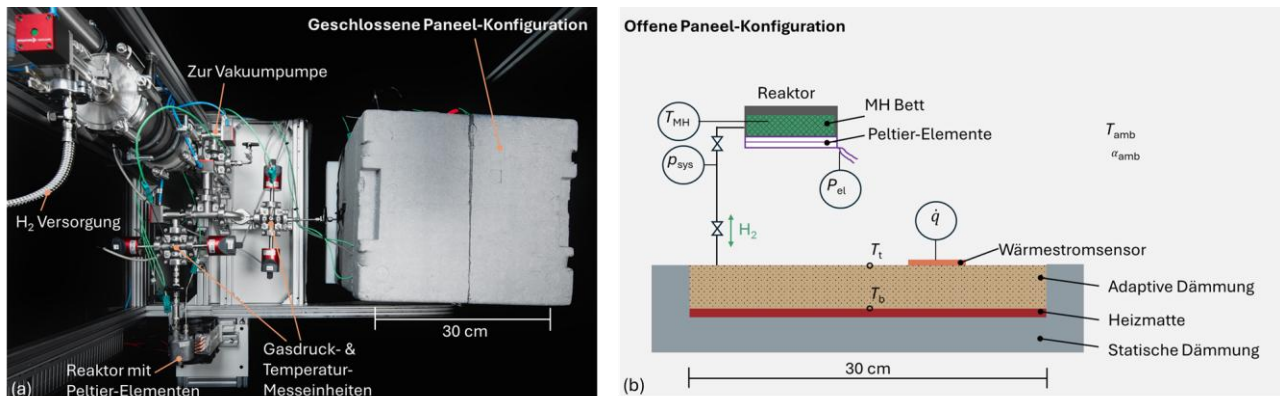


Abbildung 18: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung des gekoppelten Reaktor-Paneelsystems (adaptive Dämmung) [12]. (a) Abbildung des Laboraufbaus für 30 cm x 30 cm-Paneele in der geschlossenen Konfiguration zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung von Wasserstoff, (b) Schema der offenen Konfiguration zur Untersuchung des Betriebsverhaltens der gekoppelten adaptiven Dämmung. Bildquelle: FE 2.

Die Vermessung der effektiven druckabhängigen Wärmeleitfähigkeit unter Wasserstoff fand im Projektverlauf mit drei verschiedenen textilen Paneelen am Versuchsaufbau der FE 2 statt. Die Dämmpaneele selbst wurden in AP 4 entwickelt und iterativ – unter anderem in Konsequenz dieser Charakterisierungsmessungen – optimiert. So wurden ein Nadelvlies sowie zwei verschiedene Abstandsgestricke (siehe AP 4) im geschlossenen Versuchsaufbau vermessen. Die entsprechenden Verläufe der effektiven Wärmeleitfähigkeit sind in Abbildung 19 zu sehen. Für die untersuchten textilbasierten Dämmpaneele konnte eine sukzessive Steigerung des Schaltfaktors im Druckbereich von 0,01 bis 950 mbar erzielt werden: von 3,9 (Nadelvlies) über 4,6 (Abstandsgestrick 18) bis 6,3 (Abstandsgestrick SG7). Die Porengrößen liegen im angestrebten Bereich, erkennbar am charakteristischen sigmoidalen Verlauf der gasdruckabhängigen Wärmeleitfähigkeit mit dem Übergang zwischen 1 und 1000 mbar.

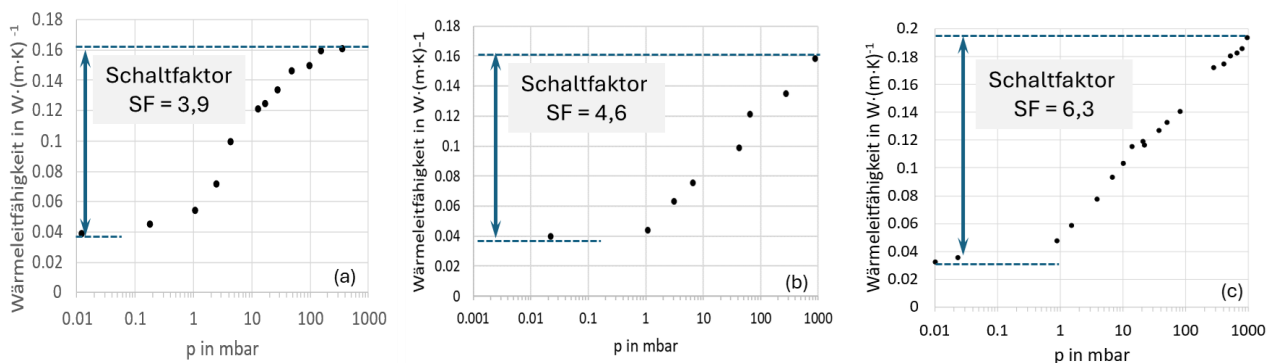


Abbildung 19: Wasserstoffgasdruckabhängige effektive Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmpaneele mit textilbasiertem Kern. (a) Nadelvlies, (b) Abstandsgestrick 18, (c) Abstandsgestrick SG7. Vermessen im Versuchsaufbau in der geschlossenen Konfiguration. Bildquelle FE 2.

Das dynamische Betriebsverhalten mit Reaktor wurde ebenso im offenen Aufbau untersucht. Die Reaktor-komponente selbst wurde im Projektverlauf iterativ optimiert, das Ergebnis ist im Abschnitt zu AP 3 aufge-zeigt. Für die Untersuchung des dynamischen Betriebs kommt der Leichtbau-Reaktor zum Einsatz. Abbildung 19 zeigt das zeitliche Betriebsverhalten des Dämmpaneels in Zusammenschaltung mit dem Reaktor. Es zeigt die Funktionalität des zugrundeliegenden Konzepts aus thermochemischer Gasdruckeinstellung in einer ei-genständigen thermochemischen Reaktionseinheit und einem gekoppelten textilbasierten Dämmpaneel zur gezielten Einstellung des Wärmedurchgangs.

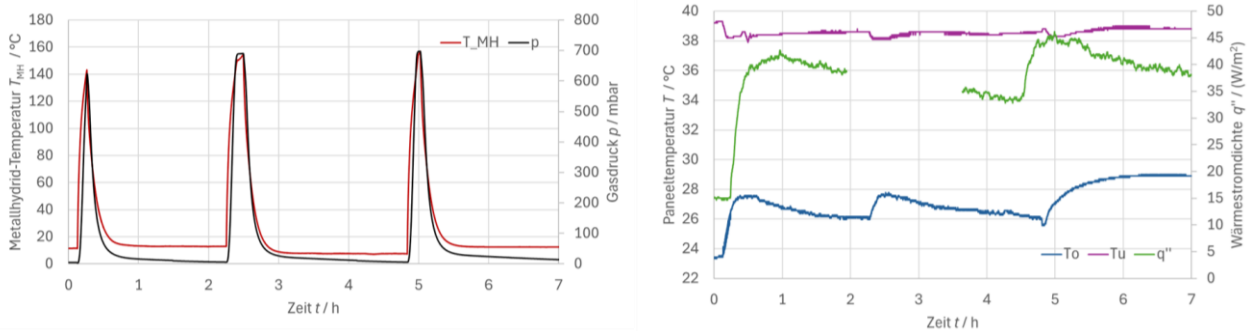


Abbildung 20: Zeitliche Betriebskurven des Metallhydrid-Reaktors (links), gekoppelt mit einem Dämmpaneel (rechts). Bildquelle FE 2.

Im gekoppelten Betrieb zeigt sich eine sehr gute Korrelation zwischen der Metallhydrid-Temperatur und dem resultierenden Gasdruck (Abbildung 20, links): Der Druckanstieg erfolgt innerhalb weniger Minuten, während die Druckabsenkung anfänglich zwar ebenfalls schnell verläuft, die Druckänderungen im niedrigen Druckbe-reich jedoch zunehmend träge erfolgen. Die thermische Antwort des Paneels (Abbildung 20, rechts) zeigt eine klare Korrelation zur Gasdruckänderung – die Paneeltemperatur an der Oberseite (T_o) reagiert deutlich auf den Druckanstieg. Auffällig ist jedoch ein ausgeprägtes träges thermisches Verhalten bei der Druckabsenkung: Das Paneel erreicht über lange Zeit nicht den thermischen Ausgangszustand, obwohl der Druck in der Verbindungsstrecke und am Reaktor bereits deutlich geringer ist. Dies deutet darauf hin, dass hohe Diffusi-onswiderstände im porösen Kern den Abtransport des Wasserstoffs aus dem Paneel verlangsamen und lokal noch erhöhter Gasdruck vorherrscht, während der Druck an der Messstelle bereits gefallen ist. Die Tempe-ratur der beheizten Paneelunterseite (T_u) variiert leicht, da die Heizleistung auf den veränderten Wärme-durchgang bei Gasdruckerhöhung nicht schnell genug nachregelt. Die Wärmestromdichte folgt erwartungs-gemäß dem Verlauf der Temperaturdifferenz über das Paneel – der Sensor ist im späteren Verlauf der Messung ausgefallen, das Verhalten der Temperaturdifferenz bildet die Dynamik jedoch ebenso ab. Inse-gesamt konnte der experimentelle Funktionsnachweis der regelbaren Vakuumwärmedämmung für das 30×30 cm Funktionsmuster in der Laborumgebung an FE 2 erfolgreich erbracht werden.

Ventilkomponente zwischen Reaktor und Paneel

Da das Reaktionssystem im Sinne der Energieeffizienz nur kurzzeitig betrieben werden soll, ist ein Trennme-chanismus zwischen Reaktor und Paneel erforderlich, der den eingestellten Gasdruck über längere Haltepha-sen zuverlässig aufrechterhält. Hierfür wurden verschiedene Ansätze recherchiert und mit Firmen des PA diskutiert, darunter klassische Ventile mit verschiedenen Antrieben, Kupplungssysteme sowie thermisch ge-steuerte Aktuatoren auf Basis von Formgedächtnislegierungen. Als einfach umsetzbare Lösung wurde ein kommerziell verfügbares Handventil eingesetzt, das die Kernanforderungen – Vakuumdichtigkeit, hohe Schaltzyklenzahl und geringe Systemkomplexität – erfüllt. Die Entwicklung einer anwendungsspezifischen

Ventilkomponente wird über das Projektende hinaus mit den konsultierten Firmen aus dem PA weiterverfolgt.

1.6 Arbeitspaket 6: Upscaling von Funktionsmuster Labor zu Funktionsmuster Gebäude und Integration in Bauteil-Demonstratoren (FE 1, FE 2, FE 3)

Ziel von AP 6 war die Skalierung und Integration des zuvor im Labormaßstab entwickelten Funktionsmusters zu einem anwendungsnahen Bauteildemonstrator. Hierfür wurden vier Paneele mit den Abmaßen 50x50x3 cm sowie ein passender Reaktor aufgebaut und zu einem Gesamtdemonstrator vereint, der der experimentellen Untersuchung in den Laboren der FE 1 diene. An diesem wurde die thermische Charakterisierung auf Komponentenebene durchgeführt. Die durchgeführte Untersuchung der Skalierungs- und Randeffekte wird im Abschnitt zu AP 7 behandelt.

Upscaling der Einzelkomponenten Reaktor und Paneel

Tabelle 5: Übersicht über die verschiedenen Paneeldemonstratoren.

	Funktionsmuster Labor	Funktionsmuster Gebäude	Bauteildemonstrator 1 m ²
Maße /cm	30 x 30 x 1	50 x 50 x 3	4x (50 x 50 x 3)
Paneelvolumen / l	0,9	2,7	30
Füllkern	6x SG7	17x SG7	17x SG7
Folie	Vakuumbbeutel Puma (PET metallisiert)	VIP Folie Hanika (PE metallisiert)	VIP Folie Hanika (PE metallisiert)
Anschluss	Festo L-Winkel 1/8" S-Lok SMC-6M-2G-S6	Festo Muffe 1/8" S-Lok SCF-6M-2R-S6	Festo Muffe 1/8" S-Lok SCF-6M-2R-S6

Das Funktionsmuster Labor hat Abmessungen von 30 x 30 x 1 cm und somit ein Volumen von ca. 1 l. Mit den Vorbereitungen zum Upscaling auf eine Größe von 30 x 30 x 3 cm (ca. 2,7 l Volumen) und schlussendlich 50 x 50 x 3 cm (ca. 7,5 l Volumen) wurde das Paneelvolumen sukzessive erhöht. Das Upscaling betrifft insbesondere die textile Struktur, aber auch die Folienhülle und die auszulegende Menge an Metallhydrid in der Reaktorkomponente. Diese muss entsprechend ebenfalls in ihren Dimensionen an das Scale-up angepasst werden. Ursprünglich war eine einzelne Paneelfläche von 100 x 100 cm für das FM-Gebäude angedacht. Aus Gründen der Fertigung und Handhabbarkeit wird diese Untersuchungsfläche in 4 Einzelelemente mit je 50 x 50 cm unterteilt. Mit dem Wechsel auf das Funktionsmuster Gebäude werden kommerziell verfügbare Verbundfolien aus dem Bereich der Vakuumisulationspaneele, bereitgestellt durch den PA, sowie die Verbindungstechnik zum Reaktor der letzten Entwicklungsstufe verwendet.

Für die Demonstration der regelbaren Wärmedämmung in den Laboren der FE 1 wird der Leichtbaureaktor gewählt, da er eine zuverlässige Skalierbarkeit bietet. Das in AP 3 untersuchte Funktionsmuster des Reaktors wird in den Abmessungen hochskaliert, so dass ausreichend Metallhydrid zur Verfügung steht, um das vergrößerte Paneelvolumen bis zum gewünschten Gasdruck mit Wasserstoff zu speisen. Der Reaktor wird analog zum Funktionsmuster aus AP 3 mit funktionsintegrierten Komponenten wie Filter und interner Wärmeleitstruktur ausgeführt. Abbildung 21 zeigt die beiden Reaktoren, die für die Untersuchungen zum Betriebsverhalten eingesetzt wurden.

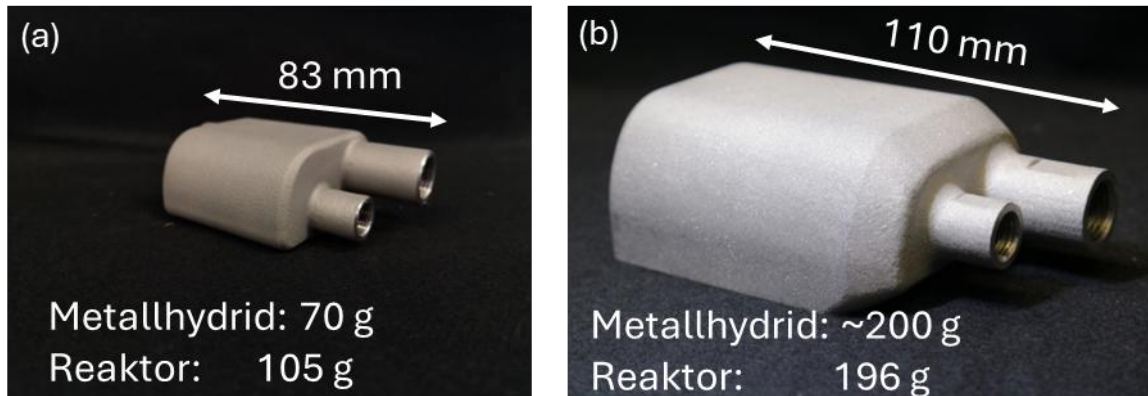


Abbildung 21: Bildlicher Vergleich der Reaktoren zur Untersuchung des Betriebsverhaltens der regelbaren Wärmedämmung. (a) Reaktor für 30x30 cm-Dämmpaneel, (b) Reaktor für 1x1m-Dämmpaneel [12]. Bildquelle: FE 2.

Konstruktion Bauteildemonstrator

Die Skalierung des FM-Gebäude auf den Bauteildemonstrator wurde durch das stoffliche Verschalten von vier Paneelen und die Integration dieser in ein Wandmodul erreicht. Dazu wurde ein spezieller Rahmen aus Styrodur und einer kreuzförmigen Holzversteifung konstruiert, in den die Paneele eingesetzt und mit Dichtband abgedichtet wurden. Die Vorteile dieses modularen Aufbaus liegen im einfacheren Handling des Füllkerns und der Möglichkeit einzelne Paneele bei Undichtigkeiten oder Verformung auszutauschen. Weiterhin können die Paneele so einfach installiert werden. Die Konstruktion des Bauteildemonstrators mit 1 m² Fläche in Form eines Wandmoduls ist in Abbildung 22 gezeigt.

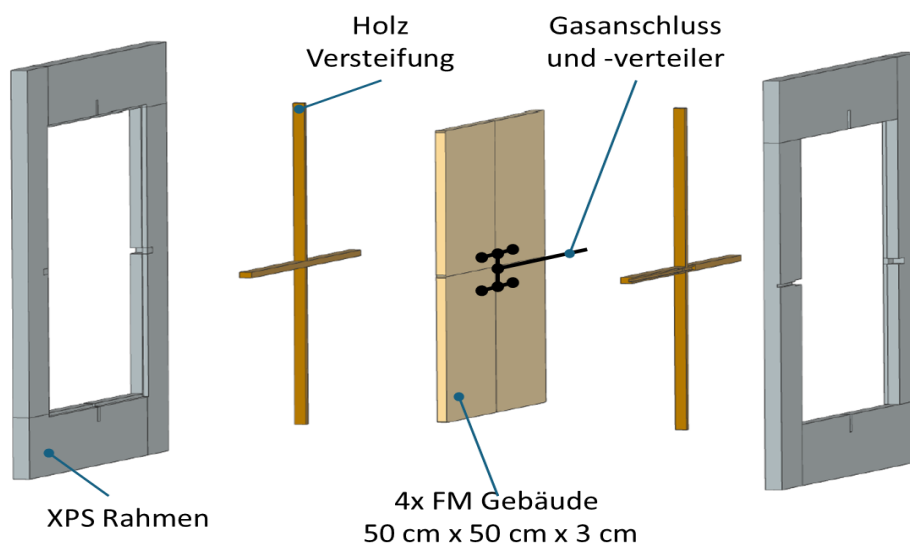


Abbildung 22: Explosionszeichnung der Fassade mit regelbaren Vakuumdämmelementen des Bauteildemonstrators

Der Aufbau des 1x1 m² großen Funktionsmusters aus vier Einzelpaneelen mit Gasanschluss und Verteiler ermöglicht es auch, die in Fassadensystemen nötige Verbindung mehrerer Paneele zu testen, um großflächige regelbare Dämmelemente an Außenfassaden realisieren zu können. Vergleichsweise komplexe Systeme wie dieses, können im Gebäudebereich am ehesten im Bereich des seriellen Bauens Umsetzung finden, bei dem eine Vormontage außerhalb der Baustelle möglich ist.

Darüber hinaus eröffnet die modulare und serielle Bauweise die Möglichkeit einer industriellen Fertigung mit entsprechender Qualitätskontrolle. Dies reduziert Fehlerquellen auf der Baustelle und unterstützt eine

skalierbare Anwendung für unterschiedliche Gebäudetypen und Sanierungsszenarien. Die Einheit aus mehreren Paneelen, Gasanschluss und -verteiltern sowie der Anschluss an einen Reaktor, der diese Moduleinheit versorgt, wäre in Fertigbauweise bereits vor der Anlieferung auf die Baustelle montierbar und könnte im Projekt in reduziertem Maßstab am konzipierten Funktionsmuster Gebäude erprobt werden.

Thermische Charakterisierung auf Komponentenlevel

An FE 1 ist ein Wärmestrommessplattengerät nach DIN EN 12667 [5] vorhanden, das für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen verwendet werden kann. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass es über eine Heiz- und eine Kühlseite verfügen und zwischen diesen einen eindimensionalen Wärmestrom einstellen. Zwischen den beiden Platten stellt sich dementsprechend in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Materials ein Wärmestrom ein. Über lokale Temperaturmessung können auch einzelne Schichten eines mehrschichtigen Aufbaus vermessen werden.

In das Wärmestrommessplattengerät der FE 1 können Proben von bis zu 1 m² eingelegt werden, die tatsächliche Messung findet über Wärmestrommessplatten mit 500 x 500 mm² statt. Daher kann die gesamte Konstruktion der Modell-Außenfassade in die Apparatur eingelegt werden und der Wärmedurchgang durch zwei Paneele vermessen werden.

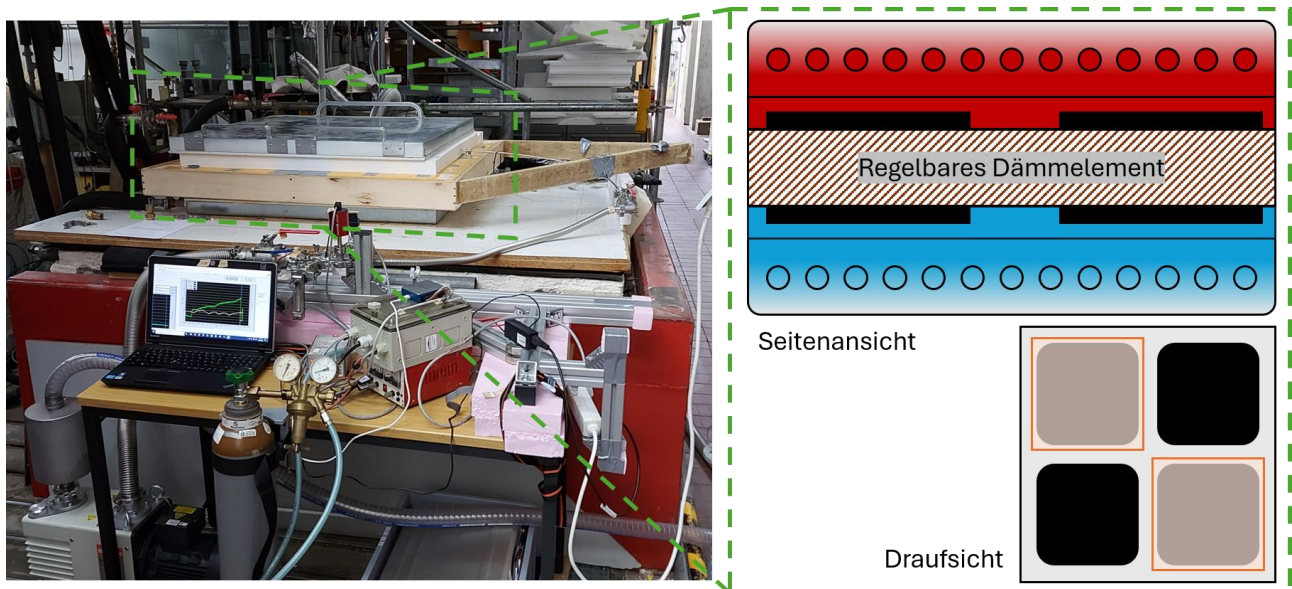


Abbildung 23: Wärmestrommessplattengerät bei FE 1. Bildquelle: FE 1

Die Wärmeleitfähigkeit wird mit einer Temperaturdifferenz von 15 K zwischen kalter und warmer Seite bei drei Temperaturniveaus gemessen. Der Prüfstand stellt nach dem Start die Solltemperatur der Platten ein und wertet automatisiert nach Erreichen eines stationären Zustands den Messpunkt aus, um anschließend das nächste Temperaturniveau einzustellen. Nach jeder abgeschlossenen Messung kann der Gasdruck im Paneel variiert werden. Es wurden folgende Druckstufen gemessen: 0,7 mbar (laufende Vakuumpumpe), 50 mbar, 100 mbar und 650 mbar. Da bei FE 1 keine Wasserstoffinfrastruktur verfügbar ist, wurden diese Untersuchungen mit Helium statt Wasserstoff durchgeführt. Das folgende Diagramm zeigt die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten, den Wärmestrom und die entsprechenden Fehlerbalken von 18 %, maßgeblich bedingt durch die Unsicherheit der Paneeldicke von +/-0,5 cm.

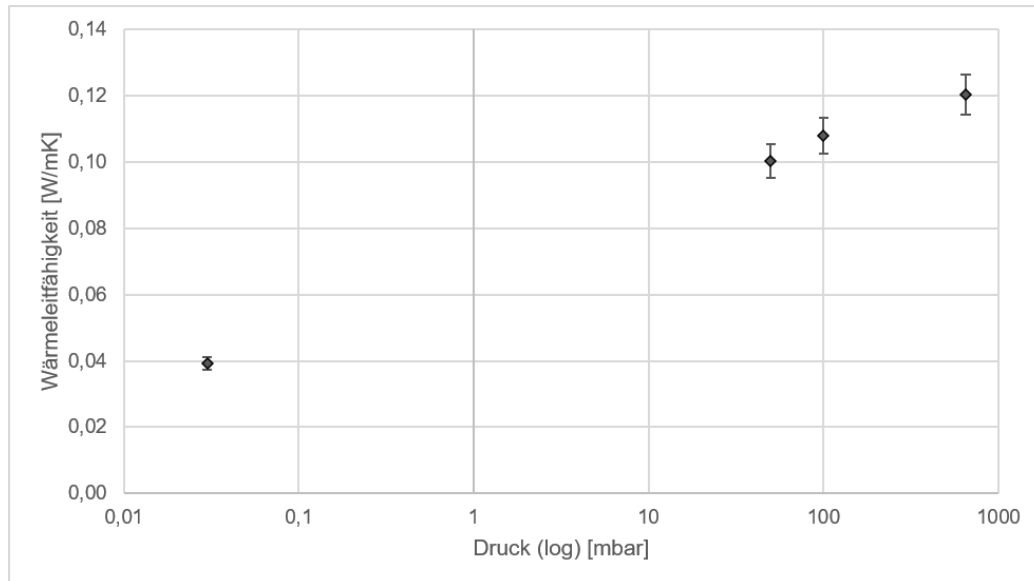


Abbildung 24: Ergebnisse der Messungen auf dem Wärmestrommessplattengerät der FE 1 mit dem Funktionsmuster Gebäude

Aus den Messergebnissen kann ein Schaltfaktor von 3 für den Gesamtaufbau des Funktionsmusters Gebäude im Aufbau der Demonstratorfassade errechnet werden. Da die Messungen mit dem kompletten Fassadenaufbau durchgeführt wurden, wie er auch im Demonstrator eingebaut wird, können die Ergebnisse bei der Auswertung der Demonstratorversuche (AP 7) weiterverwendet werden.

1.7 Arbeitspaket 7: Erprobung und Test des Funktionsmusters „Gebäude“ (FE 1, FE 2, FE 3)

Mit dem Ziel, das Gesamtsystem aus Paneel und Reaktoreinheit im Maßstab des Funktionsmusters Gebäude in anwendungsnaher Umgebung testen zu können, wird ein verkleinertes und vereinfachtes Modell eines Raums aufgebaut. Dieses Modell wird im Raumlufstromlabor der FE1 platziert, in dem die Außenluftzustände und damit die Randbedingungen auf der Außenseite des Raums nachgebildet werden können.

Zur Auslegung des verkleinerten Raums wird als Referenzraum ein 1-Personen-Büro mit 5 innenliegenden (adiabaten) Wänden und einer außenliegenden Wand herangezogen. Im Modell werden die 5 Wände, die die Innenbauteile repräsentieren, aus insgesamt ca. 30 cm dicken XPS-Platten aufgebaut und können somit als annähernd adiabat betrachtet werden. Die Außenwand wird so aufgebaut, dass die 4 Paneele des FM-Gebäude darin eingesetzt werden können. Da das Funktionsmuster Gebäude eine Dicke von 3 cm aufweist und die Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 0,05 W/(mK) liegt, dominiert der Wärmestrom über die Außenfassade den über die deutlich besser gedämmten innenliegenden Wände.

Während der Realraum an der Außenfassade mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von 0,24 W/(m²K) angenommen werden kann, wird der U-Wert des Modells so ausgelegt, dass der Absolutwert des Wärmestroms über die reduzierte Oberfläche der Außenwand gleich bleibt. Würde der U-Wert des Realraums beibehalten werden, wäre der Wärmestrom über die Außenfassade des Modells so gering, dass die Temperaturänderungen im Inneren des Modells zu langsam ablaufen würden, um sie während der Versuche in geeigneten Zeiträumen erfassen zu können.

Bei einem Realraum mit $L \times B \times H$ (3x3x3) m³ und einem Modellraum mit (1x1x1) m³ muss der U-Wert des Modells rechnerisch bei gleicher Temperaturdifferenz 9 mal höher sein als der des Realgebäudes, also von 0,24 W/(m²K) auf 2,16 W/(m²K) erhöht werden.

Weitere Randbedingungen für den Versuchsaufbau sind in Tabelle 6 gelistet:

Tabelle 6: Randbedingungen und Auslegungsgrößen von Real- und Modellraum

Randbedingungen	Einheit	Realraum	Modellraum
Maße (L x B x H)	m ³	3 x 3 x 3	1 x 1 x 1
Fläche Außenwand	m ²	9	1
U-Wert	W/(m ² K)	0,24	2,16
Material Innenwand	---	Beton, Putz	Styrodur (XPS)
Dicke Innenwand	m	0,01	0,3
Material Außenwand	---	Beton, Dämmung, Putz	Regelbares Dämmelement (FM-Gebäude)
Dicke Außenwand	m	0,04 Beton, 0,03 Dämmung	0,03

Das dynamisch-thermische Verhalten der beiden Räume (Real- und Modellraum) wird durch den Wärmedurchgang und die Wärmekapazität der Räume beschrieben. Aufgrund der signifikanten Unterschiede (Wandaufbau, Raumgröße, etc.) zwischen Realraum und Modell, ist es nicht möglich, dasselbe thermisch-dynamische Verhalten zu erreichen. Ziel der Auslegung ist es daher, die unterschiedlichen Verhaltensweisen zu charakterisieren, um im Versuch vergleichbare bzw. übertragbare Zustände zu erreichen. Aufgrund der geringeren thermischen Kapazität des Modellraums, wird dieser schneller auf Änderungen der thermischen Außenbedingungen reagieren.

Unter Anwendung von DIN EN ISO 13790 [6] wird die Zeitkonstante beider Räume berechnet. Hinsichtlich der vorhandenen Kapazitäten ist zu berücksichtigen, dass bei Temperaturänderungen abhängig von deren Dauer und Amplitude, lediglich ein Teil der gesamten Wanddicke, bezeichnet als effektive Eindringtiefe, für die Temperaturänderung relevant ist. Nur dieser Anteil wird als effektive Kapazität in die Betrachtung einbezogen, diese hängt wiederum von der Wärmeleitfähigkeit des entsprechenden Materials ab (siehe auch Gleichung (1)).

$$d_{eff} = \frac{\kappa_{eq}}{\rho \cdot c_p} \quad (1)$$

d_{eff}	Effektive (wirksame) Eindringtiefe	[m]
ρ	Dichte des Materials (bzw. der Schicht bei mehrschichtigem Aufbau)	[kg/m ³]
c_p	Wärmekapazität des Materials	[J/kg]

Aus den Berechnungen zur Ähnlichkeit resultiert, dass die Zeitkonstante des Modellraums für ein typisches Tagesprofil im Sommer- und Winterfall ca. 8 mal geringer als die des Realraums ist. Wird im Modellraum also über das Raumluftrömlungslabor ein Tagesprofil abgebildet, muss dieses entsprechend der Zeitkonstante ebenfalls schneller ablaufen, damit die Temperaturverläufe im Modellinneren und an der Wand annähernd vergleichbar sind.

Detailbeschreibung der Konstruktion

Der Modellraum wird aus Styrodurplatten mit einer Dicke von 50 mm und 80 mm gefertigt. Diese werden schichtweise und mit Versatz angeordnet, sodass sowohl Wärmebrücken vermieden als auch eine hohe Luftdichtheit erreicht wird. Die näherungsweise als adiabat ausgeführten Innenbauteile bestehen aus 4 Schichten, sodass eine Gesamtdicke von 260 mm vorliegt.

Die Außenfassade wird am restlichen Modell angeschraubt. Kabel für die Messtechnik, den Ventilator im Inneren (für eine homogene Temperaturverteilung sowie zur Erhöhung des inneren konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten) und die Swagelok-Leitung zu den Paneelen werden über einen abgedichteten Durchgang durch die hochgedämmte Seitenwand geführt.

Das Modell wurde im Raumluftrömungslabor (RLS) der FE1 aufgebaut und über eine eingezogene Zwischenwand ein angrenzender Raum zur Steuerung geschaffen (siehe Abbildung 25). Die Messtechnik und die Gaszuleitung werden durch die Wand hindurch in den angrenzenden Raum geführt, um den Prüfstand größtenteils von dort steuern zu können und möglichst selten über eine Tür in den Versuchsraum eintreten zu müssen.



Abbildung 25: Modell im RLS während des Aufbaus. Links: Blick aus dem Versuchsraum, rechts: Blick aus dem Steuerungsraum

Fortan wird der Zustand im Raumluftrömungslabor als Außenzustand bezeichnet, da dieser durch das RLS emuliert wird – hier sind Lufttemperaturen zwischen 10 und 30°C einstellbar. Demgegenüber wird der Zustand im Inneren des Modellraums als Innenraum bezeichnet.

Um beide Zustände messtechnisch erfassen zu können, sind je ein PT100-Temperatursensor innen (mittig) und außen (zentral vor der Außenwand) positioniert. Zusätzlich werden zur Vermessung der regelbaren Dämmelemente jeweils gegenüberliegend PT100-Temperatursensoren auf der Innen- und Außenseite des Modellraums positioniert (Anordnung siehe Abbildung 26), damit aufgrund der jeweiligen Temperaturdifferenz eine Abschätzung des Wärmedurchgangs erfolgen kann. Ein Paneel (P1) wird über drei Messpositionen (unten, mittig, oben) detaillierter vermessen. Mittig an P1 sind zusätzlich zwei Wärmestromsensoren platziert, um den Wärmestrom durch das Paneel zu erfassen.

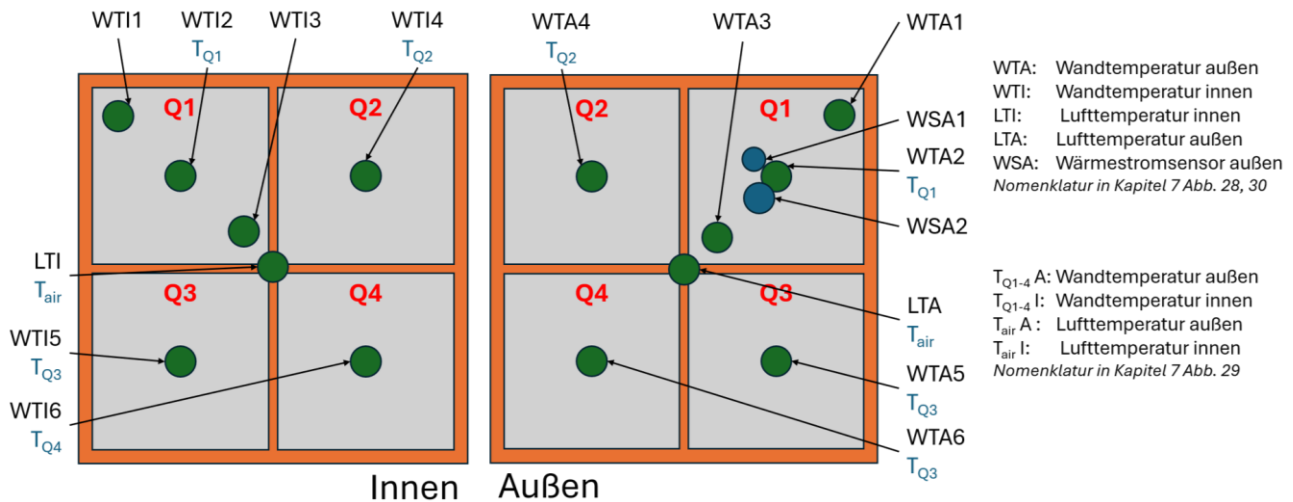


Abbildung 26: Sensorpositionen innen und außen an den regelbaren Dämmelementen.

Um den Systemdruck im Wasserstoff führenden Reaktor-Paneel-System aufzeichnen zu können, sind vier Drucksensoren im Steuerungsraum an den Armaturen installiert - jeweils zwei vor und nach dem Absperrventil des Reaktors. Dadurch kann zu jeder Zeit sowohl der Systemdruck als auch der Reaktordruck gemessen werden, auch wenn dieser durch den Kugelhahn vom Paneel abgesperrt ist. Es werden jeweils zwei Drucksensoren benötigt, um den gesamten am Paneel einstellbaren Druckbereich von 0,03 mbar bis < 1000 mbar mit der erforderlichen Messgenauigkeit abdecken zu können. Ein Sensor misst im unteren Bereich bis ca. 100 mbar, der andere im restlichen Bereich bis 1000 mbar.

Die Armaturen des Prüfstands sind so aufgebaut, dass der Reaktor durch eine Heliumflasche ausgetauscht werden kann, sodass Versuche mit beiden Gasen möglich sind. Messtechnisch lassen sich mit diesem Prüfstand folgende Versuche durchführen:

- Referenzmessungen werden mit der Fassade im hoch dämmenden Zustand (Vakuum) durchgeführt, so dass diese mit dem geregelten Zustand verglichen werden können.
- Temperaturänderung im Inneren durch Regelung der Außenwanddämmung bei konstanter Außentemperatur können charakterisiert werden.
- Die Bestimmung des effektiven Schaltfaktors des Gesamtaufbaus erfolgt über die Messung des aufzubringenden Leistungsunterschieds (elektrisch), um eine konstante Innentemperatur bei konstanter Außentemperatur beim Umschalten der regelbaren Dämmelemente einzuhalten.
- Charakterisierung der Temperaturänderung im Inneren beim Aufprägen eines Außentemperatur-Tageprofils und entsprechender Regelung der Außenwanddämmung.

Ergebnisse am anwendungsnahen Demonstratorprüfstand

Aus einer Vielzahl an durchgeführten Versuchen und Messreihen sollen hier die für die Funktionalität regelbarer Dämmelemente relevantesten vorgestellt werden. Beim im Folgenden beschriebenen Versuch wurde die Leistung der Glühbirnen im Inneren des Modells (innere Wärmeabgabe im Modellraum) so geregelt, dass die Innenraumtemperatur auf 35°C eingestellt wird, während die Außentemperatur konstant bei 14°C liegt. Nach dem Einstellen eines quasi-stationären Zustands der Innenraumtemperatur (35 °C) wird der Gasdruck

in den regelbaren Dämmelementen vom evakuierten Zustand auf 533 mbar erhöht. Durch die Erhöhung der elektrischen Leistung der Glühbirne stellen sich erneut 35°C im Inneren ein (siehe Abbildung 27).

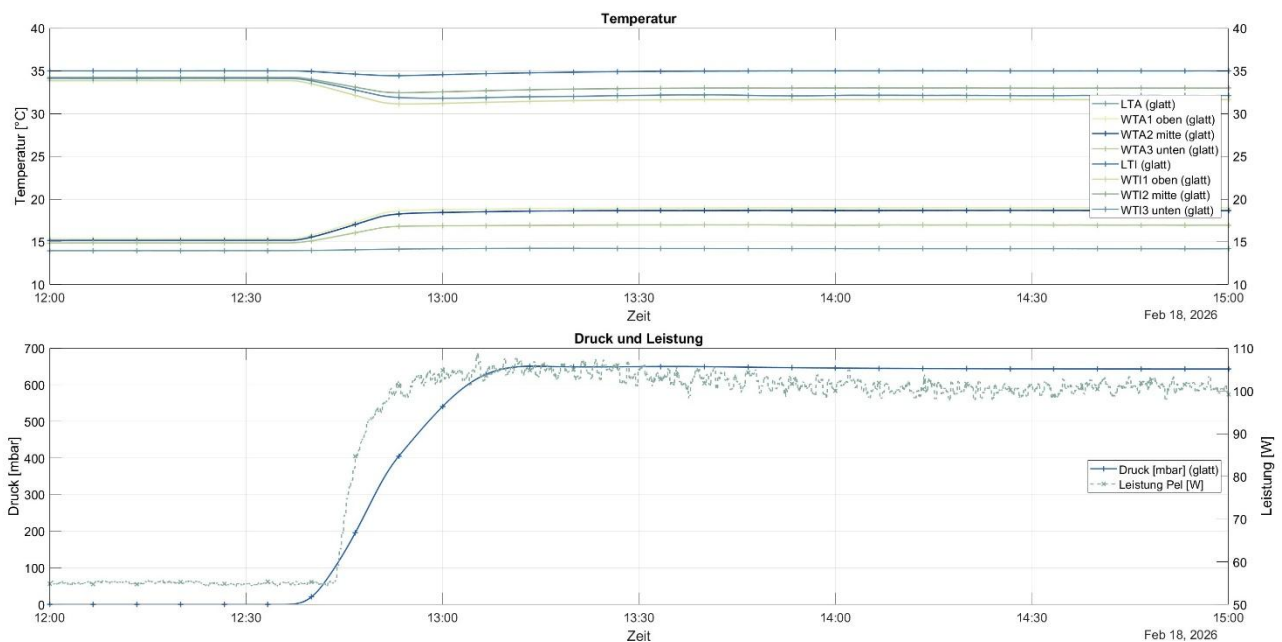


Abbildung 27: Regelung der inneren Wärmeabgabe auf eine konstante innere Temperatur von 35°C mit evakuierten Paneelen und bei 533 mbar

Es zeigt sich, dass die nötige Leistung zum Halten einer Innentemperatur von 35°C bei sonst gleichen Bedingungen durch die Gasdruckerhöhung in den Paneelen von knapp 60 auf 120 W ansteigt. Dementsprechend können ca. 60 W mehr über die Modellfassade abgeführt werden, wenn diese in den leitenden Zustand versetzt wird. Da für die Paneele entsprechende Referenzmessdaten vom Wärmestrommessplattengerät vorliegen, ist von einem Schalfaktor von 3 und Wärmeleitfähigkeiten in der Größenordnung von 0,04 bis 0,12 W/(m K) auszugehen (siehe AP 6). Die gemessenen Werte der abführbaren Leistung über die Modellfassade liegen in einem dazu passenden Bereich, wenn Strahlung und thermische Effekte durch den Einbau (auf der Wärmestrommessplatte nicht berücksichtigt) in die Betrachtung einbezogen werden.

Neben den oben beschriebenen Versuchen mit Helium wurden am anwendungsnahen Demonstratorprüfstand auch Versuche mit dem ReVaD-Gesamtsystem, für das Szenario der passiven Raumkühlung mittels adaptiver Fassade durchgeführt. Ausgehend von einem vollständig evakuierten Paneel im thermisch stationären Zustand wurden zwei Messkampagnen durchgeführt (Abbildung 28).

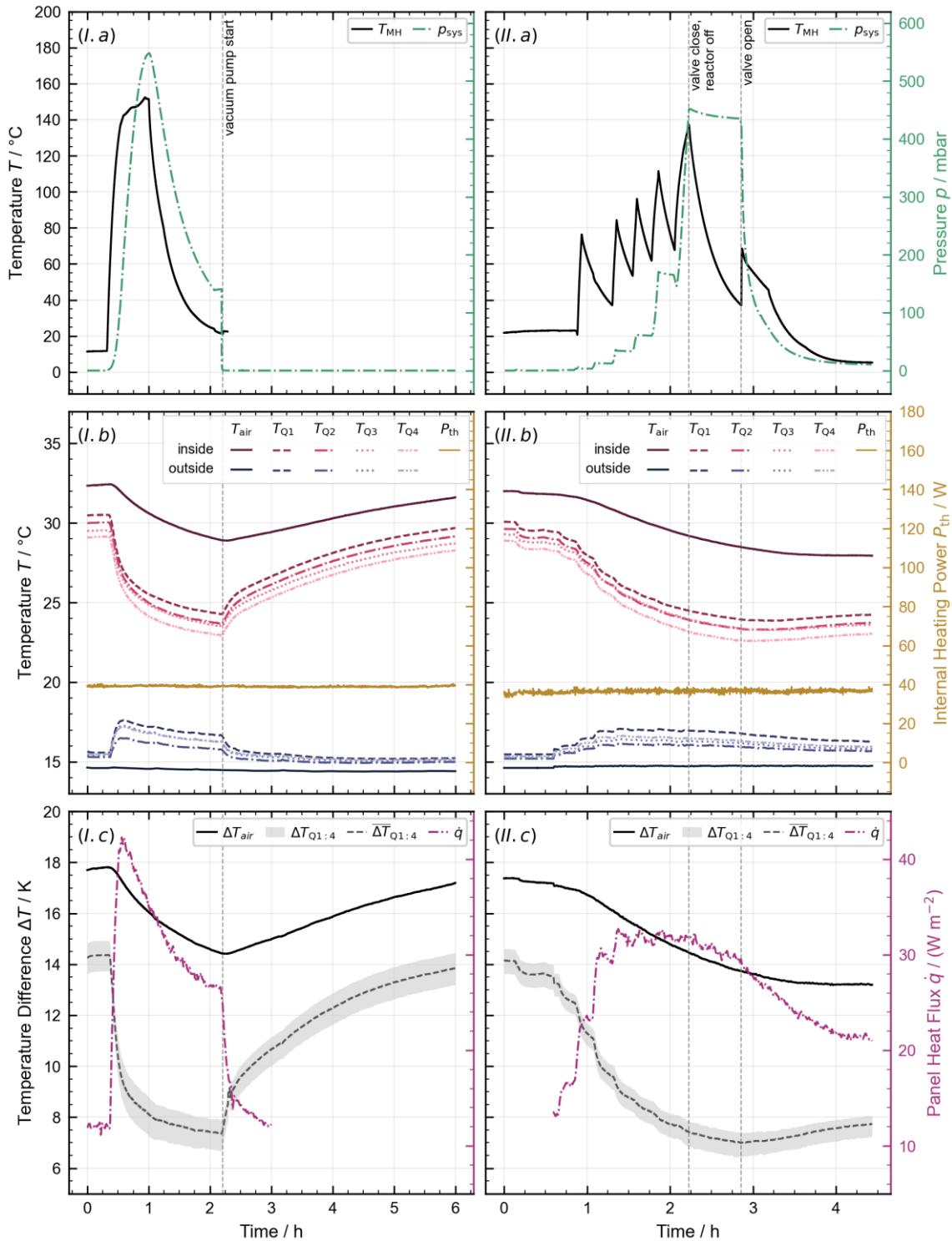


Abbildung 28: Experimentelle Ergebnisse der (1x1) m²-Demonstration der gekoppelten regelbaren Wärmedämmung im Modellraum in den Laboren des IGTE für zwei verschiedene Betriebsweisen (I und II) des Szenarios Adaptive Fassade. (a) Metallhydridtemperatur und Gasdruck, (b) Temperaturen am Paneel und in Innen-/Außenluft sowie die innere thermische Last, (c) zusammengefasste (graues Band) sowie gemittelte (gestrichelte Linie) Temperaturdifferenzen sowie der Paneelwärmestrom. Entnommen aus [12].

Kampagne I: Binäre Desorption und Absorption

Der Systemdruck im Paneel wurde innerhalb von ca. 30 Minuten vom initialen Vakuumzustand (etwa 0,04 mbar) auf etwa 550 mbar angehoben und anschließend durch Absorption wieder abgesenkt (I.a). Die thermische Antwort ist unmittelbar erkennbar (I.b–c): Die inneren Wandtemperaturen fallen ab, die äußeren

steigen an, die Innenraumlufttemperatur folgt verzögert und sinkt um ca. 3 K nach einer Stunde. Die mittlere Temperaturdifferenz über das Paneel verringerte sich von ca. 14 K auf etwa 7,5 K. Nach einer Stunde passiver Reaktorkühlung war der gemessene Druck auf ca. 140 mbar gesunken, ohne erkennbare Rückkehr der Paneeltemperaturen zum jeweiligen Ausgangsniveau. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die wesentliche Änderung der Wärmeleitfähigkeit aufgrund des Knudsen-Effekts beim untersuchten skalierten Paneel erst bei deutlich niedrigeren Drücken einsetzt – eine Absenkung von 550 auf 140 mbar bewegt sich noch im druckunabhängigen Bereich der sigmoidalen Kennlinie und hat daher kaum Einfluss auf den Dämmwert. Die thermisch relevante Druckschwelle liegt für dieses Paneel offenbar im Bereich unterhalb des erreichten Druckwerts. Erst nach Zuschalten einer externen Vakuumpumpe, die diesen Bereich erreichte, divergierten die Paneeltemperaturen wieder deutlich, der ursprüngliche Dämmzustand wurde jedoch auch nach vier Stunden nicht vollständig wiederhergestellt.

Kampagne II: Stufenweise Druckerhöhung

Die Desorption wurde in diskreten Druckstufen von 0,04 bis 450 mbar durchgeführt (II.a). Die gezielte Einstellbarkeit verschiedener Druckniveaus über die Temperatursteuerung der Peltier-Elemente wurde damit nachgewiesen. Das Stufenprofil bildet sich deutlich im Temperatur- und Wärmestromverlauf ab (II.b–c), wobei die wesentliche Änderung der Wärmeleitfähigkeit im Bereich zwischen ca. 10 und 100 mbar stattfindet – oberhalb davon ist der zusätzliche thermische Effekt gering. Über die gesamte Versuchsdauer sank die Temperaturdifferenz von 14,5 auf 7 K, die Raumlufttemperatur um ca. 4 K. Die anschließende Absorption senkte den Druck innerhalb einer Stunde auf 10 mbar, wobei sich die Temperaturdifferenzen nur geringfügig dem Anfangszustand annäherten.

Einordnung der Kampagnen-Ergebnisse

Aus den Ergebnissen der zweiten Kampagne lässt sich ein thermisches Schaltverhältnis von ca. 3 auf Systemebene ableiten. Die Asymmetrie zwischen Desorption und Absorption ist auf mehrere überlagerte Faktoren zurückzuführen: die exotherme Reaktionswärme bei der Absorption, den abnehmenden Gastransport bei niedrigen Absolutdrücken, die Gastransportwiderstände im großflächigen Paneel sowie den grundsätzlich schnelleren Wärmetransport bei hoher Wärmeleitfähigkeit. Zudem deutet die im Vergleich zum 30×30 cm Funktionsmuster verschobene Knudsen-Transition darauf hin, dass sich die effektive Porengrößenverteilung durch die Skalierung und vertikale Orientierung verändert hat, was zu einer unvollständigen Überlappung des Paneel-Übergangsbereichs mit dem Arbeitsdruckbereich des Reaktors führt. Insgesamt bestätigt die Demonstration die Funktionsfähigkeit des adaptiven Dämmkonzepts im gebäuderelevanten Maßstab: Thermochemische Druckaktuierung, Knudseneffekt-basierte Leitfähigkeitsschaltung und die resultierende Modulation des Wärmestroms wurden als integrierte Prozesskette mit getrennten Reaktor- und Paneelkomponenten im (1×1) m² Maßstab realisiert.

Aufgrund dieser Ergebnisse an der Fassade wurde das Anwendungsfeld der thermischen Bauteilaktivierung nicht experimentell umgesetzt: Die vertikale Orientierung führt offenbar zu einer Verschiebung der einzelnen textilen Lagen und damit zu vergrößerten Porengrößen, sodass der Paneel-Übergangsbereich nur unvollständig mit dem Zieldruckbereich überlappt und der Schaltfaktor sinkt. Da hierfür zunächst eine Lösung für das Verhalten der einzelnen Lagen in vertikaler Ausrichtung bei mehreren Schaltzyklen entwickelt werden müsste, wurden die Arbeiten zur Bauteilaktivierung verstärkt in den numerischen Teil (AP 2) verlagert. Versuche mit Speichermasse wären zwar möglich gewesen, aufgrund der beschriebenen Porenvergrößerung, der Skalierung des Modellprüfstands in einen kleineren Maßstab und der deutlich höheren Anzahl an

Störeinflüssen auf die Messungen jedoch angesichts der zu erwartenden Messunsicherheiten weniger aussagekräftig. Das Abkühlverhalten von Speichern, sowie das Verhalten thermischer Bauteilaktivierung sind hinreichend bekannt, sodass die Verlagerung der Betrachtung in die Simulation möglich war. Stattdessen wurden die Kapazitäten zur genaueren Untersuchung des Anwendungsfalls der Außenfassade genutzt. Zusätzlich zu den ursprünglich geplanten Versuchen mit Wasserstoff wurden zahlreiche Versuche mit Helium und Variationen verschiedener Tagesprofile durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Tagesprofile sollen im Folgenden vorgestellt werden. Über die Zulufttemperatur und die temperierbaren Wandplatten im Raumluftrömungslabor wird dabei eine vorgegebene Temperaturkurve (Außentemperatur) abgefahren. Entsprechend der Auslegung des Modellraums ist bekannt, dass diese verglichen mit realen Räumen eine verkürzte Zeitkonstante hat, also schneller auf dynamische Temperaturänderungen von außen reagiert. Dementsprechend wird mit zeitlich verkürzten Temperaturprofilen gearbeitet. Die eingebrachte elektrische Leistung bleibt über den gesamten Versuchszeitraum ausgeschaltet, nachdem sie initial genutzt wurde, um eine Innenraumtemperatur von 32 °C einzustellen. Die Diagramme in Abbildung 29 zeigen die Ergebnisse des Versuchs nach dem Abschalten der elektrischen Leistung.

Die Messdaten mit durchgezogener Linie zeigen die Messung mit Regelung der Wärmeleitfähigkeit der Fassade, die mit Strichlinie zeigen die Messreihen ohne. Bis 3 h nach Versuchsstart ist eine deutliche Abkühlung bei der Wand- und Lufttemperatur zu erkennen, da das regelbare Dämmelement auf wärmeleitend eingestellt ist. Sobald die Außentemperatur über die Innenraumsolltemperatur von 21 °C steigt, wird das regelbare Dämmelement in den dämmenden Zustand geschaltet. Aufgrund der geringen Kapazität der Modellfassade ist zu erkennen, dass der Effekt einer geringeren Temperatur im Innenraum nur für einen vergleichsweise kurzen Zeitraum aufrechterhalten werden kann. Dennoch stellen 1,5 h, in denen die Temperatur niedriger ist als im unregelten Zustand, bei dem um grob die Hälfte verkürzten Temperaturprofil einen signifikanten Unterschied zum unregelten Zustand dar. Dies verdeutlicht das Einsparpotential im Kühlfall durch Erhöhen des Wärmedurchgangs der Dämmelemente bei geeigneten Temperaturdifferenzen gegenüber der Außentemperatur. Um die Einsparungspotentiale zu evaluieren, können so genannte Übertemperaturstunden der Rauminnentemperatur definiert werden. Dieser Parameter berücksichtigt die Temperaturdifferenz zwischen dem Raumzustand ohne und mit geregelter Fassade gegenüber einem Referenzwert von 20,5°C und wird in Kh (Kelvinstunden) angegeben. Dieser Referenzwert resultiert aus der niedrigsten im Versuch erreichten Rauminnentemperatur. Die Übertemperaturstunden lassen sich als Fläche zwischen den jeweiligen Kurven der Luftinnentemperatur darstellen und sind in Abbildung 29 jeweils als eingefärbter Bereich angegeben.

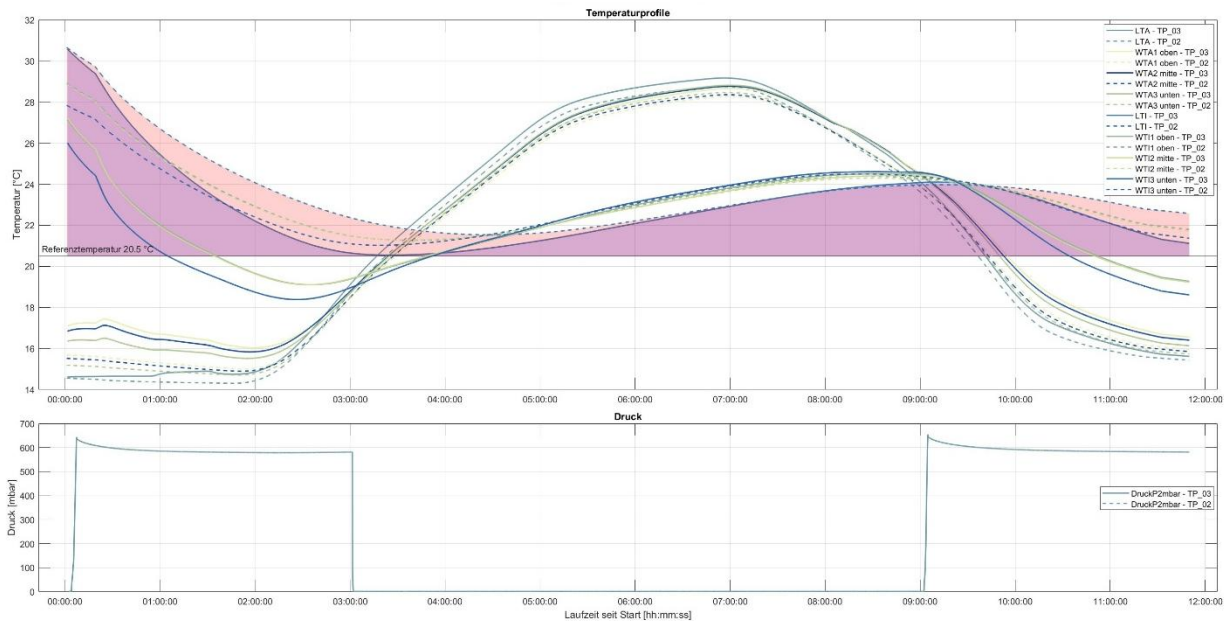


Abbildung 29: Tagesprofil im Vergleich mit geregelter und nicht geregelter Fassade

Abbildung 29 zeigt, dass die entsprechenden Übertemperaturstunden mit geregelter Fassade von 31,1 auf 24,8 Kh reduziert werden können, was einer Verringerung um 20 % entspricht. Über die Inhalte des Projekts hinaus, sollen diese Ergebnisse mittels Simulationen auch qualitativ mit realen Gebäuden verglichen werden. Der thermisch schneller reagierende Modellraum wird, wie in der Auslegung erläutert, vergleichbar mit Realgebäuden, wenn die anregenden Temperaturprofile ebenfalls verkürzt werden. Daher wurden ähnliche Versuche mit unterschiedlich langen Temperaturprofilen experimentell durchgeführt. Die Versuche zeigen, dass die gezielte Regelung der Dämmelemente und der damit verbundenen Nutzung der Nachtabenkung dazu genutzt werden können, die Temperatur im Modellinneren verglichen mit dem Fall statischer Dämmung signifikant zu reduzieren. Dieser Effekt konnte auch in den Simulationen von Realgebäuden gezeigt werden und kann im Realgebäude zu Einsparungen der Kühlenergie führen.

Zusammenfassung

Im AP 7 wurde ein anwendungsnaher Demonstratorprüfstand im verkleinerten Maßstab als vereinfachter Modellraum aufgebaut und zur Untersuchung regelbarer Dämmelemente eingesetzt. Mit diesem können verschiedene anwendungsnahe Messungen mit Wasserstoff und Helium durchgeführt werden.

Die Versuche zeigen, dass die Wärmeabfuhr über die Modellfassade durch Erhöhung des Gasdrucks in den Paneelen deutlich gesteigert werden kann. Auch die Versuche mit dem ReVaD-Gesamtsystem belegen die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der adaptiven Fassade. Durch thermochemische Druckaktuierung konnte der Wärmestrom über das Paneel gezielt verändert werden. In den Messkampagnen sanken die Temperaturdifferenzen über das Paneel deutlich, und die Innenraumlufttemperatur reduzierte sich um etwa 3 bis 4 K. Gleichzeitig zeigte sich, dass die Absorption und Rückkehr in den hochdämmenden Zustand langsamer und unvollständiger verliefen als die Umschaltung in den leitenden Zustand. Als Ursachen hierfür sind unter anderem die Abfuhr der Reaktionswärme, Gastransportwiderstände und eine durch Skalierung und vertikale Orientierung verschobene Knudsen-Transition aufzuführen.

Für dynamische Tagesprofile konnte gezeigt werden, dass eine geregelte Fassade im Kühlfall die Übertemperaturstunden, bezogen auf die niedrigste gemessene Rauminnentemperatur, um ca. 20 % reduziert werden

können. Damit bestätigt das Kapitel das Potenzial regelbarer Dämmelemente zur passiven Raumkühlung, weist aber zugleich auf konstruktive und systemische Optimierungsbedarfe insbesondere bei großflächigen, vertikal orientierten Paneelen hin. Weiterhin hat die Arbeit am Demonstratorprüfstand gezeigt, dass die Komplexität der Anlage eine Montage auf der Baustelle schwierig machen wird. Wie bereits in AP 1 festgestellt, ist eine Realisierung am ehesten im Bereich des Fertighausbaus und des seriellen Bauens möglich. Dadurch können die Montage und das Testen des Fassadensystems in einer Fabrikumgebung durchgeführt werden.

1.8 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen

Die angestrebten Zielsetzungen und Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes sind in Zuordnung zu den einzelnen Arbeitspaketen in der nachfolgenden Tabelle 8 gegenübergestellt.

Projektziele	Erreichte Ergebnisse
AP 1: Definition der Einsatzszenarien und Spezifikationen (FE 1, FE 2, FE 3)	
1.1 Zusammenstellung der erforderlichen Funktionen und Eigenschaften (FE 1, FE 2, FE 3)	Es wurden gemeinsam mit dem PA Anforderungen an regelbare Dämmelemente zusammengestellt. Diese umfassen Anforderungen und Randbedingungen zu Anwendung, Untersuchung der Funktionsmuster sowie thermisch-physikalischen Kenngrößen.
1.2 Definition künftiger Einsatzszenarien (FE 1)	Es wurden Einsatzszenarien für regelbare Dämmelemente in der Gebäudehülle und zur Nutzung gebäudeinterner Speichermassen untersucht. Als besonders relevante Anwendungsfelder wurden modulare Fassadenelemente im Modul- bzw. Fertighausbau sowie innenliegende Systeme zur aktiven Nutzung thermischer Speichermassen identifiziert.
1.3 Ableitung der erforderlichen Funktionsmuster (FE 2, FE 3)	Aufbauend auf der Anforderungsliste wurden die Entwicklungsstufen Funktionsmuster Labor, Funktionsmuster Gebäude und anwendungsnaher Demonstrator abgeleitet. Das Funktionsmuster Labor wurde mit ca. 30 × 30 cm konzipiert, das Funktionsmuster Gebäude mit 50 × 50 cm. Für den anwendungsnahen Demonstrator wurden vier Elemente zu einem ca. 1 m ² großen Fassadenelement zusammengeführt.
⇒ Keine Abweichungen vom Projektantrag	
AP 2: Numerische Untersuchung der Energieeinspar- und Flexibilisierungspotentiale regelbarer Wärmedämmungen für Gebäudehüllen und Speichermassen (FE 1)	
2.1. Zusammenstellung der Randbedingungen	Es wurden klimatische, nutzungsbezogene, bauphysikalische und regelungstechnische Randbedingungen zusammengestellt. Hierzu zählen unter anderem Klimadaten des Testreferenzjahres, Raumtemperatursollwerte, innere Lasten, Lüftungs- und Infiltrationsansätze, Bauteilaufbauten, Fensterkennwerte sowie Randbedingungen für regelbare Außen- und Innenwände.
2.2. Modellierung und Simulation typischer Anwendungsbeispiele	Es wurde eine eigenständige Simulationsumgebung in Matlab/Simscape aufgebaut, da gängige Gebäudesimulationsprogramme die zeitabhängige Veränderung der Wärmeleitfähigkeit massebehafteter Bauteilschichten nicht ausreichend abbilden können. Die Umgebung wurde anhand von Vergleichsrechnungen mit konventionellen Simulationsansätzen validiert und anschließend für regelbare Außen- und Innenwände eingesetzt.
2.3. Parameterstudie zu wärmetechnischen Eigenschaften untersch. Bauteilintegrationen	Es wurden Parameterstudien für regelbare Außenwände durchgeführt. Variiert wurden unter anderem Gebäudestandard, Window-to-Wall-Ratio, Schaltfaktor, Mindestoberflächentemperatur, interne Wärmeabgaben, Sonnenschutz und Speicherkapazität. Ergänzend wurde eine Nachrüstvariante im Bestand betrachtet.
2.4. Erarbeitung von Regelungs-/Steuerungsstrategien für regelbare Wärmedämmungen	Für die regelbare Außenwand wurde eine Schaltlogik in Abhängigkeit von Raumtemperatur, Heiz- und Kühltollwert sowie Oberflächentemperatur der Außenwand erarbeitet. Für regelbare Innenwände mit externer Beladung wurden drei Regelungsvarianten untersucht, die sich insbesondere durch die Berücksichtigung der Grenzflächentemperatur und durch Vorkonditionierung unterscheiden.

2.5. Ableitung der Energieeinsparpotentiale adaptiver Gebäudehüllen bei unterschiedlichen Gebäudetypen und -nutzung	Für die regelbare Außenwand zeigte sich vor allem im Kühlfall ein relevantes Einsparpotenzial. Die Einsparung nimmt mit steigendem Schaltfaktor zunächst deutlich zu, erreicht bei hohen Schaltfaktoren jedoch ein Sättigungsverhalten. Bei kleinen Fensterflächenanteilen wurden die höchsten relativen Kühlenergieeinsparungen ermittelt; bei großen Fensterflächenanteilen nimmt der relative Beitrag der opaken regelbaren Außenwand ab. Die Kombination mit außenliegendem Sonnenschutz zeigte das höchste Reduktionspotenzial.
2.6. Ableitung der Flexibilisierungspotentiale durch adaptive Wärmedämmung massiver Bauteile als Speicher in Neubauten und zur Nachrüstung	Für regelbare Innenwände wurde gezeigt, dass durch die zeitabhängige Kopplung und Entkopplung von Speichermassen ein Flexibilisierungspotenzial im Gebäudebetrieb entsteht. Modellrelevant sind dabei insbesondere die thermische Speicherwirkung, das Schaltverhalten sowie die Regelstrategie. Ohne externe Beladung liegt der Nutzen vor allem in der passiven Verschiebung von Wärmeströmen in und aus der Wand. Mit externer Be- und Entladung kann die Speichermasse gezielt thermisch beladen und während der Nutzung bedarfsgerecht an den Raum gekoppelt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass das Potenzial regelbarer Innenwände wesentlich von der Abstimmung zwischen Speichermasse, Beladung, Schaltverhalten und Regelung abhängt.
2.7. Weiterentwicklung der Simulationsmodelle nach messtechnischer Evaluierung und Untersuchung der Funktionsmuster	Die messtechnische Evaluierung der Funktionsmuster lieferte die für die Weiterentwicklung des Simulationsmodells relevanten Kenngrößen. Dazu zählen insbesondere die gasdruckabhängige effektive Wärmeleitfähigkeit, die Schaltzeiten des thermischen Zustandswechsels, Verzögerungen beim Druckausgleich sowie thermische Rand- und Wärmebrückeneffekte. Diese Messdaten ermöglichen es, die bislang idealisierten Schaltzustände im Modell durch realitätsnähere Parameter und zeitabhängige Effekte wie Druckeinstellung im Reaktor, Gastransportprozesse im Paneel, Anschluss- und Verteilertechnik sowie thermische Rand- und Wärmebrückeneffekte zu ergänzen.
⇒ Keine Abweichungen vom Projektantrag	
AP 3: Entwicklung eines Metallhydrid-Reaktors zur definierten Einstellung des Wasserstoffdrucks im Vakuumdämmpaneel (FE 2)	
3.1. Auswahl und Charakterisierung von Metallhydriden (MH) zur Gasdruckeinstellung	Es wurden geeignete Metallhydridmaterialien zur Gasdruckeinstellung recherchiert. Eine Auswahl vielversprechender wurde ausgewählt und charakterisiert. Als geeignetes Reaktionsmaterial wurde $\text{LaNi}_{4.1}\text{Al}_{0.52}\text{Mn}_{0.38}$ identifiziert, da der benötigte Druckbereich von ca. 1 bis 1000 mbar über technisch realisierbare Temperaturen (-5-150 °C) eingestellt werden kann. ZrNi wurde ergänzend untersucht, aufgrund ungünstiger Kinetik und unzureichender Zyklenstabilität jedoch nicht weiterverfolgt.
3.2. Parameteruntersuchungen zu Stoff- und Wärmetransport im MH-Bett unter Vakuum	Es wurden Untersuchungen zum Reaktions- und Betriebsverhalten unter Vakuumbedingungen durchgeführt. Dabei zeigte sich insbesondere, dass die Druckabsenkung durch exotherme Absorption, begrenzte Kühlleistung und den abnehmenden Stofftransport bei niedrigen Absolutdrücken langsamer verläuft als die Druckerhöhung.
3.3. Konzeption, Design und numerische Auslegung des MH-Reaktors	Es wurden verschiedene Reaktorkonzepte entwickelt. Im Fokus stand ein thermisch entkoppeltes Reaktordesign, bei dem vor allem die Metallhydridmasse aktiv temperiert wird, während das Gehäuse thermisch weitgehend entkoppelt von der Temperaturänderung bleibt. Zusätzlich wurde eine Leichtbauvariante ohne thermische Entkopplung entwickelt.
3.4. Fertigung und Befüllung des Metallhydrid-Reaktors	Die Reaktoreinheiten wurden durch Kombination additiver und klassischer Fertigungsverfahren aufgebaut, auf Dichtheit geprüft und mit dem charakterisierten Metallhydrid $\text{LaNi}_{4.1}\text{Al}_{0.52}\text{Mn}_{0.38}$ befüllt.
3.5. Charakterisierung des MH-Reaktors (Reaktionsverhalten, Druckeinstellung, Dynamik)	Das Reaktionsverhalten des Metallhydrids konnte im Reaktorbetrieb verifiziert werden. Mit Peltier-Elementen wurden Temperaturen von ca. -5 bis 150 °C eingestellt. Der Zieldruckbereich von 1 bis 1000 mbar wurde abgedeckt. Eine Druckerhöhung von 5 auf 970 mbar wurde innerhalb von ca. 8 min erreicht; die Druckabsenkung benötigte ca. 30 min.
3.6. Untersuchung von Regelungsverhalten und	Für den vollen Betriebsbereich wurde ein Energiebedarf von 43,3 kJ für die druckerhöhende Desorption und 67,0 kJ für die drucksenkende Absorption

Energiebedarf, Ableitung geeigneter Reaktor-Fahrweisen	ermittelt. Als Ansatz zur weiteren Optimierung wurde in Vorabparameterstudien die angelegte elektrische Leistung variiert und eine angepasste Betriebsstrategie, beispielsweise auch durch Nutzung passiver Abkühlphasen, abgeleitet.
⇒ Geringe Abweichungen zum Projektantrag: Ergänzend zum gewählten Metallhydridmaterial wurde ZrNi mituntersucht (wegen ungünstiger Kinetik/ Zyklenstabilität nicht weiterverfolgt). Es wurden zwei Reaktorvarianten entwickelt, statt nur einer geplanten: thermisch entkoppelter Reaktor und Leichtbauvariante. Die Untersuchungen zu Stoff- und Wärmetransport erfolgten schwerpunktmäßig experimentell, die begleitende numerische Analyse (COMSOL) in reduziertem Umfang. Die Gasstromunterbrechung wurde systemseitig (AP 5) statt reaktorintegriert betrachtet. Die Reaktorsteuerung erfolgte manuell ohne automatisierte Regelung. Dies hatte keine Auswirkungen auf die AP-Ziele.	
AP 4: Entwicklung eines textilen Vakuumisulationspaneels mit definierten Poreneigenschaften (FE 3)	
4.1 Qualifizierung Fasermaterial hinsichtlich Vakuum-Beständigkeit	Es wurde ein Prüfprozess zur Untersuchung der Ausgasung textiler Materialien unter Vakuum aufgebaut. Polyester und Glas wurden hinsichtlich ihres Ausgasungsverhaltens untersucht. Für Polyester wurde keine negative Auswirkung der Vakuumauslagerung auf die Festigkeit festgestellt; bei multifilen und monofilen Garnen stiegen Höchstzugkraft und Dehnung signifikant an.
4.2 Qualifizierung Fasermaterial hinsichtlich Wasserstoff-Beständigkeit	Die ursprünglich geplanten Wasserstoff-Expositionsversuche konnten aufgrund regulatorischer und sicherheitstechnischer Anforderungen nicht durchgeführt werden. Stattdessen wurde ein Literatur-Review zu Wasserstoff-Polymer-Interaktionen erstellt. Daraus wurde abgeleitet, dass unter den Paneelbedingungen bei hochkristallinem PET-Fasermaterial keine signifikanten Festigkeitsverluste zu erwarten sind.
4.3 Analyse und Verifizierung von Flächentechniken für die Abstandsstruktur	Verschiedene textile Grundstrukturen wie Gewebe, Gestricke, Vliese und Abstandsgestricke wurden beschafft und untersucht. Dabei wurden insbesondere Wärmeleitfähigkeit und Kompressionsverhalten bewertet. Standard-Abstandsstrukturen zeigten zwar geeignete Wärmeleitfähigkeiten, waren jedoch nicht ausreichend kompressionsstabil. Die Kompressionscharakteristik wurde als entscheidender Parameter für erzielbare Schalfaktoren identifiziert.
4.4 Integration von Meso-Porensystemen in textile Abstandsstrukturen	Es wurden 18 verschiedene Abstandsgestricke durch Variation von Garnen, Polfäden und Strickparametern hergestellt. Die Kompression konnte reduziert werden; bei 17 verwendeten Lagen wurde eine relative Kompression von 3,8 % erreicht. Zur Einstellung der Porengröße wurden Garne unterschiedlicher Filamentdurchmesser integriert. Die mittleren Modellporendurchmesser lagen im Bereich von 29 bis 82 µm.
4.5 Entwicklung von Konfektions- und vakuumbeständiger Abdichtungstechniken	Es wurden vakuumbeständige Konfektions- und Abdichtungstechniken untersucht. Dazu wurde ein Versuchsaufbau zur Bestimmung der Vakuumdichtigkeit von Flanschanschlüssen, Schweißverfahren und Schweißparametern aufgebaut. Metallische Dichtflächen zeigten eine höhere Dichtheit als polymerbasierte Lösungen. Ein dichter, kompakter Gasanschluss wurde konstruiert; als Fügeverfahren zum Verschließen der Paneele wurde Heischweien ausgewählt.
4.6 Aufbau der Komponente Paneel, Verifizierung von Wärmedurchgngen mit dem Kalorimeter und Optimierung der Paneel-Eigenschaften	Paneele für das Funktionsmuster Labor wurden aufgebaut. Als Füllkerne wurden sowohl vom PA bereitgestellte Materialien als auch bei FE 3 entwickelte Abstandsgestricke eingesetzt. Die Paneele wurden auf dem Einplattengert von FE 3 vermessen; der Messaufbau wurde in einem Ringversuch validiert. Mit der Entwicklung druckfester, gefllter Abstandsgestricke und der Herstellung von Paneelen für das Funktionsmuster Labor wurde AP 4 abgeschlossen.
⇒ Geringe Abweichungen zum Projektantrag: Aufgrund von sicherheitstechnischen und regulatorischen Randbedingungen konnten an FE 3 keine Versuche mit Wasserstoff durchgeführt werden. Die Experimente wurden mit Helium durchgeführt und eine Recherche zu Auswirkung von Wasserstoff auf die Materialeigenschaften angestellt. Dies hatte keine Auswirkungen auf die AP-Ziele.	
AP 5: Integration und Untersuchung der Interaktion und des Betriebsverhaltens von Paneel und Reaktor in Kombination (FE 2, FE 3)	
5.1. Konzeptionierung der vakuum- und wasserstoffgerechten Verbindung (FE 2, FE 3)	Verschiedene Verbindungstypen zwischen Paneel und Reaktor wurden berücksichtigt. Standard-Druckluftkomponenten erwiesen sich für Wasserstoffanwendungen als ungeeignet. Swagelok- und Kleinflanschanschlsse wurden als

	zielführend identifiziert. Der Gasanschluss am Paneel wurde im Projektverlauf kompakter und mit höherer Dichtigkeit ausgeführt.
5.2. Teststand-Aufbau zur Qualifizierung des Funktionsmusters „Labor“ (FM-Labor) (FE 3)	Die Messeinrichtung bei FE 3 wurde um eine Helium-Infrastruktur erweitert, um Schaltfaktoren und Schaltbereiche der Paneele unter definierten Bedingungen zu bestimmen. Damit konnten Paneele bei Drücken zwischen 0,1 und 1000 mbar mit Helium vermessen werden. Zusätzlich standen Messaufbauten zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an den beteiligten Forschungseinrichtungen zur Verfügung.
5.3. Integration von Paneel und Reaktor in FM-Labor (FE 2, FE 3)	Im Projektverlauf wurde ein geschlossener gekoppelter Aufbau aus textilbasiertem Vakuumdämmpaneel und Metallhydrid-Reaktor etabliert. Das Funktionsmuster Labor mit 30 × 30 cm Paneel, textilem Kern, Folienhülle und vakuumdichtem Gasanschluss wurde bei FE 3 aufgebaut, da dort die erforderliche Wasserstoff-Infrastruktur vorhanden war.
5.4. Charakterisierung der Eigenschaften von FM-Labor (FE 2, FE 3)	Drei textilbasierte Paneele wurden hinsichtlich ihrer wasserstoffdruckabhängigen effektiven Wärmeleitfähigkeit untersucht. Der Schaltfaktor konnte im Druckbereich von 0,01 bis 950 mbar von 3,9 bei Nadelvlies über 4,6 bei Abstandsgestrick 18 auf 6,3 bei Abstandsgestrick SG7 gesteigert werden. Das dynamische Betriebsverhalten des gekoppelten Systems wurde für ein Kernmaterial untersucht und der Funktionsnachweis für das 30 × 30 cm Funktionsmuster erbracht.
5.5. Iterative Optimierung der Poren- und Reaktorgeometrie (FE 2, FE 3)	Die Dämmpaneele wurden anhand der Charakterisierungsmessungen iterativ optimiert. Die Entwicklung führte von Nadelvlies über Abstandsgestrick 18 zu SG7 mit verbessertem Schaltfaktor. Auch die Reaktorkomponente wurde im Projektverlauf weiterentwickelt; für dynamische Untersuchungen wurde der Leichtbau-Reaktor eingesetzt, da dieser hinsichtlich des Fertigungsprozesses eine höhere Skalierbarkeit aufweist und sich entsprechend für die nachfolgende Demonstration des Funktionsmusters Gebäude besser eignet.
5.6. Recherche und Integration von Trennmechanismen zw. Reaktor und Paneel (FE 2, FE 3)	Trennmechanismen zwischen Paneel und Reaktor wurden recherchiert und mit Unternehmen des PA diskutiert. In den Funktionsmustern wurden Handventile bzw. pneumatisch vorgesteuerte Ventile eingesetzt. Für den anwendungsnahen Betrieb wurde ein kommerziell verfügbares Ventil als umsetzbare Lösung verwendet; eine anwendungsspezifische Ventilkomponente soll nach Projektende weiterverfolgt werden.
⇒ Geringe Abweichungen vom Projektantrag: Die Charakterisierung der Schaltfaktoren erfolgte ergänzend mit Helium; hierfür wurde die Messeinrichtung bei FE 3 um eine Helium-Infrastruktur erweitert. Das Funktionsmuster Labor wurde mit 30 × 30 cm statt der ursprünglich vorgesehenen 35 × 35 cm Kantenlänge aufgebaut. Als Trennmechanismus wurde ein kommerziell verfügbares Ventil eingesetzt; eine anwendungsspezifische Ventilkomponente wird nach Projektende weiterverfolgt. Der angestrebte Schaltfaktor von 10 konnte mit den Abstandsgestriken im Projekt nicht erreicht werden (s.o.) Durch weitere Optimierung der Strukturen und die Verwendung von Zwischenlagen sind Schaltfaktoren von 10 erwartbar. Dies hatte keine Auswirkungen auf die AP-Ziele.	
AP 6: Upscaling von Funktionsmuster Labor zu Funktionsmuster Gebäude und Integration in Bauteil-Demonstratoren (FE 1, FE 2, FE 3)	
6.1. Upscaling von FM-Labor auf FM-Gebäude (FE 2, FE 3)	Das Funktionsmuster wurde vom Labormaßstab auf Paneele mit 50 × 50 × 3 cm skaliert. Für das größere Funktionsmuster wurden 17 Lagen SG7 als Füllkern, kommerzielle VIP-Folie und weiterentwickelte Anschlusstechnik eingesetzt. Auch der Metallhydrid-Reaktor wurde entsprechend des vergrößerten Paneelvolumens skaliert.
6.2. Charakterisierung des Wärmetransportes des Funktionsmusters „Gebäude“ (FM-Gebäude) (FE 1)	Der Bauteildemonstrator wurde in einer Einplattenapparatur thermisch charakterisiert. Die Messungen wurden bei unterschiedlichen Druckstufen mit Helium durchgeführt. Auf Basis der Messungen wurde für den Bauteildemonstrator ein Schaltfaktor von etwa 3 erreicht.
6.3. Untersuchung von Skaleneffekten beim Upscaling des Paneelvolumens (FE 2, FE 3)	Beim Upscaling wurden Paneelvolumen, Füllkern, Folienhülle, Verbindungstechnik und Metallhydridmenge angepasst. Aus Gründen der Fertigung und Handhabbarkeit wurde statt einer einzelnen 1 × 1 m ² Paneelfläche ein modularer Aufbau aus vier 50 × 50 cm Elementen gewählt.

6.4. Adaption des FM-Gebäude in Bauteil-Demonstratoren für gegebene Anwendungsfelder (adaptive Gebäudehülle und Aktivierung von Speichermassen) (FE 1, FE 3)	Für das Anwendungsfeld adaptive Gebäudehülle wurde ein 1 m ² großer Bauteildemonstrator als Wandmodul aus vier Paneelen aufgebaut. Die Paneele wurden in einen speziellen Rahmen aus Styrodur mit kreuzförmiger Holzversteifung integriert und mit Dichtband abgedichtet. Das Anwendungsfeld „Aktivierung von Speichermassen“ wurde nicht als Demonstrator aufgebaut; die entsprechenden Untersuchungen wurden in den numerischen Teil (AP 2) verlagert.
6.5. Untersuchung und Optimierung von Rand- und Verbundeffekten (FE 1, FE 3)	Der modulare Aufbau ermöglichte die Untersuchung der Verbindung mehrerer Paneele einschließlich Gasanschluss und Verteiler. Rand- und Verbundeffekte wurden konstruktiv durch Rahmen, Dichtband und austauschbare Einzelpaneele adressiert.
6.6. Erarbeitung von Systemkonzepten für eine modulare Bauweise für seriellles Bauen/Sanieren (FE 1, FE 2, FE 3)	Der modulare Aufbau des Demonstrators bildet eine mögliche Grundlage für eine spätere Überführung in vorgefertigte, serielle Fassadenelemente. Die Erfahrungen zeigen, dass Modularität der Paneele und Dezentralisierung der Versorgung mit Wasserstoff durch einzelne Demonstratoren wichtig für die Realisierung sein werden. Auch bei perspektivisch höherer Robustheit und längeren Standzeiten der Paneele müssen mögliche Undichtigkeiten oder ähnliche Probleme während der Standzeit stets im Konzept mitgedacht werden. Konkrete Systemkonzepte für eine modulare Bauweise wurden im Projektrahmen nicht im Detail ausgearbeitet, jedoch die experimentelle Untersuchung der Verschaltung mehrerer Paneele an einem Reaktor als Grundlage hierfür untersucht.
⇒ Geringe Abweichungen vom Projektantrag: Die thermische Charakterisierung des Funktionsmusters Gebäude im Wärmestrommessgerät wurden mit Helium statt Wasserstoff durchgeführt. Aus Fertigungs- und Handhabungsgründen wurde statt einer einzelnen (1 × 1) m ² Paneelfläche ein modularer Aufbau aus vier 50 cm × 50 cm Elementen gewählt. Im Antrag wurde eine Skalierung des Volumens um den Faktor 10 angestrebt. Durch den modularen Aufbau wurde das Einzelpaneel nur um den Faktor 3 skaliert. Das gefertigte Modul jedoch um Faktor 12. Das Anwendungsfeld Aktivierung von Speichermassen wurde aufgrund der Ergebnisse an der Fassade (Lagenverhalten/Porengröße bei vertikaler Orientierung) nicht experimentell, sondern numerisch (AP 2) untersucht. Systemkonzepte für eine serielle Bauweise wurden nur grundlegend erarbeitet. Dies hatte keine wesentlichen Auswirkungen auf die AP-Ziele.	
AP 7: Erprobung und Test des Funktionsmusters Gebäude (FE 1, FE 2, FE 3)	
7.1. Festlegung der Untersuchungsrandbedingungen/-varianten für die Anwendungsfelder (FE 1)	Für die Erprobung wurde ein vereinfachtes Modell eines Raumes ausgelegt. Als Referenz diente ein 1-Personen-Büro mit fünf innenliegenden adiabaten Wänden und einer außenliegenden Wand. Der Modellraum wurde mit 1 × 1 × 1 m ³ ausgeführt, wobei der Wärmestrom über die Außenwand durch einen entsprechend erhöhten U-Wert auf den kleineren Maßstab übertragen wurde.
7.2. Aufbau der Bauteil-Demonstratoren in Testumgebung (FE 1)	Der Modellraum wurde im Raumluftrömungslabor aufgebaut. Die Außenwand wurde so ausgeführt, dass die vier Paneele des Funktionsmusters Gebäude eingesetzt werden konnten. Sensorik für Innen- und Außenlufttemperaturen, Paneeletemperaturen, Wärmestrom und Systemdruck wurde integriert. Die Gasarmaturen wurden so aufgebaut, dass Versuche mit Reaktor oder Heliumflasche möglich waren.
7.3. Technologieerprobung anhand der Bauteil-Demonstratoren in Testumgebung (Typtagverfahren im Klimalabor) (FE 1)	Der anwendungsnahe Demonstratorprüfstand wurde in Betrieb genommen. Hierzu gehörten Dichtigkeitsprüfungen der Paneele sowie Prüfungen der Gesamtkonstruktion auf Undichtigkeiten und Wärmebrücken. In Versuchen mit konstanten Randbedingungen sowie mit verkürzten Tagesprofilen wurde die Wirkung der regelbaren Fassade untersucht. In einem Tagesprofilversuch konnten die Übertemperaturstunden um 22,6 % reduziert werden.
7.4. Analyse unterschiedlicher Regelungsstrategien (Reaktionszeiten etc.) (FE 1)	Es wurden unterschiedliche Betriebsweisen untersucht. In einer Kampagne wurde der Systemdruck binär erhöht und anschließend wieder abgesenkt. In einer weiteren Kampagne wurde der Druck stufenweise eingestellt und nach jeder Stufe durch Schließen des Ventils gehalten. Damit wurde die gezielte Einstellbarkeit verschiedener Druckniveaus über die Temperatursteuerung der Peltier-Elemente nachgewiesen.
7.5. Optimierung der Eigenschaften der Komponenten (FE 1, FE 2, FE 3)	Im Rahmen der Inbetriebnahme wurden Undichtigkeiten identifiziert und behoben sowie Wärmebrücken sichtbar gemacht. Die Versuchsergebnisse zeigten außerdem Optimierungsbedarfe beim Gastransport im großflächigen Paneel und

	bei der Überlappung des Paneel-Übergangsbereichs mit dem Arbeitsdruckbereich des Reaktors.
7.6. Bewertung der Systemeigenschaften und Raumklimawirkung hinsichtlich der Eignung für unterschiedliche Einsatzbereiche (FE 1, FE 2, FE 3)	Die Demonstration bestätigte die Funktionsfähigkeit des adaptiven Dämmkonzepts im gebäuderelevanten Maßstab. Thermochemische Druckaktuierung, knudsenbasierte Leitfähigkeitsschaltung und Modulation des Wärmestroms wurden im 1 m ² Maßstab realisiert. In den Messkampagnen sank die Raumlufttemperatur bei erhöhter Leitfähigkeit um mehrere Kelvin; die Auswertung des Tagesprofils zeigte eine Reduktion der Übertemperaturstunden. Experimente am Demonstrator wurden lediglich für den Einsatzbereich der Außenfassade durchgeführt und die Kapazitäten für detailliertere Versuche mit Tagesprofilen und Simulationen der Speichermassen (AP 2) genutzt.
⇒ Geringe Abweichungen vom Projektantrag: Die Versuche mit Speichermassen am Demonstratorprüfstand wurden nicht experimentell durchgeführt, sondern stattdessen verstärkt in AP 2 in den Simulationen thematisiert. Somit wurden in AP 7.6 ausschließlich der Anwendungsfall der Außenfassade experimentell und dafür in verschiedenen Szenarien wie mehreren verschiedenen Tagesprofilen untersucht.	
AP 8: Öffentlichkeitsarbeit und Berichterstellung (FE 1, FE 2, FE 3)	
8.1. Regelmäßige Information der beteiligten KMU (FE 1, FE 2, FE 3)	Die beteiligten KMU wurden über Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses sowie laufende schriftliche Informationen in den Projektfortschritt eingebunden. Darüber hinaus erfolgte der Ergebnistransfer über Webseiten der Forschungseinrichtungen, Jahresberichte, Publikationen in wissenschaftlichen Fachjournalen, einem verschriftlichten Interview, Vorträge, Poster, Fachveranstaltungen und Messeauftritte.
8.2. Fertigstellung der Zwischenberichte und des Endberichts (FE 1, FE 2, FE 3)	Die Zwischenberichte und der Schlussbericht wurden fertiggestellt.
⇒ Keine Abweichungen vom Projektantrag	

2 Verwendung der Zuwendung

Die durchgeführten Arbeiten richteten sich auf die Umsetzung der in den Arbeitsschritten angestrebten Projektzielstellungen und entsprechen dem im Antrag skizzierten Lösungsweg. Die geleisteten Arbeiten und eingesetzten Mittel für Personal und Verbrauchsmaterial waren inhaltlich und in vollem Umfang angemessen und notwendig.

wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

2022: FE1 (IGTE): HPA-A: 0,9 PM; FE2 (DLR): HPA-A: 1,63 PM; FE3 (DITF): HPA-A: 3,45 PM

2023: FE1 (IGTE): HPA-A: 10,25 PM; FE2 (DLR): HPA-A: 8,94 PM; FE3 (DITF): HPA-A: 4,5 PM, HPA-B: 1,03 PM

2024: FE1 (IGTE): HPA-A: 7,95 PM; FE2 (DLR): HPA-A: 10,9 PM; FE3 (DITF): HPA-A: 11,59 PM

2025: FE1 (IGTE): HPA-A: 9,6 PM; FE2 (DLR): HPA-A: 6,37 PM; FE3 (DITF): HPA-A: 4,22 PM

Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

2022: Keine

2023: FE3 (DITF): Vakuumkammer: 6.990,- € netto, Vakuumpumpe: 3.140,- € netto

2024: Keine

2025: Keine

Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

2022-25: Keine

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle Arbeiten der Forschungseinrichtungen im Berichtszeitraum waren zur Erreichung der Projektziele notwendig und angemessen. Die Notwendigkeit der durchgeführten Arbeiten ergibt sich aus der interdisziplinären Aufgabenstellung des Vorhabens, regelbare Vakuumdämmelemente nicht nur konzeptionell zu untersuchen, sondern die wesentlichen Systemkomponenten zu entwickeln, zu charakterisieren, miteinander zu koppeln und in stofflicher Verbindung mit einem anwendungsnahen Demonstrator zu erproben. Hierfür waren sowohl simulative als auch experimentelle Untersuchungen erforderlich. Die numerischen Arbeiten dienten der Bewertung von Einsatzszenarien, Energieeinspar- und Flexibilisierungspotenzialen sowie der Ableitung geeigneter Regelungsstrategien. Parallel dazu waren umfangreiche experimentelle Arbeiten zur Auswahl und Charakterisierung geeigneter Metallhydridmaterialien, zur Entwicklung eines thermisch ansteuerbaren Reaktors, zur Herstellung textiler Vakuumdämmpaneele mit definierten Poren- und Kompressions-eigenschaften sowie zur Untersuchung der Kopplung von Reaktor und Paneel erforderlich. In enger Zusammenarbeit der Forschungseinrichtungen wurden Simulation, Materialentwicklung- und charakterisierung, Komponentenentwicklung und messtechnische Erprobung aufeinander abgestimmt. Die Bearbeitung wurde im Projektverlauf fortlaufend anhand der gewonnenen Erkenntnisse angepasst, beispielsweise bei der Optimierung der textilen Füllstrukturen, der Abdichtungs- und Verbindungstechnik, der Reinigungsprozesse der Dämmkernmaterialien zur Sicherstellung eines reproduzierbaren Reaktorbetriebs sowie der Auslegung der skalierten Funktionsmuster. Die durchgeführten Arbeiten führten zum Aufbau einer speziell für regelbare Dämmelemente geeigneten umfangreichen Simulationsumgebung hinsichtlich Energieeinspar- und Flexibilisierungspotentialen, zum experimentellen Funktionsnachweis der regelbaren Vakuumwärmedämmung im

Labormaßstab, zur Charakterisierung der druckabhängigen Wärmeleitfähigkeit und zur Erprobung eines skalierten Fassadendemonstrators unter anwendungsnahen Randbedingungen. Damit waren Umfang, Tiefe und Methodik der geleisteten Arbeiten angemessen, um die wissenschaftlich-technischen Fragestellungen des Vorhabens fundiert zu bearbeiten und die erzielten Ergebnisse belastbar zu bewerten.

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Der Darstellung des Nutzens der Ergebnisse wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse in Form von vier Kernaussagen vorangestellt. Diese sind den wesentlichen Schwerpunktthemen des Projekts zuzuordnen:

- der simulativen Bewertung des Potentials regelbarer Wärmedämmelemente in Gebäudehüllen und zur Nutzung thermischer Speichermassen,
- der Entwicklung einer thermochemischen Gasdruckaktuierung auf Basis eines Metallhydrid-Reaktors,
- der Entwicklung textiler Vakuumdämmpaneele mit definierten Poren- und Kompressionseigenschaften,
- der Kopplung des Gesamtsystems aus Paneel und Reaktor sowie der Skalierung der Funktionsmuster.

Die numerischen Untersuchungen zeigen, dass regelbare Wärmedämmelemente vor allem zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs und zur flexiblen Nutzung thermischer Speichermassen beitragen können. Für regelbare Außenwände hängt das Potenzial insbesondere vom Schaltfaktor, vom Fensterflächenanteil, von internen Lasten, vom Sonnenschutz, von der Speicherkapazität und vom vorhandenen Wandaufbau ab. In den untersuchten Varianten konnten bei kleinen Fensterflächenanteilen Kühlenergieeinsparungen von bis zu 70 % erreicht werden. Gleichzeitig zeigt sich, dass der zusätzliche Nutzen sehr hoher Schaltfaktoren durch Wärmeübergänge, verfügbare Temperaturdifferenzen und die vorhandene Speicherkapazität begrenzt wird.

Für die regelbare Innenwand ohne externe Beladung steht im Unterschied zur regelbaren Außenwand die passive Nutzung der vorhandenen raumseitigen Speichermasse im Vordergrund. Im Kühlfall kann eine stärkere thermische Kopplung vorteilhaft sein, da Wärme während der Belegung in die Speichermasse aufgenommen und teilweise in unbelegte Zeiten verschoben wird. Im Heizfall ist dagegen die thermische Entkopplung vorteilhaft, weil während der Wiederaufheizung zu Beginn der Belegung weniger Wärme in die Speichermasse abgegeben wird. Das Potenzial ist dabei stark vom energetischen Standard der Außenwand und vom Verhältnis zwischen Heiz- und Kühlenergiebedarf abhängig.

Die regelbare Innenwand mit externer Beladung dient der zeitlichen Verschiebung der Raumkonditionierung. Ein Teil der während der Belegung vorliegenden Heiz- beziehungsweise Kühllast wird durch die Speicherbeladung außerhalb der Belegungszeit vorbereitet und während der Belegung über die Innenwand an den Raum abgegeben. Dadurch wird der Einsatz des idealen Heiz-/Kühlsystems während der Nutzungszeit reduziert. In einer optimierten Variante sinkt der verbleibende Gesamtenergiebedarf des idealen Heiz-/Kühlsystems um rund 19 % gegenüber der Referenz ohne aktive Speicherfunktion. Dieser Wert beschreibt die Entlastung des idealen Systems infolge der vorgelagerten Speicherbeladung und der anschließenden Speichernutzung während der Belegung.

Insgesamt liefern die Simulationen für Fachplaner eine anwendungsbezogene Bewertungsgrundlage zum Einsatz regelbarer Bauteile. Sie zeigen, unter welchen Randbedingungen adaptive Außen- und Innenbauteile zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs, zur Nutzung vorhandener Speichermassen oder zur zeitlichen Verschiebung der Raumkonditionierung beitragen können. Für die praktische Anwendung sind die Ergebnisse insbesondere für Raumzonen mit hohen solaren oder inneren Lasten, für Gebäude mit nutzbarer thermischer Speichermasse sowie für Betriebsstrategien mit zeitlich variierender Belegung relevant. Die Auslegung muss dabei immer gemeinsam mit Schaltfaktor, Speicherkapazität, Außenwandqualität, Nutzung und Regelstrategie bewertet werden.

Die zweite Kernaussage betrifft den Metallhydrid-Reaktor. Im Projekt konnte gezeigt werden, dass eine eigenständige thermochemische Reaktionseinheit grundsätzlich geeignet ist, den Gasdruck in einem Vakuumdämmpaneel reversibel und dynamisch einzustellen. Durch die räumliche Trennung von Reaktor und Paneel wird das Reaktionsmaterial gezielt und bedarfsgerecht als Gasdruckaktuator temperiert. Im Gegensatz zum Stand der Technik ist entsprechend eine aktive bidirektionale, stufenlose Gasdrucksteuerung möglich, die Reaktionseinheit kann unabhängig vom thermischen Paneelzustand betrieben und in ihrem Design und Betriebsverhalten hinsichtlich Dynamik und Effektivität optimiert werden. Die ausgewählte Metallhydrid-Legierung ermöglicht die Einstellung des relevanten Druckbereichs (1-1000 mbar) durch technisch sinnvolle Temperaturänderungen (-5-150 °C), was ebenfalls einen Vorteil zum bisherigen Forschungsstand darstellt. Der experimentelle Funktionsnachweis des Reaktors zeigt, dass sowohl Druckerhöhungen als auch Druckabsenkungen im für die adaptive Dämmung relevanten Bereich möglich sind. Gleichzeitig wurden im Projekt wichtige technische Grenzen identifiziert, insbesondere die längeren Zeiten bei der Druckabsenkung im niedrigen Druckbereich sowie der Einfluss des Stofftransports im Vakuum. Hinsichtlich der weiteren Reaktorentwicklung zur gezielten Gasdruckeinstellung sind Abstimmungsgespräche mit KMU aus dem Bereich der additiven metallischen Fertigung sowie der mechanischen Aktuierung durch Formgedächtnislegierungen im Gange. Weiterhin gibt es Bestrebungen, die thermochemische Gasdrucksteuerungseinheit mit kommerziellen Vakuumisulationspaneelen zu koppeln. Hier wurde in Zusammenarbeit mit KMU ein Projektkonsortium aufgestellt.

Die dritte Kernaussage betrifft die Entwicklung des textilen Vakuumdämmpaneels. Der Nutzen des Vorhabens liegt hier insbesondere in der systematischen Herausarbeitung der Anforderungen an textile Füllkerne für regelbare Dämmelemente. Die Untersuchungen zeigen, dass nicht allein die Wärmeleitfähigkeit des textilen Materials relevant ist, sondern insbesondere das Zusammenwirken von Porenstruktur, Kompressionsverhalten, Vakuumbeständigkeit, Ausgasungsverhalten, Dauerfestigkeit und Dichtheit des Gesamtsystems. Die entwickelte textile Kernstruktur muss unter Vakuumbedingungen ausreichend druckstabil sein, gleichzeitig aber eine Porenstruktur aufweisen, bei der die gasdruckabhängige Wärmeleitung im gewünschten Druckbereich wirksam wird. Mit den entwickelten Abstandsgestricen wurde ein Ansatz erarbeitet, der die notwendige mechanische Stützfunktion mit gezielt einstellbaren Poreneigenschaften verbindet. Gleichzeitig wurden durch die Herstellung und Prüfung von Paneelen wesentliche Erkenntnisse zur Folientechnik, zum Gasanschluss, zu Fügeverfahren und zu Reinigungsprozessen gewonnen. Diese Ergebnisse sind unmittelbar für Unternehmen (hoher KMU-Anteil) nutzbar, die Abstandstextilien, technische Textilien, Vakuumisulationspaneel, Folienlamine, Gasanschlüsse oder vakuumdichte Baugruppen entwickeln und fertigen.

Die vierte Kernaussage betrifft die Kopplung und Skalierung des Systems. Im Projekt konnte der experimentelle Funktionsnachweis der regelbaren Vakuumwärmedämmung zunächst im Labormaßstab durch die Kopplung von Metallhydrid-Reaktor und textilem Vakuumdämmpaneel erbracht werden. Dabei wurde die

gasdruckabhängige Veränderung der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene textile Paneelvarianten charakterisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Paneele einen messbaren Schalteffekt (Faktor 4-6 auf Komponentenebene) aufweisen und dass durch Weiterentwicklung der textilen Struktur eine Steigerung des Schaltfaktors erreicht werden kann. Gleichzeitig wurde sichtbar, dass die Dynamik des Gesamtsystems nicht allein durch den Reaktor bestimmt wird, sondern auch durch Gastransportprozesse im Paneel, die Zuleitung und durch die Porenstruktur des Füllkerns. Der anschließende Schritt zum Funktionsmuster Gebäude und zum Bauteildemonstrator zeigt, dass das Grundprinzip auf größere Bauteilabmessungen übertragbar ist. Der erreichte Schaltfaktor von 6,3 blieb zwar unter dem angestrebten Wert von 10, der Demonstrator zeigt jedoch die prinzipielle Funktionsfähigkeit des skalierten Systems. Das auf Systemebene ermittelte thermische Schaltverhältnis beträgt ca. 3, die Innenraumtemperatur konnte unter konstanter Wärmelast um bis zu 4 K abgesenkt werden. Die nächsten Optimierungsschritte zielen in Richtung Kompaktierung des Gesamtsystems. Denkbar dafür ist eine geeignete Integration der Reaktionseinheit in den Dämmpaneelen, um die Stofftransportstrecke zu minimieren, jedoch weiterhin mit einer gezielten, eigenständigen Aktuierung von außen [20]. Dafür notwendig ist etwa eine kompakte Ventillösung, z.B. auf Basis von Formgedächtnislegierungen und unter Einbeziehung entsprechender KMU.

Aus diesen Ergebnissen wird folgender wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen sowie innovativer Beitrag abgeleitet.

Ein wesentlicher wissenschaftlich-technischer Nutzen liegt in der geschaffenen methodischen Grundlage zur Bewertung regelbarer Wärmedämmelemente im Gebäudekontext. Die entwickelte Simulationsumgebung erlaubt es, adaptive Bauteile in Jahressimulationen und Variantenstudien zu betrachten und dabei die zeitliche Veränderung von Bauteileigenschaften, Regelungsstrategien und bauphysikalische Randbedingungen abzubilden. Für KMU aus den Bereichen Gebäudeplanung, Fassadentechnik, Bauphysik, Technische Gebäudeausrüstung, Gebäudesimulation und Energieberatung ergibt sich daraus ein konkreter Nutzen, da die Ergebnisse eine fundierte Einordnung ermöglichen, unter welchen Randbedingungen regelbare Wärmedämmungen sinnvoll eingesetzt werden können. Dies reduziert Entwicklungsrisiken und unterstützt die frühe Bewertung möglicher Produkte, ohne bereits kostenintensive Prototypen in großem Maßstab herstellen zu müssen.

Für Hersteller von Fassaden-, Wand- und Sanierungssystemen besteht der Nutzen insbesondere in der Identifikation geeigneter Integrationskonzepte. Die Projektergebnisse zeigen, dass regelbare Dämmelemente aufgrund ihrer technischen Komplexität, der erforderlichen Gasführung, der Anschlusstechnik und der Schutzanforderungen besonders für modulare bzw. vorgefertigte Bauteilsysteme geeignet erscheinen. Damit ergeben sich zukünftig und nach Erreichen des nötigen Technologie-Reifegrads industrielle Anwendungsmöglichkeiten insbesondere im seriellen Bauen, im Modulbau, im Fertighausbau und perspektivisch in der seriellen Sanierung. Dort können Paneele, Verteiler, Anschlüsse und Reaktoreinheiten bereits bei der Fertigung im Werk integriert, geprüft und qualitätsgesichert werden. Dies ist für KMU von besonderer Relevanz, da sich neue Produktsegmente im Bereich vorgefertigter Fassaden- und Wandmodule erschließen lassen, ohne dass die gesamte Wertschöpfungskette zwingend bei einem einzelnen Unternehmen liegen muss.

Ein weiterer Nutzen ergibt sich für KMU aus dem Bereich der technischen Textilien. Im Projekt wurde gezeigt, dass textile Abstandsgestricke grundsätzlich als Füllkern regelbarer Vakuumdämmpaneele geeignet sind, sofern Porenstruktur und Kompressionsverhalten gezielt ausgelegt werden. Die dafür erforderlichen Eigenschaften unterscheiden sich deutlich von Standardanforderungen an textile Dämm- oder Stützmaterialien. Damit entsteht ein neues Anforderungsprofil für technische Textilien, das für Hersteller von

Abstandsgestricken, Spezialgarnen, textilen Halbzeugen und textilen Verstärkungsstrukturen wirtschaftlich interessant sein kann. Die Projektergebnisse zeigen zugleich, welche textiltechnischen Parameter für eine Weiterentwicklung entscheidend sind: reduzierte Kompression unter Vakuumlast, geeignete Porengrößenverteilung, geringe Ausgasung, Reinigbarkeit, Dauerfestigkeit und Kompatibilität mit Folien- und Füge-technik. Weiterhin wurde im Projekt gezeigt, mit welchem Garn und unter welchen Prozessparametern auf Rundstrickmaschinen kompressionssteife Abstandsgestricke realisiert werden können. Dies kann Grundlage für die Entwicklung von neuen textilen Produkten sein.

Für Hersteller von Vakuumisulationspaneelen und vakuumdichten Verpackungs- bzw. Folientechnologien liegen ebenfalls direkte Anknüpfungspunkte vor. Regelbare Vakuumdämmpaneele stellen gegenüber konventionellen Vakuum-Isulations-Paneelen (VIP) eine funktionale Erweiterung dar, weil nicht nur ein möglichst dauerhaft niedriger Innendruck gehalten werden muss, sondern ein definierter und wiederholbar veränderbarer Gasdruck im Paneel eingestellt wird. Dadurch steigen die Anforderungen an Dichtheit, Gasanschluss, Langzeitstabilität, Fügeverfahren und Qualitätssicherung. Das im Projekt erarbeitete Wissen zu Folien, Schweißnähten, Flanschanschlüssen, Leckageverhalten und Wasserstoffdichtheit kann von KMU genutzt werden, um bestehende VIP-Technologien in Richtung adaptiver Bauteile weiterzuentwickeln.

Der Metallhydrid-Reaktor bietet wirtschaftliche Anschlussmöglichkeiten für Unternehmen aus den Bereichen thermochemische Energiesysteme, Wasserstofftechnik, additive Fertigung, Wärmemanagement, Ventiltechnik und Aktorik. Die im Projekt untersuchten Reaktorkonzepte zeigen, dass funktionsintegrierte Reaktorstrukturen, geringe thermische Massen, angepasste Wärmeübertragung und eine zuverlässige stoffliche Kopplung zum Paneel zentrale Entwicklungsfelder darstellen. Besonders relevant ist hierbei die Möglichkeit, Reaktorkomponenten additiv zu fertigen und dabei Funktionen wie Filter, Wärmeleitstrukturen oder Strömungsführung konstruktiv zu integrieren. Für KMU aus dem Bereich metallischer 3D-Druck eröffnet dies ein Anwendungsfeld, über die regelbaren Dämmsysteme hinaus auch für andere thermochemische oder wasserstofftechnische Systeme.

Der wesentliche innovative Beitrag des Forschungsvorhabens ReVaD liegt im Gesamtkonzept der regelbaren Vakuumwärmedämmung mit externem Metallhydrid-Reaktor und textilem Paneelkern. Gegenüber bekannten schaltbaren Dämmsystemen basierend auf dem Knudsen-Effekt besteht der Fortschritt darin, dass die Gasdruckeinstellung nicht durch ein dauerhaft offenes Pump- oder Gasversorgungssystem erfolgt, sondern über ein reversibles thermochemisches Speichermaterial. Die Trennung von Reaktor und Paneel über ein Ventil ermöglicht eine gezielte, bedarfsgerechte Temperierung des Reaktionsmaterials und schafft die Grundlage für eine dynamische, bidirektionale, stufenlos steuerbare, effiziente Betriebsweise. Gleichzeitig erlaubt die Gasdruckregelung eine Anpassung der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Paneels. Damit wird ein Bauteilkonzept verfolgt, das zwischen hochdämmendem Zustand und stärker wärmeleitendem Zustand wechseln kann und auch Zwischenzustände zulässt.

Der wirtschaftliche Nutzen für KMU besteht in einer deutlich verbesserten Wissens- und Entwicklungsgrundlage für adaptive Gebäudehüllen und regelbare Bauteilsysteme. Das Vorhaben liefert belastbare Aussagen dazu, welche Teilsysteme bereits funktionsfähig sind, welche technischen Parameter für den Gebäudebetrieb maßgeblich sind und an welchen Stellen noch Entwicklungsbedarf besteht. Gerade für KMU ist diese vorwettbewerbliche Einordnung relevant, da sie Investitionsentscheidungen, Produktstrategien und Kooperationsansätze unterstützt. Unternehmen können auf Basis der Ergebnisse besser abschätzen, ob sie sich in den Bereichen textile Füllkerne, VIP-Folien, Fassadenmodule, Reaktorfertigung, Ventiltechnik, Sensorik, Regelung oder Planung adaptiver Gebäudehüllen positionieren wollen.

Darüber hinaus ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der thermischen Aktivierung und Nutzung von Speichermassen. Regelbare Innenwandelemente können dazu dienen, Speichermassen zeitweise an den Raum zu koppeln oder von ihm zu entkoppeln. In Kombination mit aktiver Beladung, beispielsweise durch elektrische Heizmatten oder wasserführende Systeme, kann daraus ein Ansatz zur Lastverschiebung und zur Nutzung zeitvariabler Energiepreise entstehen. Für Hersteller von Flächenheizungen, Deckenheizsystemen, Bauteilaktivierungssystemen und MSR-Technik ergibt sich daraus ein mögliches Erweiterungsfeld, bei dem regelbare Dämmung und thermische Bauteilaktivierung funktional kombiniert werden.

Für Planungsbüros und Energieberatungsunternehmen liegt der Nutzen vor allem in der verbesserten Bewertbarkeit adaptiver Gebäudehüllen. Die Projektergebnisse zeigen, dass das energetische Potenzial nicht pauschal bewertet werden kann, sondern wesentlich von Bauteilaufbau, Regelstrategie, klimatischen Randbedingungen, Fensterflächenanteil, Sonnenschutz, Speichermasse und Nutzungsprofil abhängt. Damit entsteht Bedarf an geeigneten Planungs- und Simulationswerkzeugen. KMU aus der Planung können die Ergebnisse nutzen, um denkbare Nutzungsvarianten regelbarer Dämmelemente in der Konzeptionierungsphase einzuordnen und nicht geeignete Anwendungsfälle zu vermeiden. Dies gilt insbesondere für Bestandsgebäude, bei denen vorhandene Wandaufbauten den nutzbaren Schaltfaktor begrenzen können.

Die Untersuchungen am anwendungsnahen Demonstrator liefern einen praktischen Nutzen für die weitere Produktentwicklung. Durch den Aufbau eines skalierten Fassadendemonstrators wurde Forschungsbedarf erkannt, der in reinen Laborversuchen an Einzelkomponenten nicht vollständig erfasst werden konnte. Dazu gehören Montage, Dichtheit, Wärmebrücken, Gasverteilung auf mehrere Paneele, Austauschbarkeit einzelner Module, Anschlussführung, Messbarkeit des Wärmedurchgangs und Betriebsverhalten unter realitätsnahen Temperaturbedingungen. Damit adressiert der Demonstrator den Übergang von der Grundlagenforschung zu einer ersten anwendungsorientierten Erprobung. Für KMU ist dieser Schritt besonders wertvoll, da viele spätere Entwicklungsrisiken bereits auf Demonstratorebene erkannt werden können.

Eine wesentliche Besonderheit des Forschungsvorhabens liegt schließlich in der Zusammenführung bisher getrennter Kompetenzfelder: Gebäudesimulation, Bauphysik, Wasserstoff- und Metallhydridtechnik, technische Textilien, Vakuumtechnik, Folientechnik, Fassadenbau und Regelungstechnik. Gerade diese Systemperspektive ist mit Blick auf eine künftige Anwendung entscheidend, da regelbare Vakuumdämmelemente nicht für sich allein, sondern nur im Zusammenspiel als funktionale Baugruppe aus Paneel, Reaktor, Gasführung, Dichtung, Regelung, Sensorik und baulicher Integration wirken. Das Vorhaben schafft damit eine Grundlage für weitere kooperative Entwicklungsarbeiten zwischen Forschungseinrichtungen und KMU.

Insgesamt leisten die erzielten Ergebnisse einen innovativen Beitrag zur Entwicklung adaptiver Gebäudehüllen und regelbarer thermischer Bauteile. Das Projekt zeigt, dass eine regelbare Vakuumwärmedämmung auf Basis eines textilen Paneels und eines externen Metallhydrid-Reaktors prinzipiell realisierbar ist, energetische Potenziale in geeigneten Anwendungsfällen bestehen und eine Übertragung vom Labormaßstab in einen anwendungsnahen Demonstrator möglich ist.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Die im Verlauf der Projektbearbeitung umgesetzten sowie die für die Zeit nach Projektabschluss vorgesehenen Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft sind in den nachfolgenden Tabellen aufgeführt. Durch den kontinuierlichen Austausch mit Unternehmen, insbesondere mit KMU aus den Bereichen metallischer 3D-Druck, Vakuumisolutionspaneele, Aktorik, Bauteilaktivierung, Modulwandbau sowie Heiz- und

Deckensysteme, konnte bereits während der Projektlaufzeit eine enge Rückkopplung zwischen Forschungsergebnissen und industriellen Anwendungsmöglichkeiten hergestellt werden. Auch nach Projektende bestehen konkrete Austausch- und Kooperationsansätze fort. Hierzu zählen insbesondere Gespräche zur Weiterentwicklung additiv gefertigter, funktionsintegrierter Reaktorkomponenten, etwa mit integrierten Filterstrukturen und optimierter Strömungsführung, sowie zur Nutzung gedruckter Filtertechnologien über den konkreten Reaktor Anwendungsfall hinaus. Darüber hinaus bestehen konkrete Planungsgespräche mit Unternehmen aus dem Bereich der VIP-Paneele, die ein hohes Interesse an der Mitentwicklung adaptiver Dämmkomponenten und deren Aufnahme in bestehende Produktportfolios zeigen. Durch die Netzwerkbildung und Öffentlichkeitsarbeit im ReVaD-Projekt konnten zudem Kooperationsgespräche zu Bauteilaktivierungssystemen, Modulwandlösungen sowie Deckenheizungssystemen initiiert werden. Insbesondere im Bereich der Deckenheizungssysteme besteht ein hohes Interesse, adaptive Dämmkomponenten zukünftig in bestehende Systemlösungen zu integrieren. Laufende Gespräche zur Bildung von Projektkonsortien und entsprechende Anträge bestätigen dies. Die umgesetzten und geplanten Transfermaßnahmen tragen damit dazu bei, die erzielten Forschungsergebnisse gezielt in industrielle Entwicklungsprozesse zu überführen und insbesondere KMU frühzeitig in die Weiterentwicklung und Verwertung der Technologie einzubinden.

5.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende)

⇒ Maßnahme	⇒ Ziel	⇒ Ort / Rahmen	⇒ Datum/ Zeit- raum
Information der Unternehmen des PA	Direkter Ergebnistransfer in die Wirtschaft sowie Erfassung aktu- eller Problemstellungen	PA-Sitzungen (mindestens 4)	IV/2022 III/2023 II/2024 IV/2024
	Information zum Stand des For- schungsvorhabens	Informationsschreiben an PA- Mitglieder	jährlich
	Fachdiskussion/ Beratung vor Ort	Fachdiskussion/ Beratung vor Ort	Fachdiskussion/ Beratung vor Ort
Realisierung: • PA-Sitzung am 03.05.2023 in Präsenz an den DITF in Denkendorf (Onlineteilnahme möglich) • PA-Sitzung am 17.10.2023 in Präsenz am DLR in Stuttgart (Onlineteilnahme möglich). • PA-Sitzung am 14.05.2024 (online) • PA-Sitzung am 20.11.2024 (online) • PA-Sitzung am 13.05.2025 (online) • PA-Sitzung am 05.11.2025 in Präsenz am IGTE in Stuttgart (Onlineteilnahme möglich).			
Der PA wurde darüber hinaus laufend schriftlich über Fortschritte informiert.			
Publikation von Projektinfor- mationen im Internet	Projektinformation/ Transfer für breites Fachpublikum	Website von IGTE, DLR, DITF und VdF HLK, DITF-Newsletter	ab III/2022
		Jahresberichte der FE und For- schungsvereinigung	IV/2022-II/2024
Realisierung: • Die Webseiten der drei FE berichten seit III/2022 über den Stand des Projekts. • FE 1: https://www.igte.uni-stuttgart.de/forschung/abgeschlossene/revadprojekt/ • FE 2: https://www.dlr.de/de/tt/forschung-transfer/projekte/abgeschlossene-projekte/2025/revad • FE 3: https://www.ditf.de/de/aktuelles/pressemeldungen/detail/vakuumdaemmelemente-neu-gedacht-regelbar-bedarfsgerecht-flexibel/ • Im HLK-Brief der Forschungsvereinigung wurde jährlich über das Projekt berichtet. (FE 1) • Ausführliche Projektbeschreibung https://www.dlr.de/en/tt/latest/news/2025/revad-adaptive-vacuum-insula-tion-for-energy-efficient-buildings-of-the-future (FE 3) • Im DITF Jahresbericht 2023 wurde über das Projekt berichtet. (FE 3)			

- Interview zum Projekt, Präsentation der Technologie in Architektur und Bau (FE 2, FE 3) https://www.stylepark.com/de/news/fassade-bau-daemmung-texpertise-revad-forschung-stylepark-magazin - Bewerbung aller online-Veröffentlichung mit entsprechenden In Beiträgen.			
Vorstellung der Projektergebnisse	Präsent. auf Fachtagungen; Ergebnisinformation durch Poster für breites Fachpublikum	DKV-Tagung (2023, 2024)	IV 2023; IV/2024
		ADD Textiltagungen Chemiefasertagung Dornbirn	IV/2022, IV/2023 III/2023
		TGA-Kongress	II/2024
		Advanced Building Skins	IV/2024
		2 Veröffentlichungen/ Jahr bei internationalen Konferenzen	regelmäßig
Realisierung: Vorträge und Poster 22.11.2023, DKV-Tagung 2023, Hannover, Vortrag (FE 1) 20.03.2023, IPM network Talks, Filderstadt, Vortrag (Pauly (FE 3), Felbinger (FE 2)) 30.06.2023, Int. Conference on Construction, Energy, Environment & Sustainability (CEES), Vortrag ((FE 2)) 24.-25.06.2023, Gordon Research Seminar (GRS) Hydrogen-Metal Systems, Poster Vorstellung (FE 2) 28.-29.10.2024, Kongress der Advanced Building Skins 2024 in Bern, Schweiz, Vortrag (FE 1) 10.-11.04.2024, 3rd International Sustainable Energy Conference (ISEC) 2024 in Graz, Österreich, Vortrag (FE 2) 10.-13.06.2024, 9th European Thermal Science Conference (Eurotherm) 2024 in Bled, Slowenien, Vortrag (FE 2) 26.-31.05.2024, 18th International Symposium on Metal-Hydrogen Systems (MH) 2024 in St. Malo, Frankreich, Vortrag (FE 2) 29.11.2025, DKV-Tagung, Entwicklung regelbarer Vakuumdämmelemente – Von der Potentialstudie zur experimentellen Untersuchung (FE 1) 22.05.2025, TGA-Kongress, Von der Potentialstudie zur experimentellen Untersuchung – Regelbare Dämmelemente für Fassadensysteme (FE 1) 06.06.2025, International Conference on Building Energy and Environment (COBEE), Eindhoven (Netherlands), Poster (FE 2)			
Veröffentlichungen - Felbinger, J., Bürger, I., Linder M., Novel temperature-driven technique to characterize hydrogen sorption properties under vacuum conditions: Method development, experimental setup, and demonstration on the AB5-type metal hydride LaNi₄.1Al_{0.52}Mn_{0.38}, Int. Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48, 36849-36865, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.272 - Felbinger, J., Haverich, J., Bürger, I., Linder, M., Thermodynamic characterisation and application of the ZrNi–H metal hydride system in the lowpressure regime, Journal of Materials Chemistry A, 2024, 12, 6075-6086, doi: https://doi.org/10.1039/D3TA06667C			
Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre und berufliche Qualifikation	Ergebnis- und Wissenstransfer an wissenschaftlich-technischen Nachwuchs	Einbeziehen von Studierenden und Doktoranden im Projekt, Studien (SA)- und Abschlussarbeiten (BA, MA)	fortlaufend
Realisierung: - FE 1: 1x Bachelorarbeit, 2x Masterarbeit - Auslegung und Aufbau eines Modellraums für einen Demonstrator-Prüfstand (Bachelorarbeit, Universität Stuttgart, 2024) - Auslegung, Montage und Inbetriebnahme einer Modellfassade für Anwendungstests regelbarer Dämmelemente (Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2025) - Inbetriebnahme und thermische Charakterisierung eines Prüfstands für anwendungsnahe Tests regelbarer Dämmelemente (Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2025) - FE 2: 4x Masterarbeit, 2x Bachelorarbeit, 1x Praktikum - Experimentelle Untersuchung von Vakuum-Wärmedämmung mit regelbarem Wärmedurchgang und Konzeption eines integrierten Schaltmechanismus (Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2025) - Numerical Investigation of Thermally Activated Building Structures (TABS) Controlled by a Switchable Insulation Panel (Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2025)			

- Numerische Untersuchung der Eignung einer adaptiven Wärmedämmung zur thermischen Aktivierung von Gebäudeelementen (Bachelorarbeit, Technische Hochschule Ulm, 2024) - Experimentelle Untersuchung verschiedener Porenstrukturen zum Einsatz in einem regelbaren Wärmedämmsystem (Bachelorarbeit, Technische Hochschule Nürnberg, 2024) - Druckverlustuntersuchungen von Sintermetallfiltern im Unterdruckbereich (Praxisbericht, Technische Hochschule Nürnberg, 2023) - Untersuchung von funktionsintegrierten 3D gedruckten Sintermetallfiltern für das Design eines Metallhydrid-Reaktors (Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2023) - Design und Charakterisierung eines thermochemischen Metallhydrid-Wasserstoff-Reaktors für adaptive Wärmedämmungen (Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2023) - FE 3: Masterarbeit - Qualifizierung einer temperierten Vakuumkammer und Entwicklung einer Prüfmethode zur Untersuchung von Faserstoffen für den Einsatz in regelbaren Vakuumisulationspaneelen (Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2023) - An FE 1 wurden bereits Inhalte des Projekts in Vorlesungsfolien integriert, um den Studierenden über die aktuelle Forschung zu berichten.			
Transfer in die Industrie durch Verbände und Multiplikatoren	Vorstellung der Vorhabenergebnisse und Transfer in branchenübergreifende Verbände und Netzwerke	Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V.; Forschungskuratorium Textil e.V.	fortlaufend
	Vorstellen der Projektergebnisse und Demonstratoren auf Messen zur Akquirierung weiterer KMU	Techtextil Frankfurt, Hannover-Messe, ISH Frankfurt	II/2023 II/2024
Realisierung: - Durch FE 3 wurde das Projekt vom 23. bis 26.04.2024 durch ein Poster auf der Leitmesse für technische Textilien (Techtextil, Frankfurt) vorgestellt. - Am 14.07.2024 wurde das Projekt am Tag der Offenen Tür der DITF vorgestellt. (FE 3) 2023 bis 2025, jährliche Projektvorstellung bei der Mitgliederversammlung des Vereins der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. (FE 1)			

5.2 Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)

Neben den geplanten Transfermaßnahmen, werden hier auch zum Zeitpunkt der Berichterstellung bereits erfolgte Transfermaßnahmen aufgelistet.

Maßnahme	Ziel	Ort/ Rahmen	Datum/ Zeitraum
Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Überführung F&E-Ergebnisse in industriennahe Anwendungen	Fachtagungen, Techtextil Messe	ab II/2026
Weitergabe von ausführlichen Forschungsberichten	Ergebnisdarstellung	Abschlussbericht	III/2026
	schnelle zielführende Ergebnisumsetzung in KMU	auf Anfrage interessierter KMU	nach Projektende
Wissenschaftliche Publikationen	Bekanntmachung der Forschungsergebnisse (Zeitschriften/Tagungen)	Abschlussveröffentlichung im Bereich Gebäudetechnik (Gebäudetechnik in Wiss. und Praxis, HLH) Vorstellung der Ergebnisse auf internationalen Konferenzen (z.B. IBPC, I-VIS, SWC, etc) und in referierten internationalen Fachzeitschriften (z.B. Applied Energy, Energies, etc.)	II/2026
Vorträge 10.03.2026, Hermann-Rietschel-Colloquium, Regelbare Dämmelemente in der anwendungsnahen Prüfung (FE 1)			

• 18.-20.11.2026, DKV-Tagung, Abstract bereits eingereicht (FE 1) • 23.11.2026, Abschließende Projektvorstellung bei der Mitgliederversammlung des VdF HLK (FE 1) Veröffentlichungen • Felbinger, J., Dinkelacker, F., Armbrust, M., Linder, M., Thermochemical Gas Pressure Control: Demonstration of an Energy-Efficient Metal Hydride Reactor utilizing Thermal Decoupling and Thermoelectrics, Submitted to Int. Journal of Hydrogen Energy, 2026 • Veröffentlichung zu Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen in anwendungsnaher Umgebung			
Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre	Wissensvermittlung an wiss. techn. Nachwuchs (Vorlesung/ Praktika)	Vorlesung/Praktika	mit Projektende
Beratung von Unternehmen	Überführung in F&E-Ergebnisse in industriennahe Anwendungen	Fachtagungen, Messen und bei Firmenbesuchen	nach Projektende
Bauteil Demonstratoren im Einsatz	Transfer des Demonstrators in Innovationsraum Landfabrik (siehe PA → Arndt Schäfer Chemie und Umwelt GmbH) Transfer des Demonstrators in SFB 1244 (siehe Kapitel 4)	Fabrikhalle Landfabrik, Windeck Forschungshochhaus Universität Stuttgart	ab II/2026
• 04.-07.04.2026, Exponat und Infolyer auf der Techtextil (Frankfurt). Darstellung des Systems bestehend aus Paneel mit textilem Füllkern und Metallhydrid-Reaktor; Demonstrator auf dem BW-Gemeinschaftsstand auf der Fläche der DITF.			

6 Literaturverzeichnis

- [1] A. HENRY, R. PRASHER und A. MAJUMDAR. Five thermal energy grand challenges for decarbonization [online]. *Nature Energy*, 2020, **5**(9), 635-637. Verfügbar unter: doi:10.1038/s41560-020-0675-9
- [2] ABDULLAYEV, E., T. FLADUNG, P.-L.M. NOESKE und B. MAYER. Investigation of Hydrogen Transport Behavior in Polyethylene Terephthalate Membrane by Prolonged Hydrogen Exposure Treatments [online]. *Energies*, 2024, **17**(24), 6478. Verfügbar unter: doi:10.3390/en17246478
- [3] AVERY DENNISON CORPORATION. VIP Laminate Films Data Sheets [online], 2025. Verfügbar unter: <https://hanita.averydennison.com/na/en/home/customer-tools/vip-laminates-ds-td.html>
- [4] BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG (BBSR) IM BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG. Online-Datenbank zu Materialien und Konstruktionen von Bestandsgebäuden, regionaltypischen Baustoffen, Bauteilaufbauten und U-Werten. [online], 2023. Verfügbar unter: altbauatlas.de
- [5] Deutsches Institut für Normung. DIN EN 12667:2001-05, *DIN EN 12667 - Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten_ - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät_ - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN_12667:2001*. Berlin: DIN Media GmbH.
- [6] Deutsches Institut für Normung, *EN ISO 13790 - Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008); Deutsche Fassung*.
- [7] Deutsches Institut für Normung, *DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [8] Deutsches Institut für Normung. DIN EN 16798-1:2022-03, *DIN EN 16798-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden*. Berlin: DIN Media GmbH.
- [9] FELBINGER, J., I. BÜRGER und M. LINDER. Novel temperature-driven technique to characterize hydrogen sorption properties under vacuum conditions: Method development, experimental setup, and demonstration on the AB5-type metal hydride LaNi₄.1Al₀.52Mn₀.38 [online]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, **48**(94), 36849-36865. ISSN 03603199. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijhydene.2023.05.272
- [10] FELBINGER, J., J. HAVERICH, I. BÜRGER und M. LINDER. Thermodynamic characterisation and application of the ZrNi-H metal hydride system in the low-pressure regime [online]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, **12**(10), 6075-6086. ISSN 2050-7488. Verfügbar unter: doi:10.1039/D3TA06667C
- [11] Gasdruckeinstellvorrichtung. Erfinder: M. L. J. FELBINGER. Deutschland. DE 10 2021 113 132.
- [12] J. FELBINGER. Thermochemical Gas Pressure Actuation for Adaptive Insulation. Dissertationsschrift eingereicht bei Universität Stuttgart, 2026.
- [13] J. FELBINGER, F. DINKELACKER, M. ARMBRUST, M. LINDER. Thermochemical Gas Pressure Control: Demonstration of an Energy-Efficient Metal Hydride Reactor utilizing Thermal Decoupling and Thermoelectrics, Manuscript submitted to Int. Journal of Hydrogen Energy in 2026 (Under Review).
- [14] M.C. KANE. Permeability, Solubility, and interaction of hydrogen in Polymers- an assessment of materials for hydrogen transport [online]. Washington Savannah River Company. *University of North Texas Libraries, UNT Digital Library*, 2008, (WSRC-STI-2008-00009, Rev. 0). Verfügbar unter: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc902701/m1/1/>

- [15] PAULY, L., L. MAIER, S. SCHMIED, A. DINKELMANN, U. NIEKEN und G.T. GRESSER. Modelling Pore Size Distribution Function of Twist-Texturized Yarns and Single-Jersey Knitted Fabrics [online]. *Fibers*, 2025, **13**(4), 48. Verfügbar unter: doi:10.3390/fib13040048
- [16] Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein. SIA 2024, *SIA 2024 - Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*. Zürich.
- [17] TRNSYS 18 [online]. Updates in Version 18. Verfügbar unter: <https://trnsys.de/static/4f2e31e278f8082b8970f2d7cb81ca44/T18Updates.pdf>
- [18] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), *VDI 2078 - Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [19] Verein Deutscher Ingenieure (VDI). *VDI 6020, VDI 6020 - Anforderungen an thermisch-energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [20] Wärmeübertragungskomponente mit einstellbarer Wärmeleitfähigkeit und Wärmeübertragungsanordnung. Erfinder: M. L. J. FELBINGER. DE 102024111045.

7 Anhang

Anhang 1

Im Folgenden sind einige weitere Randbedingungen und Ergebnisse zu AP 2 dargestellt.

Tabelle 7: Bauteilkennwerte

Bauteil	Fläche m ²	Zustand	Aufbau	Dicke mm	Wärmedurchlasswiderstand R (m ² K)/W
Innen- wand	38,5	Adiabat	Gipsputz	20	0,351
			Vollziegel	120	
			Gipsputz	20	
Geschoss- decke	17,5	Adiabat	Fliesen	20	0,932
			Zementestrich	50	
			Polystyrol	30	
			Stahlbeton	150	
			Putz	15	
Fußboden	17,5	Adiabat	Fliesen	20	0,932
			Zementestrich	50	
			Polystyrol	30	
			Stahlbeton	150	
			Putz	15	
Innentüre	2	Adiabat	Holz	50	0,025
Außen- wand	$A_{Fassade} \cdot (1 - WWR)$	Extern	Brettschalung	10	3,987 (1)
			Dämmung	123	
			Brettschalung	10	
Fenster	$A_{Fassade} \cdot WWR$ (2)	Extern	--	--	-

(1) Mit Wärmeübergangswiderstände $R_{Si}=0,13$ und $R_{SE}=0,04$ resultiert bei $\lambda_{min,Dämmung} = 0,032$ W/(mK) ein U-Wert von etwa 0,24 W/(m²K)

(2) Der Fensterflächenanteil wird über das Window-to-Wall-Ratio (WWR) definiert. Das WWR beschreibt das Verhältnis der Fensterfläche einschließlich Rahmen zur gesamten betrachteten Außenwandfläche.

Tabelle 8: Kennwerte der Verglasung

Kennwert	Wert
Lokale Modellbezeichnung	Window001
Bibliotheksquelle	Berkeley Lab WINDOW v7.4.6.0 DOE-2 Data File
Window ID	201
Beschreibung	2-WSW_#3_AR90
Scheibenaufbau	6/16/6
Füllgas	Argon
U-Wert in W/(m ² K)	1,1
Gesamtenergiedurchlassgrad	0,62
Solare Transmission TSol	0,504
Solare Reflexion RF,Sol	0,23
Lichttransmissionsgrad TVIS	0,78

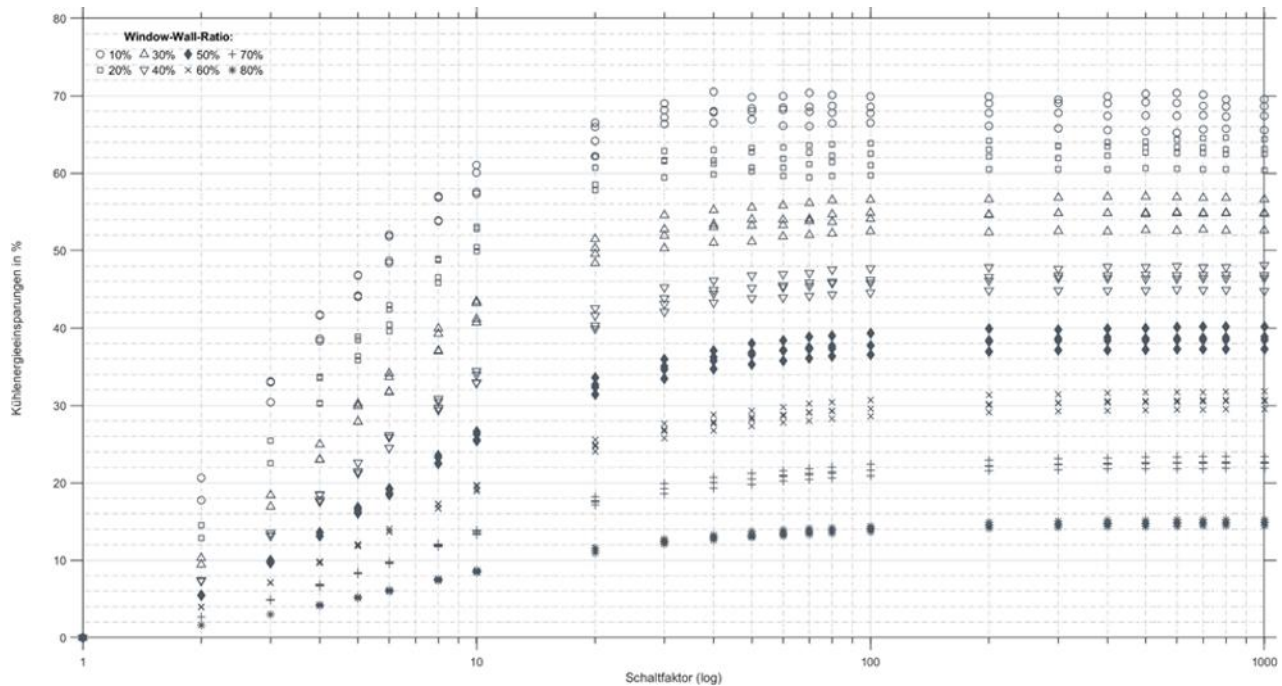


Abbildung 30: Flächenbezogene Kühlenergieeinsparung in Abhängigkeit des Schaltfaktors und des Window-to-Wall-Ratios (WWR)

Tabelle 9: Randbedingungen der Varianten für die regelbare Innenwand

Randbedingung/Parameter	Ohne externe Beladung (OEB)	Mit externer Beladung (MEB)
Untersuchungsziel	Bewertung der passiven thermischen Kopplung bzw. Entkopplung der Innenwand-Speichermasse	Bewertung der aktiven Be- und Entladung der Innenwand-Speichermasse sowie des Potenzials zur Lastverschiebung
Speicherbeladung	keine externe Be- oder Entladung der Speichermasse	aktive Be- bzw. Entladung der Speichermasse außerhalb der Belegungszeit
Nutzung der Speichermasse	ausschließlich über thermische Masse und veränderbare Kopplung zum Raum	zeitliche Trennung von Speicherbeladung und Speichernutzung; Nutzung während der Belegungszeit über thermische Kopplung zum Raum
Belegungszeit	werktags 8:00 bis 17:00 Uhr	werktags 8:00 bis 17:00 Uhr
Heiz- und Kühltolltemperaturen	Heizen: 20°C, Kühlen: 26°C	Heizen: 20°C, Kühlen: 26°C
Regelbare Schicht	Variation der Wärmeleitfähigkeit zur Kopplung bzw. Entkopplung der Speichermasse	Variation der Wärmeleitfähigkeit zur Nutzung der aktiven Innenwandheizung bzw. -kühlung
Schaltfaktor (SF)	Variation des Kopplungsgrades zwischen Speichermasse und Raum	Variation des Kopplungsgrades zwischen Speichermasse und Raum
Niedrigleitender Zustand	$\lambda_{min} = 0,032 \text{ W/(mK)}$	$\lambda_{min} = 0,032 \text{ W/(mK)}$
Hochleitender Zustand	$\lambda_{max} = \lambda_{min} \cdot SF$	$\lambda_{max} = \lambda_{min} \cdot SF$
Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwand	Variation U_{AW} -Wert bzw. der Wärmeleitfähigkeit der Außenwanddämmung	U_{AW} , konstant
Beladungsleistung	nicht vorhanden	Variation der Beladungsleistung, z. B. 250 W, 500 W und 1.000 W
Minimale bzw. maximale Speichertemperaturen	nicht vorhanden	obere Speichergrenztemperatur: 40°C (Heizfall) untere Speichergrenztemperatur: 18°C (Kühlfall)

Regelungsprinzip	saisonale Kopplung bzw. Entkopplung der Innenwand-Speichermasse	saisonale Speicherbeladung bzw. -entladung; bedarfsabhängige Kopplung während der Belegungszeit über RV1-RV3
Regelungsvarianten (RV)	keine aktive Be- oder Entladung; nur variable Kopplung der Speichermasse an den Raum	RV1: Ausgangsregelung, RV2: frühere Erkennung und Nutzung von Speicherpotenzial, RV3: Frühzeitige Bereitstellung des Wärme- bzw. Kältepotenzials an der Raumseite
Bewertungsgrößen	Heizenergiebedarf, Kühlenergiebedarf und Gesamtenergiebedarf des idealen Heiz-/Kühlsystems	verbleibender Gesamtenergiebedarf des idealen Heiz-/Kühlsystems gegenüber R0