

Schlussbericht vom 28.07.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21073 BG

1. Thema

Entwicklung und Erprobung von textilen Temperiersystemen für die kosteneffiziente Klimatisierung von Räumen (TexTemp)

2. Berichtszeitraum

01.04.2020 bis 31.12.2022

3. Forschungsvereinigung

Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V.

4. Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1: Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung (IET)

Forschungseinrichtung 2: Technische Universität Dresden, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstoffe (ITM)

Forschungseinrichtung 3: Forschungsgesellschaft HLK Stuttgart mbH (FG HLK)

Gefördert durch:

1. Einführung, Kurzfassung

Neue, intelligente Lösungen für die Raumkonditionierung sind essentiell, um die in der „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ der Bundesregierung geforderte Reduktion des Primärenergieeinsatzes zur Beheizung und Kühlung von Gebäuden zu erreichen. Eine Möglichkeit stellt in diesem Zusammenhang die funktionale Kombination von Raumtextilien und Heiz-/Kühlflächen zu „thermoaktiven Raumtextilien“ dar. Im Rahmen des dargestellten Projekts wurden die aus Voruntersuchungen der beteiligten Projektpartner hervorgegangenen Erkenntnisse auf Basis thermoaktiver Textilien in textile Temperiersysteme überführt.

Im Fokus der hier zusammengefassten Arbeiten stehen Materialkomposition, konfektionstechnische Verarbeitung, Integration von Funktionselementen, Produktdesign und -sicherheit sowie die Vorhersage des thermischen Verhaltens in konkreten Nutzungsfällen.

Die im Zuge des Projekts entstandenen textilen Temperiersysteme wurden auf Basis von Untersuchungen in den Klimakammern und Räumen der beteiligten Projektpartner umfangreich hinsichtlich ihrer spezifischen Leistungsparameter untersucht und hinsichtlich ihrer Alltagstauglichkeit bewertet. Als Bewertungskriterien für die textilen Temperiersysteme dienen die numerisch und messtechnisch ermittelten Kennwerte für die Leistungsabgabe im Heiz- und Kühlfall sowie für die thermische Behaglichkeit. Die Modellierung weiterer, über die Feldtests hinausgehender Nutzungsfälle in Büroraumkonfigurationen erfolgte auf Basis von gekoppelten Gebäude-, Anlagen- und Raumluftströmungssimulationen. Die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen dienten hierbei zur Validierung und zur Optimierung der numerischen Modelle.

Es konnte gezeigt werden, dass sich die modellierten textilen Temperiersysteme in nahezu allen untersuchten Fällen sehr gut zur Konditionierung von Büroräumen eignen. Selbst bei den im Rahmen der numerischen Untersuchungen betrachteten Altbauvarianten waren die textilen Temperiersysteme stets in der Lage, thermisch behagliche Zustände während der gesamten Büronutzungszeiten einzuhalten.

2. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In dem diesem Bericht zugrundeliegenden Projekt erfolgte die Konzeption, Fertigung und Untersuchung textiler Temperiersysteme für die Konditionierung von Büroräumen. Dabei wurden insbesondere die Materialkomposition und die konfektionstechnische Verarbeitung sowie das Produktdesign und die Produktsicherheit in den Fokus genommen. Zudem erfolgten umfangreiche messtechnische und numerische Untersuchungen bezüglich des thermischen Verhaltens in konkreten Nutzungsfällen und bezüglich der Integration der Temperiersysteme in die vorhandene Gebäudetechnik (Zu- und Abflüsse, Anbringung von Befestigungen, Wartungszugänge zum Entlüften). Die Modellierung der Nutzungsfälle erfolgte sowohl auf Basis von Simulationen als auch auf Basis von Untersuchungen in den Klimakammern und Räumen der beteiligten Projektpartner.

Die Beschreibung der in den einzelnen Arbeitspaketen durchgeführten Arbeiten erfolgt hier in der Reihenfolge ihrer Nummerierung. Dabei ist stets zu berücksichtigen, dass AP 2, soweit möglich, parallel zu den Paketen AP 3 und AP 4 bearbeitet wurde, da viele der Ergebnisse der beiden genannten Pakete direkt als Basis für AP 2 dienen.

2.1 AP 1: Einsatzszenarien / Funktionsmuster / Schwachstellenanalyse (alle FE)

Die einzelnen Arbeitspunkte dieses zu Projektbeginn und unter Mitwirkung des projektbegleitenden Ausschusses durchgeführten Arbeitspaketes werden in Stichpunkten zusammengefasst. Im Einzelnen erfolgten hier:

- Die Definition der Einsatzszenarien im Zwei- und Mehrpersonenbüro zum Heizen und Kühlen in Kombination mit Möglichkeiten der Lüftung,
- Diskussionen um die Ergänzung der geplanten Funktionsmuster (Lamellen und Raumteiler) um ein Deckenelement,
- Die Detektion der Schwachstellen der bereits gefertigten Funktionsmuster. Als besondere Schwachstellen zeigten sich:
 - *die Anbindung der Anschlüsse an die Lamellen,*
 - *die Kombination von Verkleben und Ultraschallschweißen,*
 - *die Verwindung der Lamellen,*
 - *die Entlüftung der Lamellen,*
 - *die Druckfestigkeit der Schweiß- und Klebeverbindungen sowie die*
 - *Vermeidung von Algenbildung*

Die Funktionsmuster wurden gemeinsam mit dem projektbegleitenden Ausschuss ausgewählt und festgelegt. Die definierten Einsatzszenarien bildeten die Basis für gekoppelte Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulationen. An den Schwachstellen wurde ebenfalls intensiv gearbeitet. So wurden z.B. neue Anschlüsse an die Lamelle entworfen und ausgeführt und eine Vliesverstärkung zur Vermeidung der Verwindung einseitig auf Test-Lamellen angebracht. Weitere zusätzliche Informationen bezüglich der einzelnen Punkte finden sich in den jeweiligen Arbeitspaketen.

2.2 AP 2: Modellierung und Simulation der Einsatzszenarien, FE 1

Innerhalb dieses Arbeitspaketes erfolgte die Vorbereitung, Modellierung und Simulation der aus den Einsatzszenarien abgeleiteten Variantenmatrix möglicher Einsatzkonfigurationen in realen Büroräumen. Das betrifft die hoch aufgelöste Modellierung der Raumgeometrien und der Temperiersysteme für die gekoppelten Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulationen sowie die Parametrisierung der Simulationen hinsichtlich aller weiteren Rand- und Anfangsbedingungen. Im Ergebnis dieses Arbeitspaketes wurden die Vor- und Nachteile sowie die möglichen Einsatzbereiche und -grenzen

der untersuchten thermoaktiven Raumtextilien als Heiz- und Kühlsystem für typische Anwendungsszenarien herausgearbeitet.

Weiterhin erfolgte die Begleitung der messtechnischen Untersuchungen an den Funktionsmustern durch Simulationen auf Basis einer bei FE 1 konzipierten virtuellen Prüfkabine, um sowohl die Funktionsfähigkeit der Simulationsumgebung zu validieren als auch weitere detaillierte, messtechnisch nicht zu erfassende thermische Eigenschaften der Funktionsmuster bereitzustellen.

Eine Anpassung der Simulationsmodelle zur Abbildung der Wasserspeichereffekte der textilen Temperiersysteme wurde als nicht notwendig erachtet, da die im Rahmen dieses Projektes entstandenen Funktionsmuster letztlich aus Material ohne nennenswerte Funktionalitäten zur Wasserspeicherung hergestellt wurden.

2.2.1 Untersuchungen der Funktionsmuster in virtueller Prüfkabine

Da zum Zeitpunkt der numerischen Untersuchungen noch nicht ausreichend Messdaten zu den finalen Funktionsmustern vorlagen, erfolgten die numerischen Untersuchungen auf Basis der Messdaten eines bei FE 1 untersuchten Demonstrators (16 Lamellen, 0,12 m x 1,5 m, bestehend aus je sechs wasserführenden Kanälen, resultierende wärmeübertragende Fläche: 2,88 m²). Die zugrundeliegenden messtechnischen Untersuchungen innerhalb des Klimaraumes bei FE 1 (50 m³) umfassen Leistungsmessungen für Heizen, Kühlen sowie Kühlen vor heißem Fenster für unterschiedliche Betriebspunkte [FELSMANN et al. 2018].

Zur detaillierten numerischen Untersuchung der Funktionsmuster steht eine virtuelle Prüfkabine in Anlehnung an DIN EN 442-2, [DIN EN 442-2 2015], basierend auf dem von FE 1 entwickelten Programmpaket zur gekoppelten Gebäude-, Anlagen-, Strömungs- und Bauteilsimulation zur Verfügung, [KNOPP et al. 2005], [PERSCHK 2010], [LUBE et al. 2008]. Auf diese Weise war es möglich, die realen Versuche äußerst detailliert nachzubilden. Die Berechnung der Raumluft in der Prüfkabine erfolgt turbulent und instationär zum stationären Zustand hin. Die Auswertung wird dann jeweils nach Erreichen des ausgeregelten stationären Zustandes vorgenommen. Zeitgleich laufen, an diese Simulation gekoppelt, die Bauteilsimulation des Funktionsmusters (nichtisotherme Strömungssimulation des Wassers mit dreidimensionaler Wärmeleitung in den Stoffbereichen) und die für die Regelung und für das Verhalten der Umfassungskonstruktion verantwortliche Gebäudesimulation. Dementsprechend ist es möglich, alle relevanten physikalischen Aspekte der Untersuchungen, wie die Wärmeleitung der modellierten Kabinenwände, den langwelligen Strahlungsaustausch zwischen den thermoaktiven Wänden und dem textilen Temperiersystem sowie die komplette integrierte Regelungstechnik und die dreidimensionale, nichtisotherme Wasserströmung sowie die Wärmeleitung in den Funktionsmustern selbst zu berücksichtigen.

In Abbildung 1 sind die Resultate von zwei eingeregelteten, quasistationären Szenarien der numerischen Untersuchungen abgebildet. Hier erkennt man sowohl die Temperaturverteilungen aufgrund der Wasserführung innerhalb der Lamellen als auch die resultierenden Oberflächen- und Lufttemperaturen. In Abbildung 2 sind Resultate der messtechnisch und der numerisch ermittelten Heiz- und Kühlleistungen zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen im Wesentlichen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messungen und Simulationen. Lediglich bei niedrigeren Leistungen kommt es zu deutlicheren Abweichungen. Diese lassen sich auf die schwer messbaren, sehr niedrigen Durchflussraten zurückführen.

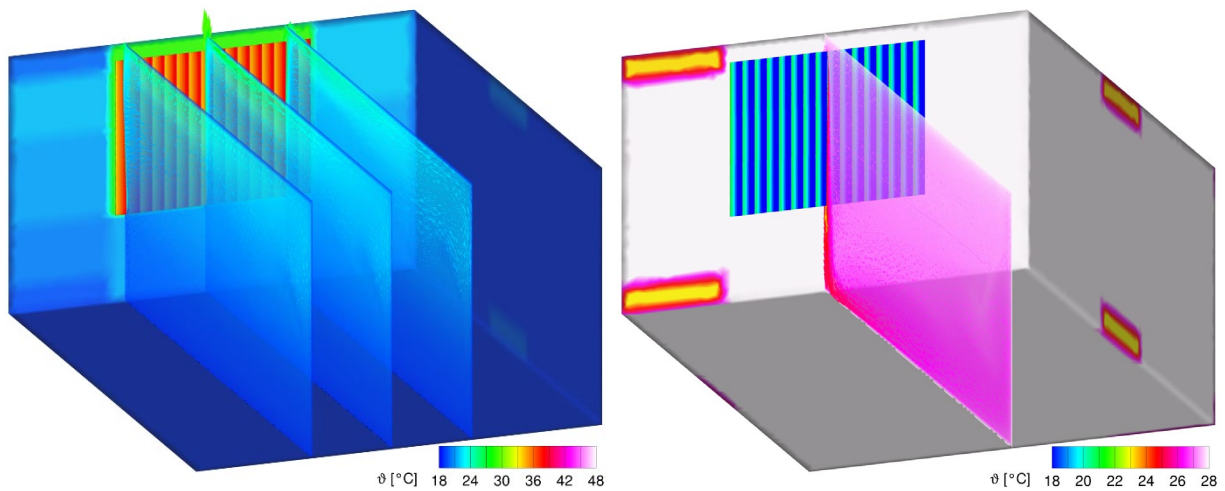


Abbildung 1: Oberflächen- und Lufttemperaturen der virtuellen Gardine im Betrieb für den Heizfall (links) und den Kühlfall mit Kompensation thermischer solarer Lasten vorm Fenster (rechts)

Variante	Min	max	Variante	min	max
1 Heizfall	585 W 24,4 W (2 l/min; VL: 35 °C)	1160 W (48,3 W) (4 l/min; VL: 45 °C)	1 Heizfall	583 W 24,3 W (2 l/min; VL: 35 °C)	1113 W 46,4 W (4 l/min; VL: 45 °C)
2 Kühlfall	-279 W -11,6 W (2 l/min; VL: 20 °C)	-640 W -26,7 W (4 l/min; VL: 14 °C)	2 Kühlfall	-304 W -12,7 W (2 l/min; VL: 20 °C)	-637 W -26,6 W (4 l/min; VL: 14 °C)
3 Kühlfall Fenster	-389 W -16,2 W (2 l/min; VL: 20 °C)	-704 W -29,3 W (4 l/min; VL: 14 °C)	3 Kühlfall Fenster	-530 W -22,1 W (2 l/min; VL: 20 °C)	-740 W -30,8 W (4 l/min; VL: 14 °C)

Abbildung 2: Ergebnisse der Leistungsbestimmung der „Klimagardine“ im Klimaraum, links messtechnische, rechts numerische Untersuchungen, rote Werte entsprechen einer kürzeren Lamelle (1,2 m x 0,1 m) gemäß der Lamellenparameter in Abschnitt 2.4

Insgesamt zeigen die Resultate, dass es mit dem vorliegenden Programmsystem sehr gut möglich ist, die auftretenden Heiz- und Kühlleistungen zu reproduzieren. Die Erweiterung auf die nachfolgend vorgestellten Anwendungen in Büroräumen ist auf dieser Basis statthaft. Zudem zeigen auch die entsprechenden Vergleiche mit den Messergebnissen von FE 3 in Abschnitt 2.4 eine sehr gute Übereinstimmung.

2.2.2 Einsatzszenarien in Büroräumen

Auf Basis der im Vorfeld und der vom Projektpartner FE 3 ermittelten Leistungsparameter wurde die Adaption der geplanten Funktionsmuster auf reale Büroraum-Geometrien mit Hilfe gekoppelter Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulation vorgenommen [GRITZKI et al. 2019]. Im Ergebnis dieses Arbeitspaketes wurden die Vor- und Nachteile sowie die möglichen Einsatzbereiche und -grenzen der untersuchten temperierbaren Raumtextilien als Heiz- und Kühlsystem im realen Betrieb herausgearbeitet. Dabei fand eine Vielzahl unterschiedlichster Einflussgrößen, wie die baulichen Raumgegebenheiten, die Lüftungssituationen, die Art und Anordnung der Textilien in den Räumen, sowie das Nutzerverhalten Berücksichtigung.

Es wurden instationäre Simulationen zur Ermittlung der Heiz- und Kühlleistungen textiler Temperiersysteme unterschiedlicher Größe an unterschiedlichen Raumpositionen und bei variierenden Zuluft-Systemen und Wärmedämmstandards untersucht. Für die dabei als rechnerisch besonders aufwändig einzuschätzenden gekoppelten numerischen Simulationen zur Untersuchung lokaler Effekte der thermischen Behaglichkeit erfolgt neben der ungekoppelten Einschwingphase innerhalb der Gebäude- und Anlagensimulation (14 Tage simulierte Zeit) die Modellierung einer zweitägigen vollständig gekoppelten Phase unter Einbeziehung der Raumluftströmung. Innerhalb der gekoppelten Simulationen wurden alle relevanten Einflussgrößen, von der geometrisch hoch aufgelösten Strahlungswärmeübertragung über die nutzerspezifischen thermischen Quellen bis hin zur Regelung der

Leistungsparameter der textilen Temperiersysteme berücksichtigt und entsprechend abgebildet. Für die Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten der Textilien stehen im Heizfall drei repräsentative Außen-temperaturverläufe und im Kühlfall zwei Temperaturverläufe zur Verfügung. Auf diese Weise war es möglich, Aussagen bezüglich der Dynamik und Effektivität der textilen Temperiersysteme sowohl im Teil- als auch im Volllastbereich zu treffen. Als Resultate der Simulationen entstehen Tagesverläufe ausgewählter Größen, wie Leistungsdaten und Über-, Unterschreitungshäufigkeiten der Solltemperaturen und des Predicted Mean Vote (PMV)¹, [DIN EN ISO 7730 2006] sowie Feldgrößen strömungstechnischer Details zu ausgewählten Zeitpunkten zur Verfügung. Zusätzlich erfolgte die Kombination dieser unterschiedlichen Temperaturverläufe im Rahmen eines Typtagverfahrens, um so Rückschlüsse auf das Verhalten der textilen Temperiersysteme und deren Energiebedarf innerhalb kompletter Heiz- und Kühlperioden zu ermitteln. Auf diese Weise ließen sich die untersuchten Systeme auch sehr gut mit anderen typischen Heiz- und Kühlsystemen vergleichen. In Abbildung 3 sind einige Details des konzipierten Typ-Tagverfahrens zusammengefasst.

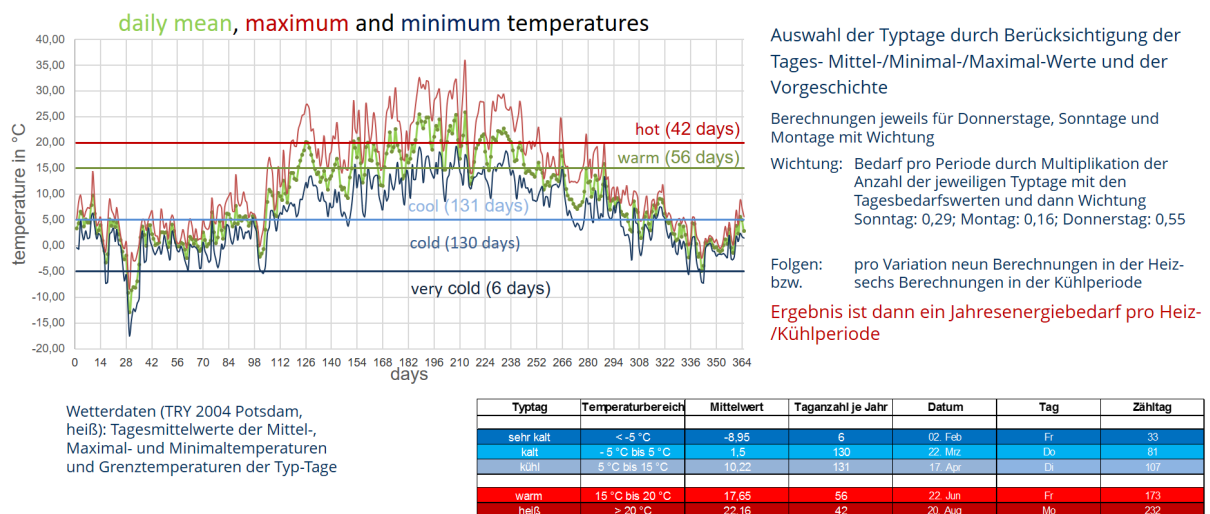


Abbildung 3: Annahmen und Festlegung der Einsatzszenarien, Details zum Typtagverfahren

Details der Simulationsparameter

Abbildung 4 zeigt beispielhaft zwei Raum-Geometrien sowie die darin als Raumteiler und als Lamellen angeordneten Raumtextilien. Zusätzlich befinden sich in den Darstellungen auch die Positionen der für die Beurteilung der Varianten im Zeitbereich verfügbaren Sensoren (blaue Kugeln) und der modellierten Zu- und Abluftöffnungen (Zahlen). Die untersuchten geometrischen Variationen erstrecken sich von unterschiedlichen Zweipersonenbüros (Grundfläche 4 m x 5 m bzw. 5 m x 6 m) bis hin zu Mehrpersonenbüros mit einer Grundfläche von 11 m x 12 m. Die Raumhöhe beträgt im kleinsten Büro 2,5 m, in den beiden größeren Büros 3 m und der Fensterflächenanteil beträgt in allen Fällen 30 %. Neben den gezeigten Anordnungen wurden zudem Anordnungen an den Raumseiten sowie unter der Decke berücksichtigt, siehe auch Abbildung 5.

¹ PMV: Predicted Mean Vote beschreibt die erwartete durchschnittliche Empfindung des Raumklimas einer größeren Personengruppe

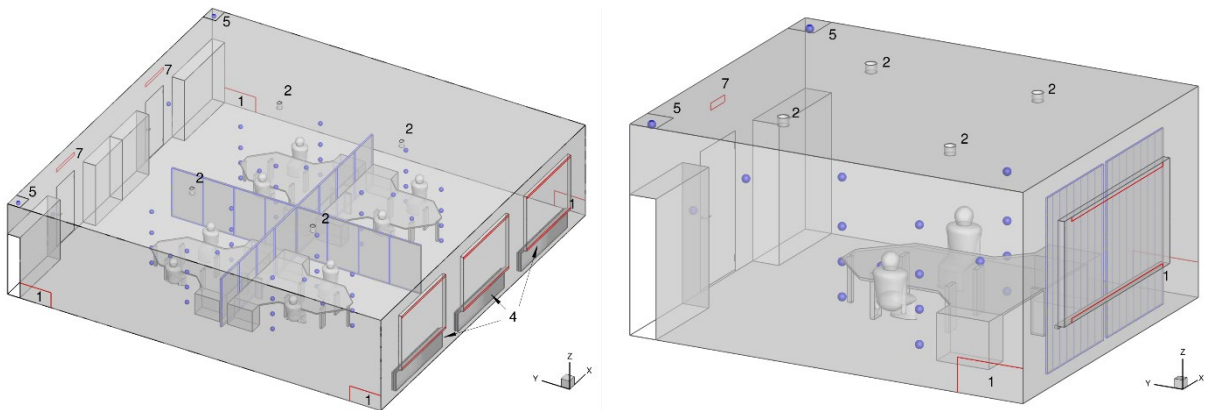


Abbildung 4: Geometrische Details und Positionen unterschiedlicher Zuluftöffnungen eines Mehrpersonenbüros mit textilen Temperiersystemen als Raumteiler (links) und eines Zweipersonenbüros mit Lamellen vor dem Fenster (rechts)

Die Modellierung der Heiz-/Kühlleistung erfolgte auf Basis der messtechnischen Untersuchungen, wahlweise über vorgegebene Wassertemperaturen oder flächenbezogene Leistungen in Abhängigkeit der Systemtemperaturen. Die Leistungsdaten in Abhängigkeit der operativen Temperaturen im Aufenthaltsbereich betragen bis zu 250 W/m^2 oder bis zu 60 °C im Heizfall und bis zu -120 W/m^2 oder bis zu 16 °C im Kühlfall. Die Anordnung der Systeme erfolgte in Absprache mit allen Beteiligten gemäß nachfolgenden Angaben:

- Nutzung als Raumteiler in Mehrpersonenbüros, Anordnung zwischen den Arbeitsplätzen, 1,6 m hoch
- Anordnung in Form beweglicher Lamellen vor/neben dem Fenster (primäre Anordnung) Breite 1,6 m (wenn offen 0,8 m) Höhe 1,8 m beziehungsweise 2,5 m
- Anordnung von Elementen unter der Decke (2,8 m Höhe, Abstände voneinander und von den Seitenwänden je 0,5 m)
- Anordnung an Seitenwänden hinter den Arbeitsplätzen, Breite 1,6 m Höhe 2,5 m

Die untersuchten geometrischen Variationen infolge der unterschiedlichen Anordnungen der Temperiersysteme decken im Heizfall 10 mögliche Konfigurationen sowie im Kühlfall 14 Konfigurationen ab. Innerhalb dieser Konfigurationen variierten dann sowohl Größe und Position der textilen Temperiersysteme als auch die Wärmedämmstandards der Gebäudehülle (Altbau und EnEV09).

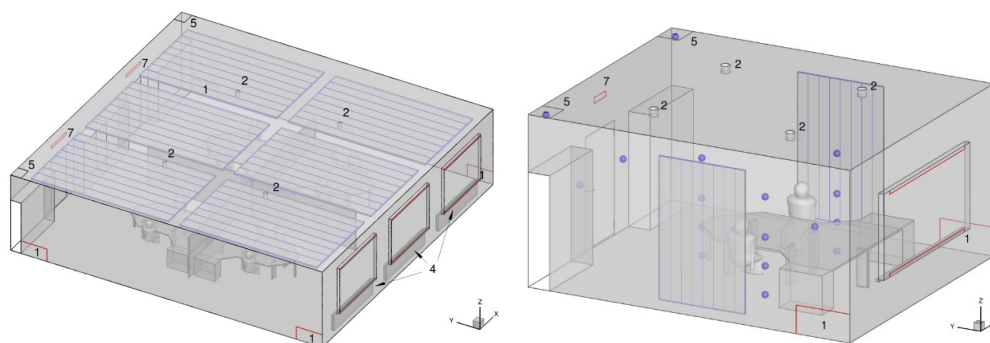


Abbildung 5: Geometrische Details und Positionen unterschiedlicher Zuluftöffnungen eines Mehrpersonenbüros mit textilen Temperiersystemen unter der Decke (links) und eines Zweipersonenbüros mit Lamellen an den seitlichen Innenwänden (rechts)

Für die typischen Büronutzungszeiten wurde ein Zeitfenster von 8:00 Uhr bis 18:00 Uhr mit jeweils reduzierter Nutzungszeit in der ersten und der letzten Stunde modelliert. Der Zuluftvolumenstrom pro Nutzer beträgt $30 \text{ m}^3/\text{h}$, zudem wurden an den Positionen ihrer Freisetzung typische interne thermische Lasten für Beleuchtung und Technik integriert (insgesamt 180 W pro Person). Als Zuluftsysteme sind Modellierungen für Fensterlüftung, Außenluftdurchlasselemente (ALD) in den Fenstern (mit / ohne Wärmerückgewinnung), Quelllüftung, Mischlüftung in den Decken und Lüftungsgitter ver-

füßbar, die Abluft wird in der Decke bzw. durch die Fenster abgeführt. Die Wand- und Fensteraufbauten der Büroräume entsprechen wahlweise typischen Bestandsgebäuden (Altbau - teilsaniert) oder moderneren Gebäuden gemäß EnEV 09, wobei die Bauschweren zwischen leichter Bauweise mit Glasfassade und schwerer Bauweise variieren.

Die Diskretisierung der Berechnungsgebiete erfolgte tetraederbasiert mit Elementzahlen zwischen 0,7 und 1,2 Millionen Elementen. Zudem erfolgte eine detaillierte Modellierung der textilen Temperiersysteme mit Wasser und Stoffschichten. Der Energieeintrag innerhalb der wasserführenden Schicht erfolgt über die Regelung der Wassertemperatur oder in einzelnen Varianten über eine entsprechende Wärmequelle. Für weitere Informationen zum genutzten Verfahren sei auf [GRITZKI et al. 2019] verwiesen.

Nachfolgend seien beispielhaft einige detailliertere Resultate der Simulationsergebnisse vorgestellt. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die inneren Oberflächentemperaturen für drei geometrische Varianten moderner Büros (Dämmstandard EnEV 09) um 14 Uhr. Auf der linken Seite handelt es sich um Kühlfälle an einem heißen Sommertag für zwei Varianten eines Mehrpersonnbüros mit thermoaktivem Raumteiler bzw. Deckenelement und ALD unterm Fenster. Auf der rechten Seite handelt es sich um Heizfälle für das Mehrpersonnbüro mit Deckenelementen sowie ein Zweipersonnbüro mit raumhohen Lamellen als Gardine neben und ALD unter dem Fenster an einem sehr kalten Wintertag.

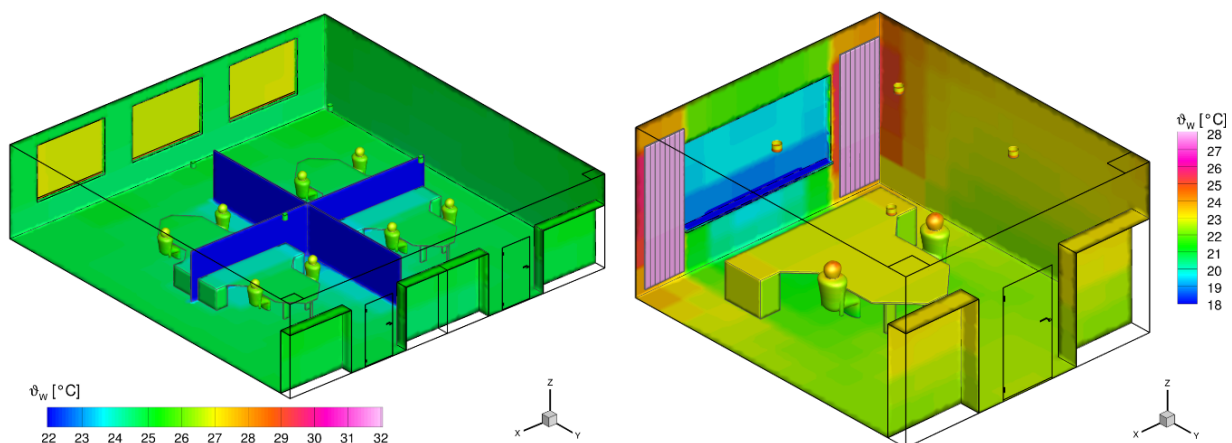


Abbildung 6: Innere Oberflächentemperaturen zweier Büroräume mit textilen Temperiersystemen um 14 Uhr – links Mehrpersonnbüro, Kühlfall (Raumteiler), rechts Zweipersonnbüro, Heizfall (Lamellen als Gardine neben Fenster)

In den Darstellungen sind deutlich die textilen Temperiersysteme und die Wandtemperaturverteilungen erkennbar. Ein gutes Kriterium für die Funktionsweise der textilen Temperiersysteme, das neben der Einhaltung der operativen Temperatur zusätzlich auch die Luftgeschwindigkeit, den Turbulenzgrad und die relative Luftfeuchte berücksichtigt, ist das Predicted Mean Vote (PMV) gemäß DIN ISO 7730, [DIN EN ISO 7730 2006]. In Abbildung 8 und in Abbildung 9 sind die Werte des PMV für 14 Uhr für ausgewählte Fälle sichtbar.

Es zeigt sich anhand der PMV-Werte nahe Null, dass es mit den textilen Temperiersystemen sehr gut möglich ist, thermisch behagliche Zustände bei unterschiedlichster Anordnung sowohl unter sommerlichen als auch unter winterlichen Bedingungen zu erzielen. Abschließend sind in Abbildung 10 Darstellungen des Risikos infolge von Zuglufterscheinungen (DR) für zwei Fälle zusammengefasst.

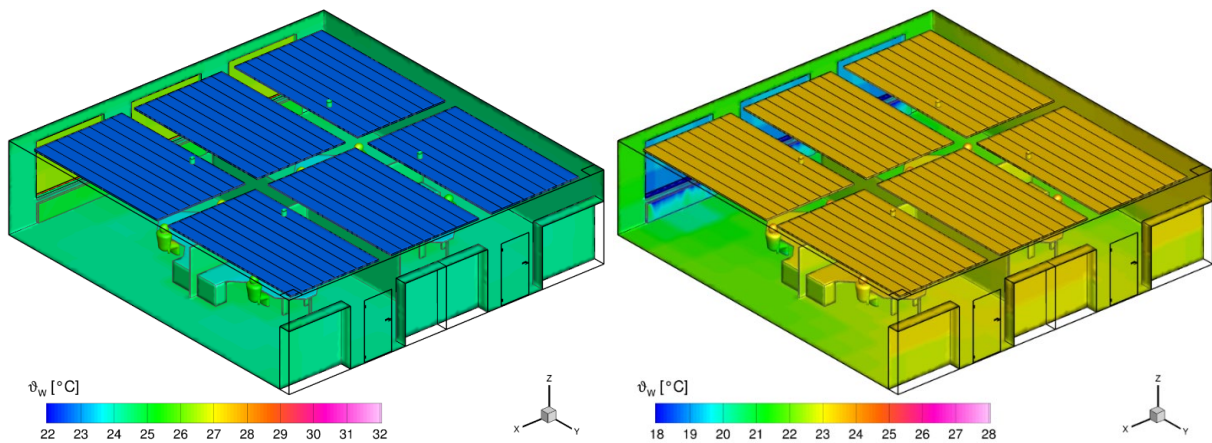


Abbildung 7: Innere Oberflächentemperaturen des Mehrpersonnbüros mit textilen Temperiersystemen als Deckenelemente um 14 Uhr – links, Kühlfall, rechts Heizfall

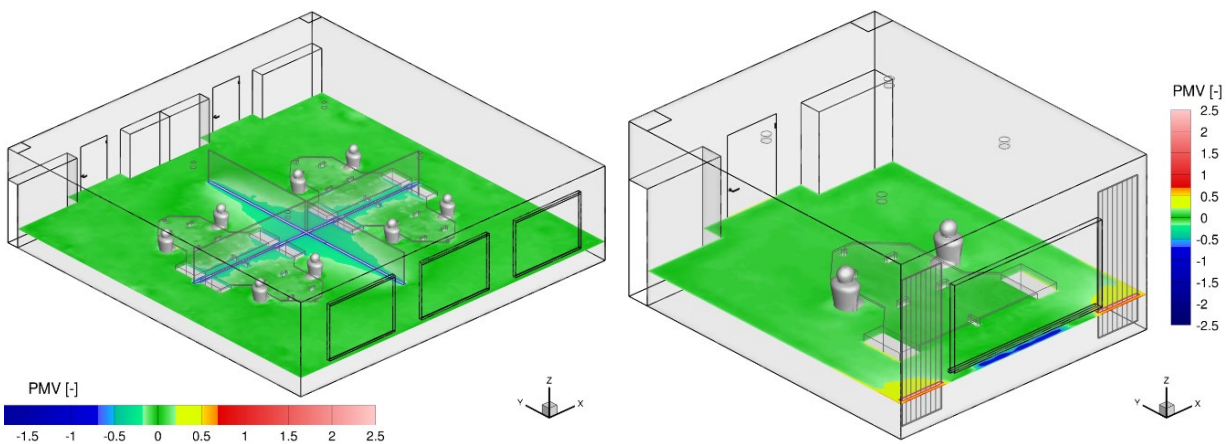


Abbildung 8: Horizontalschnitte des Predicted Mean Vote (PMV) um 14 Uhr – links Mehrpersonnbüro, Kühlfall (Raumteiler), rechts Zweipersonnbüro, Heizfall (Gardinen neben Fenster)

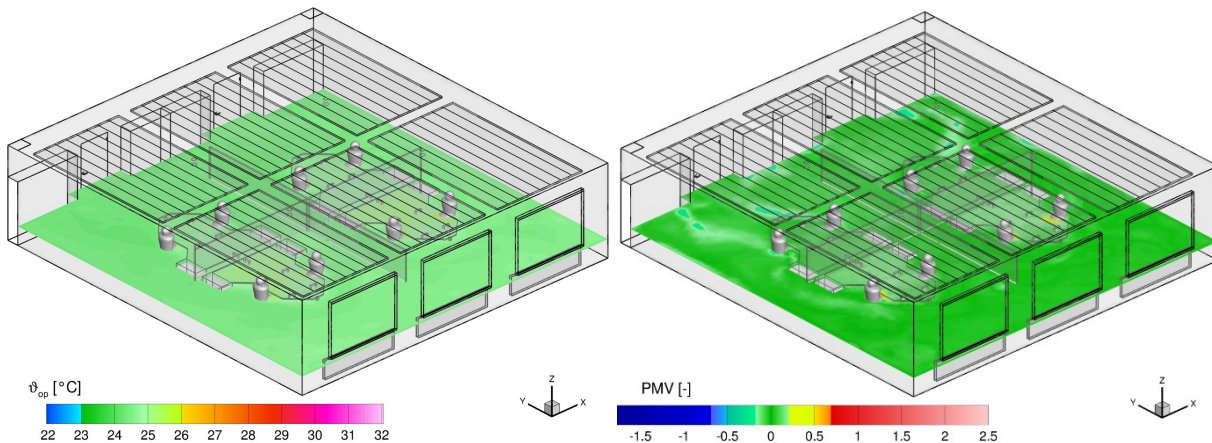


Abbildung 9: Horizontalschnitte des Predicted Mean Vote (PMV) des Mehrpersonnbüros mit textilen Temperiersystemen als Deckenelemente um 14 Uhr – links, Kühlfall, rechts Heizfall

Anhand der Darstellungen erkennt man sehr gut, dass eine Anordnung der thermoaktiven Lamellen neben Fenster und ALD im Heizfall durchaus zu geringen Zugbelastungen im Aufenthaltsbereich führen kann.

Im Zuge der Untersuchungen erfolgten weitere Variationen der einzelnen Konfigurationen hinsichtlich unterschiedlicher Regelungsstrategien der textilen Temperiersysteme (z.B. Regelung nach unterschiedlichen Sensorpunkten, nach unterschiedlichen Sollwerten usw.) Hierbei zeigt sich bereits, dass sich die modellierten thermoaktiven Lamellen als Gardine in nahezu allen untersuchten Fällen

sehr gut zur Konditionierung der Büroräume eignen. Selbst bei den Altbauvarianten waren die Lamellen stets in der Lage, die Kategorie A der thermischen Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7030 während der gesamten Büronutzung einzuhalten. Berücksichtigt man zudem die hier ebenfalls untersuchte Eignung der Textilien zur Abfuhr solarer Gewinne, so zeigt sich, dass sie sich aus energetischer Sicht sehr gut zur Konditionierung von Büroräumen eignen.

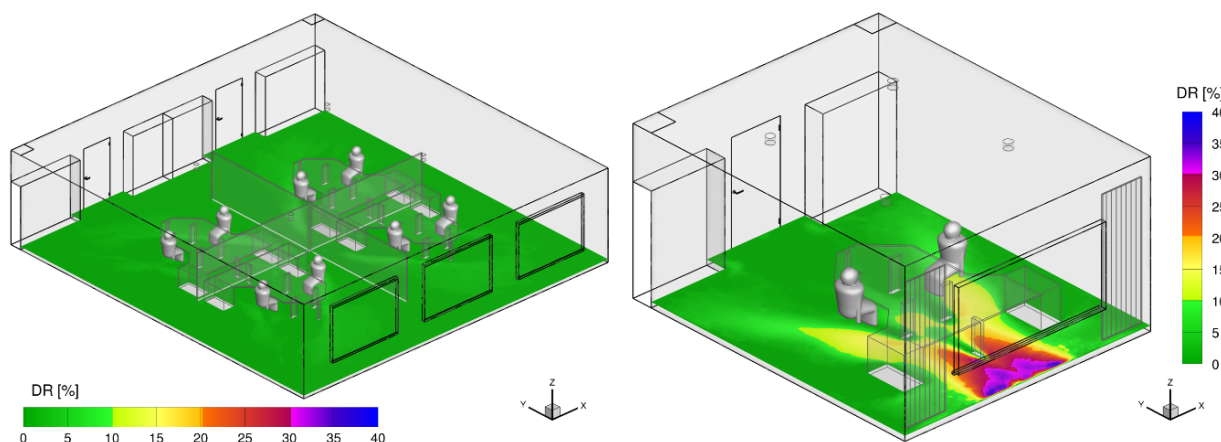


Abbildung 10: Zugluftisiko DR in 0,1 m Höhe um 14 Uhr, links Mehrpersonenbüro, Kühlfall (Raumteiler), rechts Zweipersonenbüro, Heizfall (Gardinen neben Fenster)

Insgesamt wurden für die untersuchten Konfigurationen insgesamt 992 instationäre gekoppelte Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulationen über jeweils 48 Stunden durchgeführt, um entsprechende Aussagen zu energetischem Verhalten und thermischer Behaglichkeit innerhalb der jeweiligen Heiz- und Kühlperioden treffen zu können. Zur energetischen Bewertung der einzelnen Konfigurationen wurden die entsprechenden Leistungsdaten sowie die Über-, Unterschreitungshäufigkeiten der Solltemperaturen, das PMV und die operative Temperatur genutzt. In Abbildung 11 sind Energiebedarfswerte innerhalb der Kühlperiode für das Zweipersonenbüro mit einer Grundfläche von 30 m² und das Mehrpersonenbüro mit einer Grundfläche von 130 m² bei unterschiedlichen Wärmedämmstandards und Anordnungen der textilen Temperiersysteme zusammengefasst. Tabelle 1 zeigt weitere Details bezüglich der Kriterien thermischer Behaglichkeit. In Abbildung 12 und in Tabelle 2 sind die gleichen Werte für die entsprechend untersuchten Varianten in der Heizperiode verfügbar. Im Ergebnis der Untersuchungen wurden folgende Erkenntnisse herausgearbeitet:

- Es wurde eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Leistungsdaten der bisherigen Funktionsmuster erzielt, lediglich bei sehr kleinen Wassermasseströmen kommt es zu signifikanten Abweichungen.
- Im Zuge der Untersuchungen der Temperiersysteme im Raum zeigte sich eine sehr gute Einhaltung aller relevanten Kriterien der thermischen Behaglichkeit innerhalb der Anwesenheitszeiten, sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall für alle untersuchten Konfigurationen. Somit sind keine signifikanten Nachteile im Vergleich zu konventionellen Heiz-/Kühlsystemen feststellbar. Lediglich im Altbau kommt es infolge der unkonventionellen Anordnung der Lamellen zur Gefahr von erhöhtem Zugluftisiko.
- Bei vertikaler Anordnung sind die ermittelten Energiebedarfswerte mit konventionellen Systemen vergleichbar. Höhere Energiebedarfswerte treten jedoch bei Anordnung im Deckenbereich infolge der ungünstigeren Temperaturschichtung auf. Das ist jedoch bei allen flächenbasierten Temperiersystemen im Deckenbereich der Fall.
- Der Energiebedarf ist umso geringer, je näher sich die textilen Temperiersysteme an den Personen befinden.
- Wenn textile Temperiersysteme vor dem Fenster angeordnet sind, dann kommt es infolge der direkten solaren Einstrahlung zur effektiven Abfuhr solarer Lasten.

- Aufgrund der Modellkonzeption ist die Anpassung der numerischen Modelle an künftige, messtechnisch ermittelte Parameter, wie beispielsweise Emissionskoeffizienten der genutzten Materialien problemlos realisierbar.

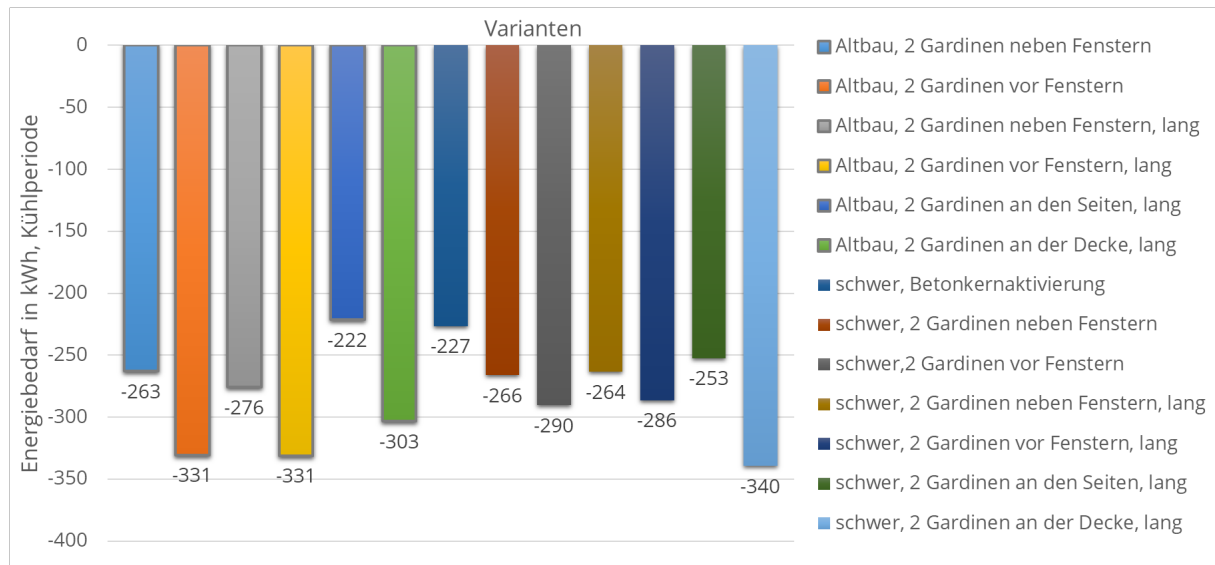


Abbildung 11: Energiebedarf innerhalb der Kühlperiode, Zweipersonenbüro, unterschiedliche Wärmedämmstandards und Anordnungen der textilen Temperiersysteme

Tabelle 1: Energiebedarf und Kriterien thermischer Behaglichkeit innerhalb der Kühlperiode, Zwei- und Mehrpersonenbüro, unterschiedliche Wärmedämmstandards und Anordnungen der textilen Temperiersysteme

Varianten Zweipersonenbüro	Energiebedarf in kWh	Überschreitung PMV (zeitgem.)	Unterschreitung PMV (zeitgem.)	Dauer Überschreitung Kat. A in %	Dauer Unterschreitung Kat. A in %	Überschreitung T _{op} (zeitgem.) in K	Unterschreitung T _{op} (zeitgem.) in K	Dauer Überschreitung Kat. A in %	Dauer Unterschreitung Kat. A in %
Altbau, 2 Gardinen neben Fenstern	-263	0,01	-0,07	0	8,9	0,16	-0,08	0	0,1
Altbau, 2 Gardinen vor Fenstern	-331	0	-0,08	0	1,4	0,04	-0,03	0	0
Altbau, 2 Gardinen neben Fenstern, lang	-276	0	-0,09	0	8,9	0,06	-0,08	0	0,2
Altbau, 2 Gardinen vor Fenstern, lang	-331	0	-0,08	0	0	0,03	-0,02	0	0
Altbau, 2 Gardinen an den Seiten, lang	-222	0	-0,11	0	11,5	0,02	-0,11	0	1,7
Altbau, 2 Gardinen an der Decke, lang	-303	0	-0,12	0	14,9	0,02	-0,14	0	2,1
schwer, 2 Gardinen neben Fenstern	-266	0	-0,06	0	0,4	0,12	-0,02	0	0
schwer, 2 Gardinen vor Fenstern	-290	0	-0,08	0	0	0,04	-0,02	0	0
schwer, 2 Gardinen neben Fenstern, lang	-264	0	-0,08	0	1,5	0,04	-0,03	0	0
schwer, 2 Gardinen vor Fenstern, lang	-286	0	-0,08	0	0	0,03	-0,01	0	0
schwer, 2 Gardinen an den Seiten, lang	-253	0	-0,08	0	0,2	0,02	-0,02	0	0
schwer, 2 Gardinen an der Decke, lang	-340	0	-0,09	0	5,4	0,02	-0,04	0	0
Varianten Mehrpersonenbüro	Energiebedarf in kWh	Überschreitung PMV (zeitgem.)	Unterschreitung PMV (zeitgem.)	Dauer Überschreitung Kat. A in %	Dauer Unterschreitung Kat. A in %	Überschreitung T _{op} (zeitgem.) in K	Unterschreitung T _{op} (zeitgem.) in K	Dauer Überschreitung Kat. A in %	Dauer Unterschreitung Kat. A in %
schwer, Kühldecke	-1173	0	-0,08	0	3,2	0,03	-0,07	0	0
schwer, Gardinen als Raumteiler	-1016	0	-0,07	0	7,3	0,03	-0,02	0	0
schwer, Gardinen zur Deckenkühlung	-1300	0	-0,09	0	14,7	0,01	-0,04	0	0

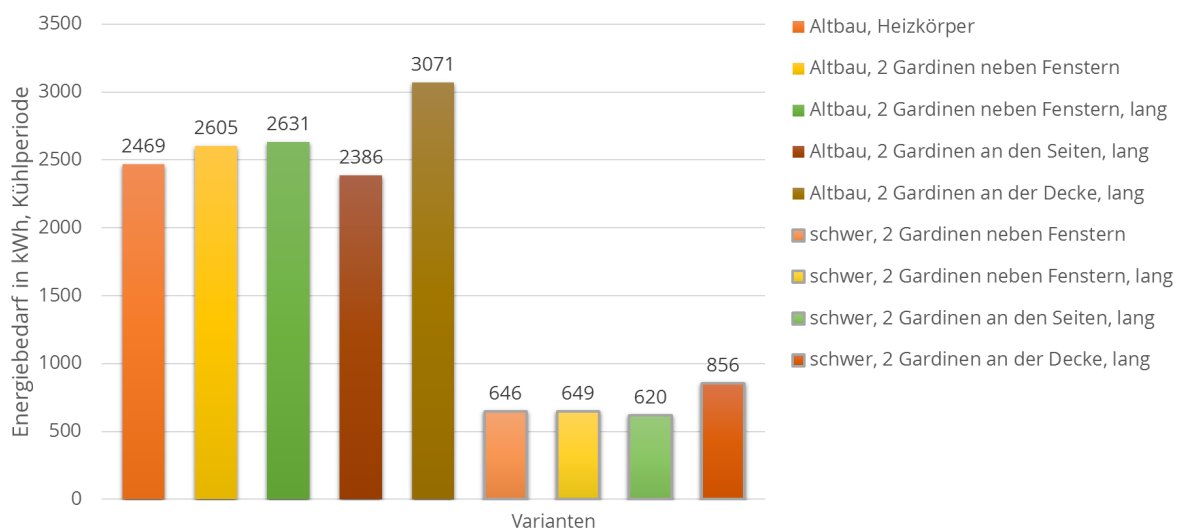


Abbildung 12: Energiebedarf innerhalb der Heizperiode, Zweipersonenbüro, unterschiedliche Wärmedämmstandards und Anordnungen der textilen Temperiersysteme

Tabelle 2: Energiebedarf und Kriterien thermischer Behaglichkeit innerhalb der Heizperiode, Zwei- und Mehrpersonenbüro, unterschiedliche Wärmedämmstandards und Anordnungen der textilen Temperiersysteme

Varianten Zweipersonenbüro	Energie- bedarf in kWh	Überschreitung PMV (zeitgem.)	Unterschreitung PMV (zeitgem.)	Dauer Über- schreitung Kat. A in %	Dauer Unter- schreitung Kat. A in %	Überschreitung T _{op} (zeitgem.) in K	Unterschreitung T _{op} (zeitgem.) in K	Dauer Über- schreitung Kat. A in %	Dauer Unter- schreitung Kat. A in %
Altbau, Heizkörper	2469	0,08	0	0	0	0,01	-0,01	0	0
Altbau, 2 Gardinen neben Fenstern	2605	0,06	0	0	0	0,03	-0,05	0	0
Altbau, 2 Gardinen neben Fenstern, lang	2631	0,07	0	0	0	0,01	-0,02	0	0
Altbau, 2 Gardinen an den Seiten, lang	2386	0,07	0	0	0	0,01	-0,01	0	0
Altbau, 2 Gardinen an der Decke, lang	3071	0,06	0	0	0	0,01	-0,01	0	0
schwer, 2 Gardinen neben Fenstern	646	0,07	0	0	0	0,03	-0,04	0	0
schwer, 2 Gardinen neben Fenstern, lang	649	0,07	0	0	0	0,01	-0,02	0	0
schwer, 2 Gardinen an den Seiten, lang	620	0,07	0	0	0	0,01	-0,01	0	0
schwer, 2 Gardinen an der Decke, lang	856	0,07	0	0	0	0,01	-0,01	0	0

Varianten Mehrpersonenbüro	Energie- bedarf in kWh	Überschreitung PMV (zeitgem.)	Unterschreitung PMV (zeitgem.)	Dauer Über- schreitung Kat. A in %	Dauer Unter- schreitung Kat. A in %	Überschreitung T _{op} (zeitgem.) in K	Unterschreitung T _{op} (zeitgem.) in K	Dauer Über- schreitung Kat. A in %	Dauer Unter- schreitung Kat. A in %
schwer, Heizkörper	1675	0,08	0	0	0,1	0,05	-0,04	0	0,1
schwer, Gardinen als Raumteiler	1635	0,07	0	2,7	0,1	0	-0,01	0	0,2
schwer, Gardinen zur Deckenheizung	2438	0,01	-0,01	0	0	0	-0,3	0	0

2.3 AP 3: Entwicklung, Fertigung von Funktionsmustern und Demonstratoren, FE 2

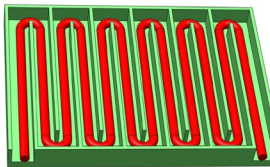
Der Fokus innerhalb des hier berichteten Arbeitspaketes lag auf allen Aspekten der Herstellung der textilen Temperiersysteme. Auf Grundlage der bekannten Schwachpunkte (siehe AP 1) sind verschiedene Optionen ermittelt und analysiert worden, um diese zu beheben bzw. zu kompensieren. Zusätzlich wurden Alternativen zur bisherigen Herstellung der textilen Temperiersysteme entwickelt und erprobt. In Zusammenarbeit mit den Projektbeteiligten erfolgte die Fertigung und Prüfung verschiedener Funktionsmuster, um eine Verbesserung der thermischen und regelungs-spezifischen Eigenschaften der textilen Temperiersysteme zu erzielen. Es wurden verschiedene Fertigungsverfahren (z. B. Ultraschallschweißen oder Heißluftschweißen) getestet und Fertigungsparameter (Schweißenergie, Vorschub, Schweißdruck) ermittelt. Auf Basis dieser Untersuchungen erfolgte dann die Erstellung und Optimierung der notwendigen Fertigungspläne. Neben weiteren Untersuchungen bezüglich der ursprünglich genutzten Klebeverbindungen wurden verschiedene alternative Optionen untersucht, die textilen Temperiersysteme mit den vorhandenen Medienanschlüssen zu verbinden. Insbesondere die additive Fertigung bietet hierfür Möglichkeiten an.

2.3.1 Ermittlung der Materialkombination für die textilen Temperiersysteme

Eine Vielzahl von Faktoren wie Textilrohstoff, Filamentquerschnitt und dessen Geometrie, Gewebekonstruktionsverfahren, Bindungsart, textile Veredlung und deren Beschichtung haben einen erheblichen Einfluss auf die resultierende Anwendbarkeit in textilen Temperiersystemen sowie den Einsatz des entsprechend auszuwählenden Materialverbindungsverfahrens. Die passende Auswahl eines geeigneten textilen Flächengebildes ist daher komplex, siehe auch Tabelle 3. Zudem zeichnen sich Textilien durch ein multidirektionales Verhalten in ihren mechanischen und thermischen Eigenschaften aus. Dieser Umstand muss ebenfalls angemessen berücksichtigt werden. Im Rahmen des AP 3 erfolgte dementsprechend die Beurteilung verfügbarer Materialien und daraus resultierend die Auswahl des für die Funktionsmuster einzusetzenden Materials.

Eine weitere wichtige Rolle spielt das Fertigungskonzept, beispielsweise die Integration von Schläuchen in das Grundgewebe oder direkt von Kanälen innerhalb des textilen Materials. Die Auswahl des geeigneten Herstellungsverfahrens beeinflusst neben den oben genannten Materialeigenschaften letztlich auch die Produktfunktion.

Tabelle 3: Auswahlkriterien für die unterschiedlichen Gestaltungsvarianten

			
Herstellung/Konzept	Kammern	Schlauch aufgenäht	Kanäle integriert
Anforderung an Material	nähbar	nähbar	schweißbar
Verbindungstechnik	Nähen/Schweißen indirekt	Nähen	schweißen
Möglichkeiten für Gestaltung	mittel	kaum	vielfältig
Kanalgröße	fixiert	fixiert	frei wählbar
Beschädigungsgefahr bei Verarbeitung	mittel	hoch	niedrig
Produkt, Gewicht	hoch	mittel	niedrig
Produkt, Handhabung/	sehr komplex	mittel	mittel
Automatisierbarkeit	nicht möglich	möglich	möglich
Biegesteifigkeit	hoch	mittel/niedrig	niedrig
Montage, Schwierigkeitsgrad	hoch	mittel	niedrig
Wasserdichtheit	nein	nein	ja
Wärmetransfer in der Umgebung	indirekt	indirekt	direkt
Auswahl	nein	nein	JA

Bei FE 2 steht eine umfassende Auswahl möglicher Fertigungsverfahren zur Verfügung. Die vielversprechendsten drei Verfahren wurden sorgfältig geprüft, um ein allgemeines Fertigungskonzept für textile Temperiersysteme zu erstellen. Die Bewertung erfolgte anhand der Kriterien in Tabelle 3 und wurde dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) vorgestellt. Letztlich wurde sich mehrheitlich für die Variante des Ultraschallschweißens integrierter Kanäle ausgesprochen.

2.3.2 Ergebnisse der textilphysikalischen und chemischen Materialcharakterisierung und der Prüfung des Gebrauchsdauerverhaltens

In Abhängigkeit vom Konstruktionsprinzip wurden drei verschiedene Textilien geprüft, die für den Ultraschallschweißprozess geeignet sind, siehe Tabelle 4. Zur Bewertung der Flexibilität wurde deren Biegefestigkeit und die Drapierbarkeit bestimmt. Die mechanischen Eigenschaften der Textilien wurden charakterisiert und sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die Untersuchungen der textilen Flächengebilde erfolgten auf Basis der gültigen Normen und Richtlinien.

Tabelle 4: Eigenschaften der ausgewählten Textilien

Name	Trärgewebe/ Beschichtung	Beschichtung
Ecoseal 451	PE / TPU-Ether	einseitig beschichtet
Ecoseal 652	PE / TPU-Ether	beidseitig beschichtet
Riverseal 200 HT	PA 6.6 / TPU	einseitig beschichtet

Tabelle 5: Materialeigenschaften

Parameter	Norm	Ecoseal 652	Ecoseal 451	Riverseal 200 HT
Trägergewebe		Polyester 1100 Dtex	Polyester 1100 Dtex	Nylon
Beschichtung		TPU Ether	TPU Ether	TPU
Gesamtgewicht (g/m²)	ISO 2286-2 ISO 3801	700	450	265
Dicke (mm)	ISO 2286-2	0,8	0,5	0,5
Reißfestigkeit (N/50 mm)	DIN 53354 ISO 13934-2	> 2800/2600	3000/3000	1200/1000
Weiterreißfestigkeit (N/50 mm)	DIN 53329 ISO 9073-4	>350/350	350/350	60/53
Haftung (N/50 mm)	ISO 2411 (HF)	> 250	> 350	> 300
Dehnung (%)	DIN 53354	+/- 20/20		
Temperatur Resistenz (°C)	DIN 53361	-30 bis +70	-30 bis +70	

Die beim Ultraschallschweißen entstehende Verbindungsstelle einer Schweißnaht muss hinsichtlich ihrer Nahtfestigkeit untersucht werden. Um dies zu realisieren, wurden die drei Textilien mit unterschiedlichen Maschinenparametern geschweißt und die Nahtfestigkeiten bestimmt. Hieraus erfolgte die Identifikation der geeignetsten Schweißparameter. Diese Parameter sind anlagenspezifisch und können nicht direkt auf eine andere Schweißanlage übertragen werden. Sie dienen aber als Richtwert zur Nahtoptimierung im Projektkontext.

Nach dem Schweißen erfolgte die Ermittlung der Nahtfestigkeiten. Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen beispielhaft die Ergebnisse der Nahtfestigkeitsuntersuchungen der Materialien „Ecoseal 652“ und „Riverseal 200 HT“ der Firma „Rivertex“ für verschiedene Schweißparameter.

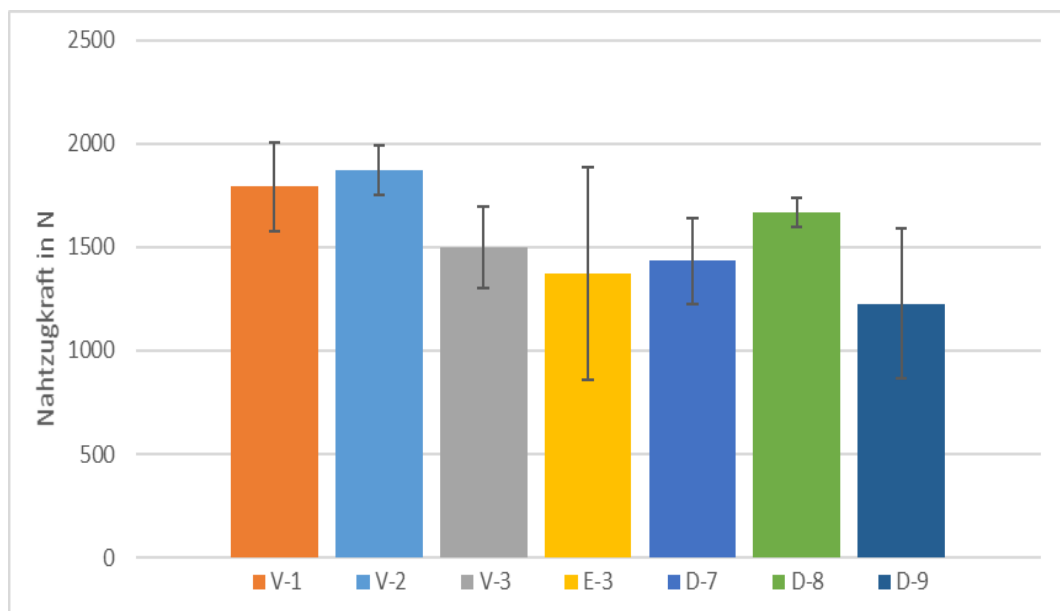


Abbildung 13: Gemittelte Längsnahtfestigkeit für Ecoseal 652

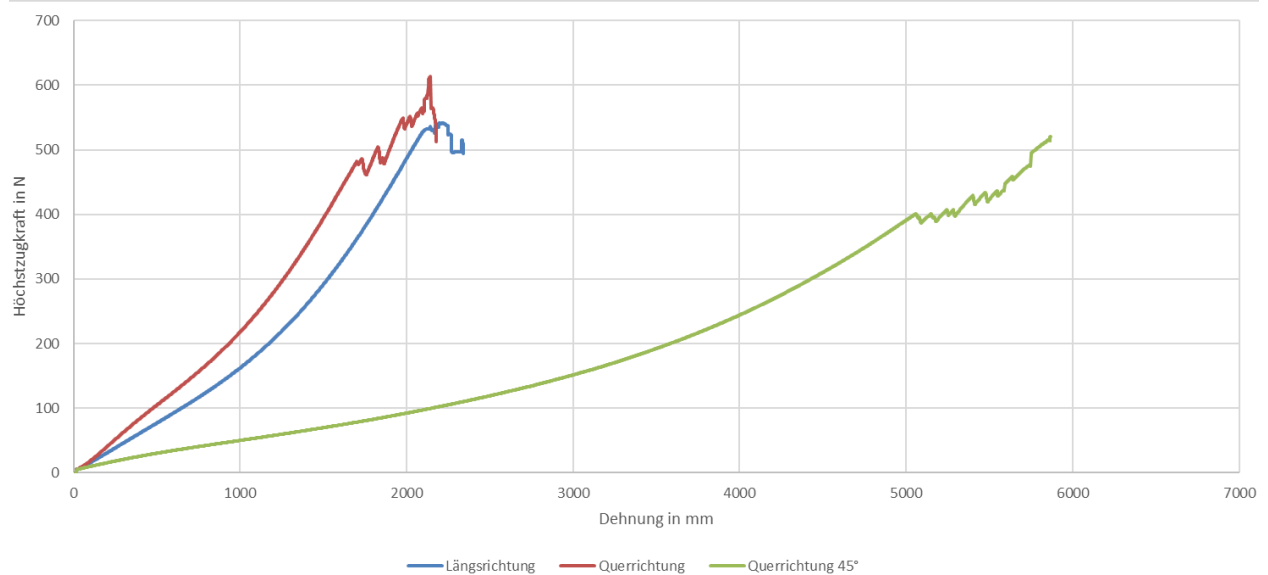


Abbildung 14: Gemittelte Nahtzugkräfte von Riverseal 200 HT in verschiedenen Richtungen

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse als Voraussetzung für die Herstellung der Funktionsmuster erwies sich als einer der Schlüsselfaktoren für die Auswahl des geeignetsten Materials. Auf Basis der Ergebnisse der Untersuchungen zu Materialhandhabung und Schweißbarkeit zeigte das Material „Riverseal 200 HT“ sehr gute Ergebnisse, insbesondere auch hinsichtlich Reproduzierbarkeit. Es verfügt zudem über eine Kombination von mechanischen Eigenschaften, die für die Umsetzung der Funktionsmuster von großem Vorteil waren. Hier sind beispielhaft die hohe Belastbarkeit, die geringe Dehnungsrate, geringe Flächenmaße, eine gute Nahtfestigkeit und die Wasserdichtheit zu nennen. Das Material bestand zudem den Bruchdehnungstest nach 24-stündigem Eintauchen in Wasser bei 20 °C gemäß ISO 1421.

In Abbildung 15 und Abbildung 16 ist das Zugfestigkeits- und Kraft-Dehnungs-Verhalten zur Feststellung der optimale Schweißparameter für „Riverseal 200 HT“ zusammengefasst. Bei einer Schweißenergie von 90 W bis 95 W werden die besten Ergebnisse erzielt. Dementsprechend wurde dieser für alle weiteren Arbeiten mit diesem Material verwendet. Weitere Informationen zum genutzten Schweißverfahren folgen in Abschnitt 2.3.5.

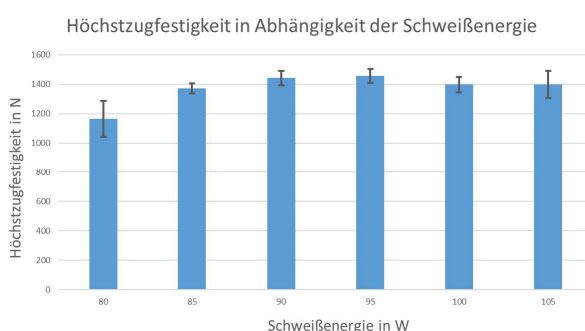


Abbildung 15: Gemittelte Zugkräfte Riverseal 200 HT

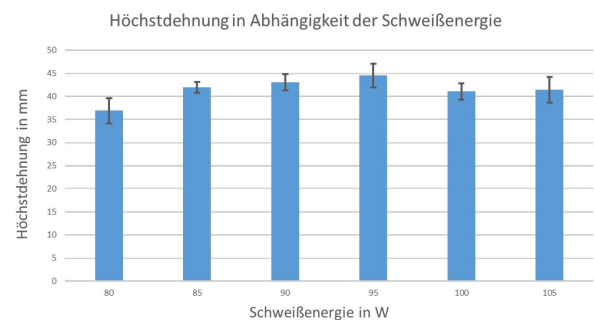


Abbildung 16: Kraft-Dehnungs-Verhalten Riverseal 200 HT

2.3.3 Konzeption der Funktionsmuster (Raumteiler, Wandbehang, Lamelle), Festlegung der Funktionalität

Die Konzeption der Funktionsmuster wurde auf Grundlage der Materialkombinationen und der ermittelten Randbedingungen aus AP 2.3.1 entwickelt. Die drei Funktionsmuster unterliegen dabei jeweils anderen mechanischen, thermischen und hydraulischen Anforderungen. In der nachfolgenden

Übersicht sind die wesentlichen, zugrundeliegenden Aspekte und Anforderungen zusammengeführt.

Konzeption Raumteiler:

- Funktionsumfang:
Freistehend im Raum, flexibel anschließbar über Bodencontainer o.ä., Kühlung, senkrechte Durchströmung, Nutzung des Wärmeüberganges durch Strahlung infolge geringer Abstände von den Nutzern
- Modularer Aufbau, Kombination verschiedener Elemente sicherstellen
- Modulare hydraulische Verbindung durch Einheitsanschlüsse
- Geometrische Randbedingungen:
Abmessungen HxB 80 cm x 80 cm, maximales Gewicht 4 kg, frei positionierbar, Sicherstellung der Standsicherheit

Konzeption Lamelle:

- Funktionsumfang:
Verschattungselement am Fenster, zu Lamellenvorhang kombinierbar, serieller bzw. paralleler Betrieb, Kühl- und Heizelement, senkrechte Durchströmung, geometrisch flexibel
- Randbedingungen:
Abmessungen: 12 cm x 150 cm, maximales Gewicht: 1-2 kg pro Lamelle

Konzeption Wandbehang:

- Funktionsumfang
Auch als Kühlelement in der Decke, waagerechte Durchströmung, komplexere Entlüftung, mäanderförmige Durchströmung analog Fußbodenheizung sinnvoll
- Randbedingungen
Abmessungen: analog Standard-Deckenpaneel 60 cm x 60 cm, maximales Gewicht: 2 kg

Das Konzept der durch Ultraschallschweißen direkt im Material integrierten Kanäle wurde gewählt, weil es im Vergleich zur schlauchführenden Variante (mit teilweise aufgenähten Schläuchen) deutlich sicherer in der Herstellung ist. Zudem ist durch den direkten Kontakt zwischen dem textilen Gewebe und dem Medium in den Kanälen ein deutlich gleichmäßigerer und höherer Wärmeübergang erzielbar. Die schweißtechnisch integrierten Kanäle bieten zudem die Möglichkeit, nahezu beliebige Konturen im Textil zu erzeugen.

2.3.4 Konstruktive Details der Funktionsmuster, Ableitung fertigungstechnischer Parameter

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erfolgte die Entwicklung und Prüfung einer Vielzahl möglicher Fertigungsdetails der Funktionsmuster, um eine Verbesserung der thermischen und regelungsspezifischen Eigenschaften der textilen Temperiersysteme zu erzielen.

Es wurden die Medienführung, der Nahtabstand und die Positionierung der Zu- und Abflüsse variiert, um die praktische Anwendbarkeit zu verbessern. Im Ergebnis der Untersuchungen konnten sowohl der Druckverlust als auch die Anzahl der Umlenkungspunkte in den textilen Temperiersystemen deutlich verringert werden.

Abbildung 17 zeigt beispielhaft unterschiedliche Fertigungskonzepte für Kanalformen und Kanalführung in den Lamellen. Es wird ersichtlich, dass hierfür ein hoher Fertigungsaufwand erforderlich ist. Durch geeignete Automatisierungsschritte ist der Aufwand jedoch gut reduzierbar.

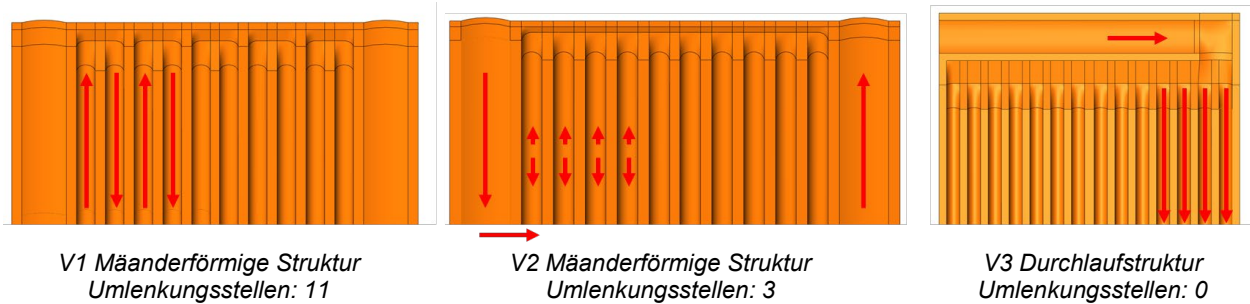


Abbildung 17: Geometrische Varianten für die Fensterlamelle

Das Konzept der integrierten Kanäle erforderte eine zum Teil aufwändige mechanische Vorformung des Materials an den Kanalpositionen, was sich negativ auf die Reproduzierbarkeit der gefertigten Funktionsmuster auswirkte. An dieser Stelle wären umformtechnisch vorgeformte Textilien eine wesentlich besser geeignete Lösung gewesen. Dieser Aspekt konnte im hier vorgestellten Projekt allerdings nicht realisiert, sollte jedoch in einem Nachfolgeprojekt aufgegriffen werden. Beispielsweise wäre es möglich, Kanäle durch warmumformende Verfahren in die Textilien einzubringen.

Um die Komplexität bei der Materialhandhabung durch die mechanische Vorformung zu reduzieren, wurde final die Herstellung von Kanälen auf Basis flach übereinanderliegender Textilien verfolgt. Die Kanalbildung erfolgte dann erst als Ergebnis der Druckbeaufschlagung (vgl. Abbildung 18).

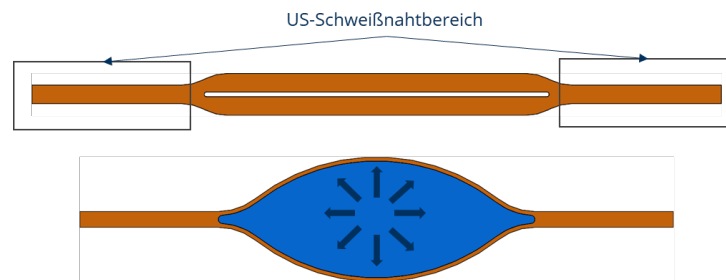
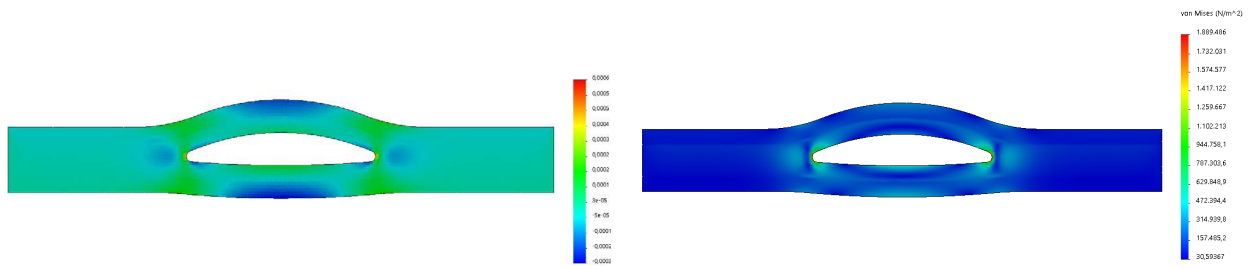


Abbildung 18: Durch den Innendruck ausgeformter Kanal

Die flache Ausgangslage der Konstruktion hat beim Befüllen eine Veränderung der Lamellenabmaße zur Folge. Ein wichtiger Faktor ist dementsprechend die Fertigungsreihenfolge beim Verschweißen, da dadurch ein ungünstiger Versatz oder ein Verwinden der Lamelle entstehen könnte.

Abbildung 19 zeigt eine Druck-Dehnungsanalyse für zwei verschiedene medienführenden Kanalstrukturen bei 1 bar Innendruck. Mit zunehmendem Innendruck steigt die Schubspannung in den Schweißnähten und die Kerbwirkung nimmt zu. Wird die zulässige Nahtfestigkeit überschritten, führt dies zu Undichtigkeiten und zum Versagen der Struktur. Der Effekt ist maßgeblich für die werkstoffabhängige Dimensionierung der Kanäle. Im vorliegenden Projekt ließ sich aufgrund der geringen Datenbasis kein analytischer Zusammenhang hierfür entwickeln. In einem Nachfolgeprojekt sollte diese Problematik allerdings aufgegriffen und gelöst werden. Insbesondere die Kerbempfindlichkeit von geschweißten Textilien ist faktisch unerforscht, stellt aber einen wichtigen Faktor für die korrekte Dimensionierung derartiger Strukturen dar.



Verzerrung in Y-Richtung

Druckspannung im Querschnitt

Abbildung 19: Druck-Dehnungsanalyse von Kanalstrukturen

Um die hydrostatische Druckfestigkeit für Ultraschall-geschweißte Proben abzuschätzen, wurden Wasserdurchlässigkeitstests mit der Texas Instruments FX 3000 Hydrotester III Prüfmaschine mit einer Rate von $60 \pm \text{cmH}_2\text{O}/\text{min}$ steigendem Wasserdruck nach DIN EN ISO 20811 Standard realisiert, siehe Abbildung 20. Es zeigte sich, dass Schweißleistung und Schweißgeschwindigkeit die zwei wesentlichen Parameter für eine hohe hydrostatische Druckfestigkeit der Schweißnähte sind. Es wurde zudem bestätigt, dass der hydrostatische Druckwiderstandswert mit zunehmender Nahtbreite ansteigt. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Schweißnahtbreite die wichtigste Variable zur Beeinflussung der hydrostatischen Druckfestigkeit der Schweißnaht ist. Die Auswirkungen von Schweißdruckkraft, -leistung und -geschwindigkeit sind hingegen eher gering, siehe auch Abbildung 20. Hier wurde ein hydrostatischer Druckwiderstands-Oberflächenplot erstellt, um die optimalen Konstruktionspunkte zu ermitteln.

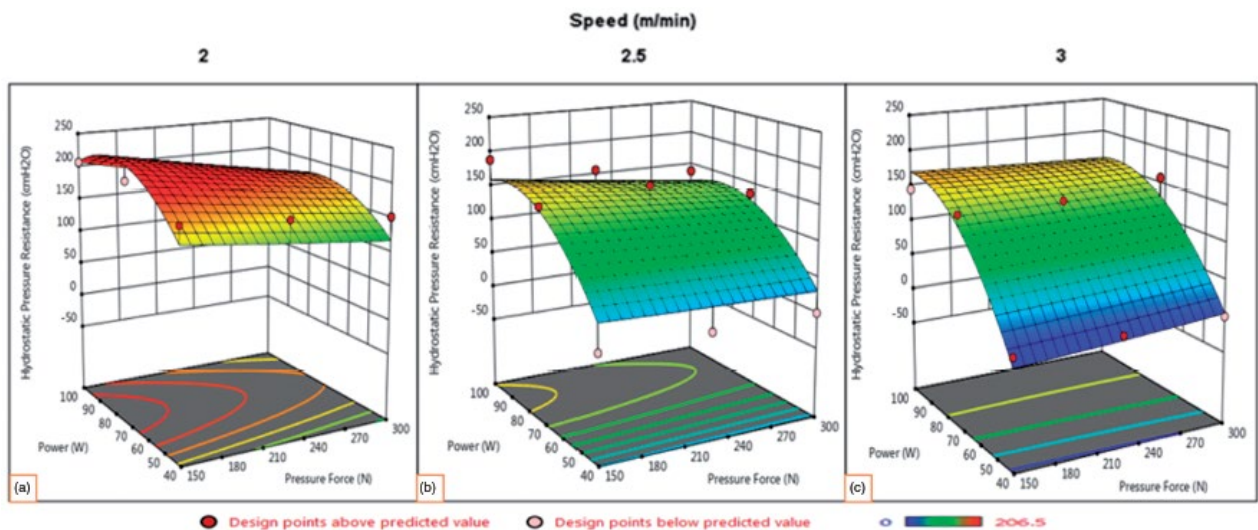


Abbildung 20: Hydrostatische Druckversuche mit verschiedenen Schweißgeschwindigkeiten [Hussein et al.]

2.3.5 Konfektionstechnische Fertigungsmöglichkeiten

Da für die Erstellung der Funktionsmuster das in der Textilindustrie weit verbreitete und insgesamt als zuverlässige und preiswerte Methode anerkannte Ultraschall(US)schweißen genutzt wurde, erfolgt in diesem Abschnitt die Zusammenfassung ausgewählter Untersuchungen bezüglich der durchgeführten Schweißprozesse. Die nachfolgenden Darstellungen in Abbildung 21 zeigen beispielhaft die genutzte Ultraschallschweißanlage (rechts) sowie eine alternativ betrachtete Heißluftschweißanlage (links) beim Schweißen von „Riverseal 200 HT“.

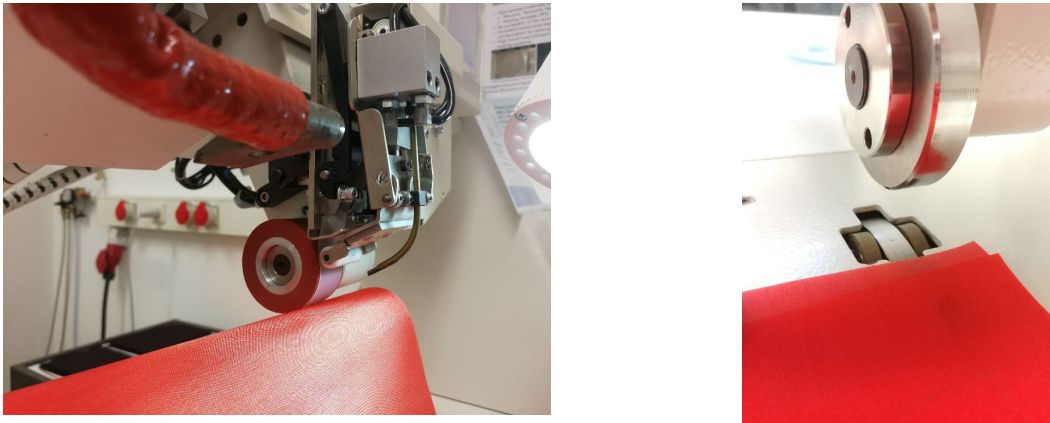


Abbildung 21: Riverseal © 200 HT auf Heißluft Schweißanlage (links) sowie auf US-Schweißanlage (rechts)

Da sich das Heißluftschweißen als sehr kompliziert in der Nutzung zeigte, wurde dieses Verfahren nach einigen Versuchen nicht weiter betrachtet.

Im Rahmen der Schweißversuche erfolgte die Variation der Prozessparameter:

- V → Vorschubgeschwindigkeit,
- E → Energieeintrag,
- D → Anpressdruck.

Es zeigte sich, dass die hierfür jeweils notwendigen Fertigungsparameter stark variieren. Abbildung 22 zeigt die Komplexität des Versuchsplans des Schweißens als Grundlage der Materialprüfungen zur Optimierung der Schweißnaht für „Riverseal 200 HT“.

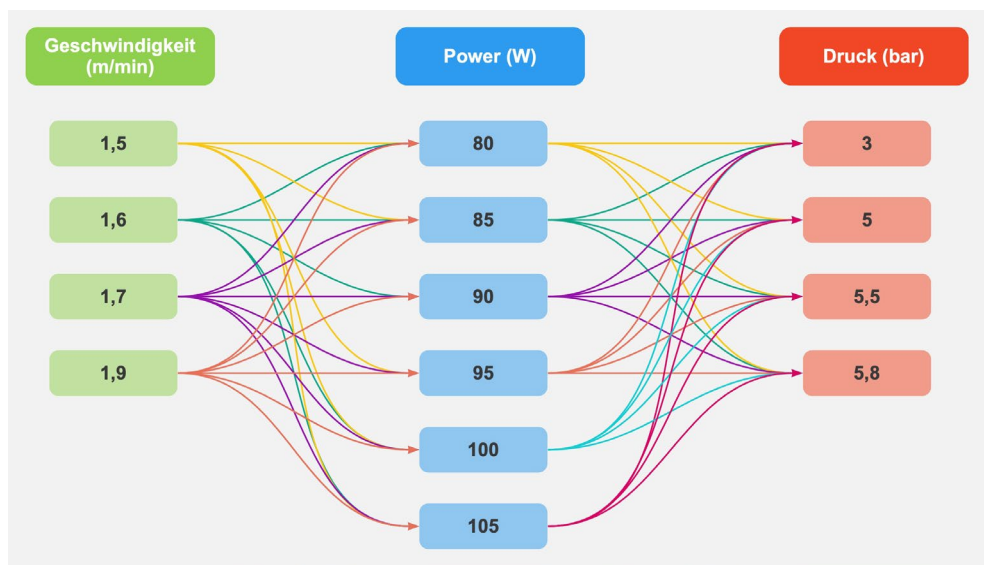


Abbildung 22: Versuchsplan Riverseal 200 HT

Als Nahtbreiten für das Ultraschallverfahren wurden 3 mm und 5 mm gewählt. Diese Breiten ermöglichen beide eine gute Ausformung der notwendigen Kanäle. Die Nahtbreite von 5 mm wurde jedoch verworfen, da die Beschädigungen durch den Schweißprozess insgesamt für eine mediendichte Gestaltung der Textilien zu hoch waren.

Bei der Herstellung und Erprobung der textilen Temperiersysteme zeigte sich zudem, dass die ermittelten Nahteigenschaften trotz gleicher Schweißparameter abweichen. Zudem kam es bei einer längeren Schweißdauer (größer 10 s) zu Fehlern in der Schweißnaht, wodurch die mediendichte Ausführung nicht mehr gewährleistet werden konnte. Weiterhin stellte sich erst bei der Herstellung der gesamten textilen Temperiersysteme heraus, dass sich ein langsames und gleichmäßigeres

Abkühlen der Schweißnaht vorteilhaft auf die Mediendichtheit auswirkt. Diese Beobachtung konnte ebenfalls durch thermische Simulationen der Schweißprozesse reproduziert werden. In Abbildung 23 sind ausgewählte Resultate der sich einstellenden Temperaturfelder infolge unterschiedlicher Nahtbreiten und Überlappungen zusammengefasst.

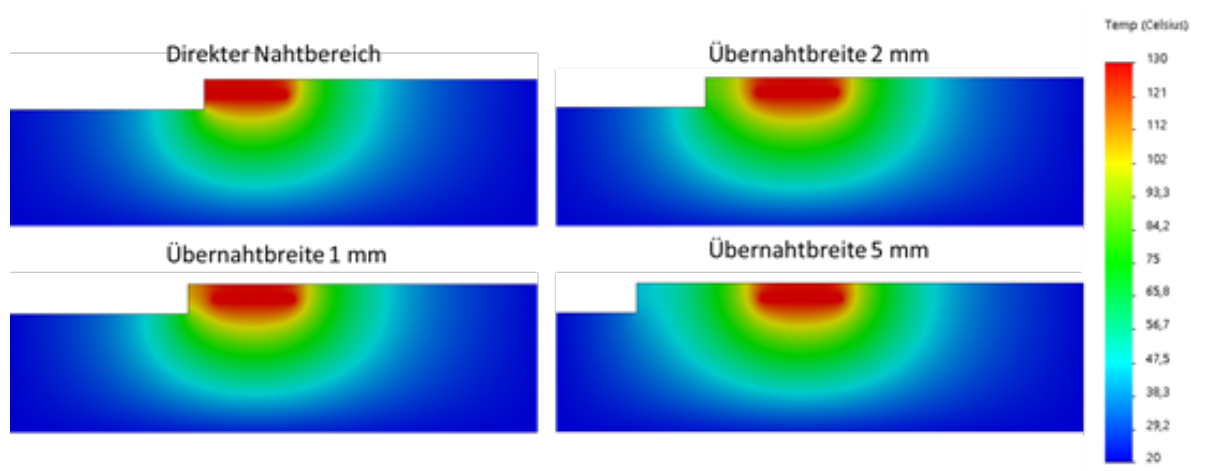


Abbildung 23: Thermischer Einfluss der Überlappungsbreite auf das Abkühlverhalten des textilen Kunststoffes (stationäre Wärmeausbreitung; Umgebungstemperatur 20°C, Materialkombination TPU/PA-Textil mit festem Untergrund)

Ein abruptes Abkühlen in Form von erzwungenen Wärmeübergängen führt zu Temperaturzonen, die ein anderes Abkühlverhalten aufweisen als benachbarte Zonen. Damit entstehen während des Abkühlvorgangs Spannungsspitzen, die zu Hohlräumen in der Schweißnaht führen können.

Ein weiteres interessantes Schweißverfahren ist das Hochfrequenzschweißen (HF, Abbildung 24). Hierbei erfolgt der Schweißvorgang durch Zuführen von HF-Energie in Form eines elektromagnetischen Felds und unter Druck auf die zu verbindenden thermoplastische Materialien. Die Hauptanforderung dieses Schweißverfahrens ist, dass die Materialien eine hohe Dielektrizitätskonstante aufweisen. Das ausgewählte Material „Riverseal 200 HT“ ist mit TPU beschichtet und ist für das HF-Schweißen ebenfalls geeignet. Die nachfolgend beschriebenen zusätzlichen HF-Schweißtests (Naht: 2*20 cm) wurden durchgeführt, um geeignete Schweißbedingungen für „Riverseal 200 HT“ zu ermitteln. Als am besten geeignete Schweißbedingungen für das Material wurden die nachfolgenden Parameter identifiziert:

Tabelle 6. Ermittlung des HF-Schweißparameters für Riverseal 200 HT

Parameter	Riverseal 200 HT
Schweißzeit (s)	7
Schweißdruck (bar)	4
Schweißleistung (%)	65
Kühlzeit (s)	5,5
Druck während Kühlzeit (bar)	4

Das HF-Schweißverfahren ist ein intermittierendes Fertigungsverfahren. Die Materialverbindung unterhalb der Elektrode findet dort statt, wo die elektromagnetische Energie auf das Material übertragen wird. Um Kanäle in der Textiloberfläche zu schaffen, muss es in der Elektrode Zonen geben, in denen die elektromagnetische Energie NICHT zum Material durchdringen darf. Der zuverlässigste Weg, dies zu erreichen ist, dass das Kanaldesign in die Elektrodenoberfläche gefräst wird. Auf diese Weise kann der Hohlraum zwischen der Elektrode und dem zu schweißenden Material realisiert werden. Um ein geschlossenes Kanalsystem herzustellen, ist eine Vielzahl unterschiedlich gestalteter Elektroden erforderlich. Dementsprechend ist dieses Verfahren eher für eine Großserienproduktion von Interesse.



Abbildung 24: HF-Schweißanlage am ITM (FE 2)

2.3.6 Lösungen zur Funktionsintegration für Verbindungsanschlüsse für Zu- und Ablauf, Wartungszugänge, Befestigungen

Die sichere Anbindung an standardisierte Rohrleitungs- bzw. Verbindungssysteme stellte eine nicht unerhebliche Herausforderung im Projekt dar. Hierzu wurden verschiedene Optionen untersucht, das flexible, flächige Textil mit handelsüblichen Medienanschlüssen zu verbinden. Darüber hinaus wurden verschiedene Befestigungssysteme für die Textilien betrachtet.

Für die wasserseitigen Anschlüsse an die textilen Temperiersysteme wurden Schläuchen mit Innendurchmessern von 6 mm, 8 mm und 10 mm getestet. Es wurden unterschiedliche Verbindungstechnologien (Kleben, Schweißen und mechanische Schraubverbindungen) untersucht. Die Integration der starren Anschlüsse in das flexible Material und die damit verbundene Sicherstellung der Dichtigkeit stellten sich als besondere Herausforderungen dar.

Die Methode des Klebens erwies sich als nicht zuverlässig, da Fehler und Luftblasen in den Nähten auftraten. Die Sicherstellung einer stabilen, und mediendichten Betriebsweise war nicht gewährleistet. Dementsprechend wurde das Verfahren als reines Verbindungsverfahren frühzeitig zurückgestellt. Als Verfahren zur nachträglichen Abdichtung hat es allerdings Potential.

Eine zusätzliche Herausforderung für den Einsatz von Klebstoff war, dass das Eindringen des Klebstoffs in die Fügestelle zwischen Rohr und textilen Materialien nicht sichergestellt werden konnte. Abbildung 25 zeigt eine Lamelle mit eingeklebter Anschlussstülle an eine Prüfstation.



Abbildung 25: Eingeklebte Anschlussstülle

In ähnlicher Form mussten die für die Integration der Anschlüsse untersuchten Schweißverfahren als untauglich bewertet werden. Mit Hilfe der US-Schweißtechnik konnten zwar vielversprechenden Verbindungen mit standardisierten PVC-Anschlussstücken geschaffen werden, diese erwiesen sich allerdings in der Fertigung als sehr fehleranfällig und somit ungeeignet für größere Stückzahlen.

Die untersuchten Pressverbindungen waren hingegen bei geringem fertigungstechnischem Aufwand selbst bei höheren Systemdrücken mediendicht, was sie zu einer sehr effektiven und robusten Anschlussvariante macht. Dabei konnte auf Standard-Bauelemente vom Prinzip einer Schottverbindung zurückgegriffen werden, siehe Abbildung 26.



Abbildung 26: Integrierter Schnellsteckanschluss

Ein bisher ungelöster Punkt ist die in dieser Form schlecht automatisierbare Integration im Textil. An dieser Stelle muss auf weitere Forschung gesetzt werden, um die Verbindungen durch andere Technologien einfacher und preiswerter zu realisieren.

Abbildung 27 zeigt die Reihenfolge der Arbeitsschritte, die zur Einbringung der Kraftanschlüsse mit Textilfläche notwendig sind.

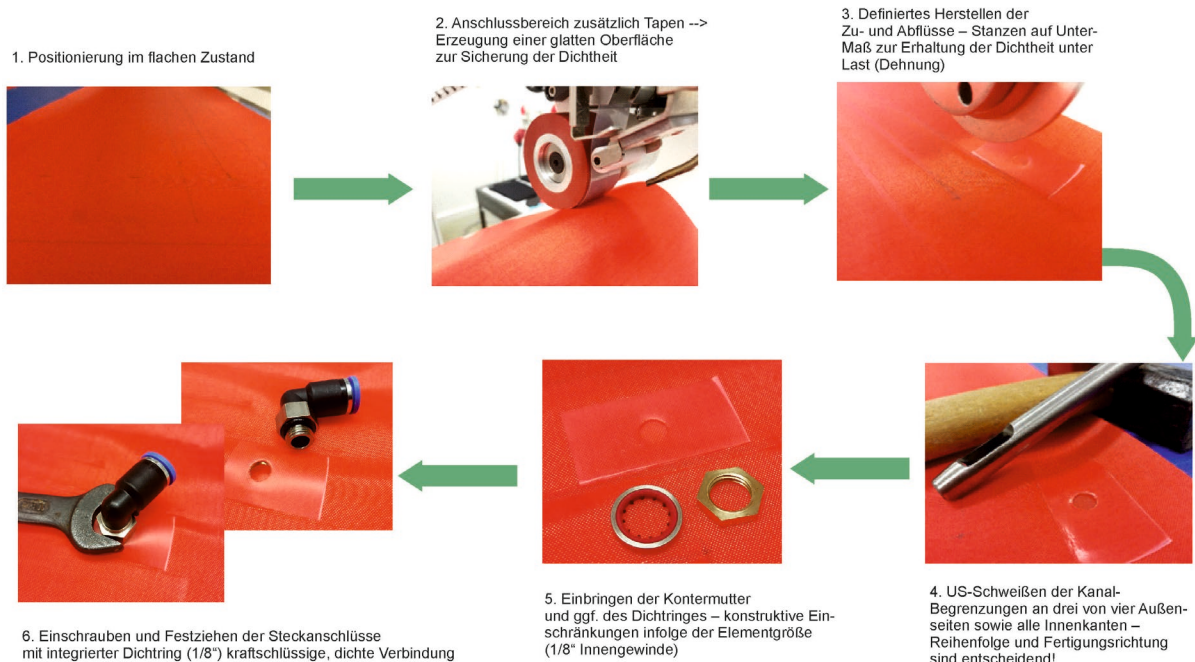


Abbildung 27: Arbeitsschritte zur Einbringung der Kraftanschlüsse

2.3.7 Funktionsmuster (3), Demonstrator (1)

Nach Abschluss der grundlegenden Vorversuche sind drei unterschiedliche Funktionsmuster (Raumteiler, Fensterlamelle, Deckenelement) sowie ein Demonstrator entstanden.

1. Modul eines Raumteilers

Das Funktionsmuster für die Erstellung eines Raumteilers hat die Abmessungen in Breite und Höhe von 0,8 m. Die Erstellung von Raumteilern soll dann durch Kombination einer entsprechenden Anzahl dieser Funktionsmuster erfolgen. Die Durchströmung erfolgt senkrecht durch das jeweilige Segment, um die Entlüftung sicherzustellen. Die Segmente sind in drei unterschiedlichen Varianten umgesetzt worden und lassen sich so auch problemlos als Wandelemente nutzen.

Die Variante 1 wurde trapezförmig mit kraftschlüssigen Steckanschlüssen und druckinduzierten, mäanderförmig verlaufenden Kanälen realisiert (Abbildung 28). Aus der Infrarotaufnahme (IR) ist ersichtlich, dass nahezu die gesamte Oberfläche des Funktionsmusters an der Wärmeübertragung teilnimmt. Das heiße Fluid tritt im Heizfall von oben in das Funktionsmuster ein und fließt gleichmäßig durch den seriell gestalteten Kanal. Die Temperaturspreizung zwischen Ein- und Austritt beträgt ca. 6 K.

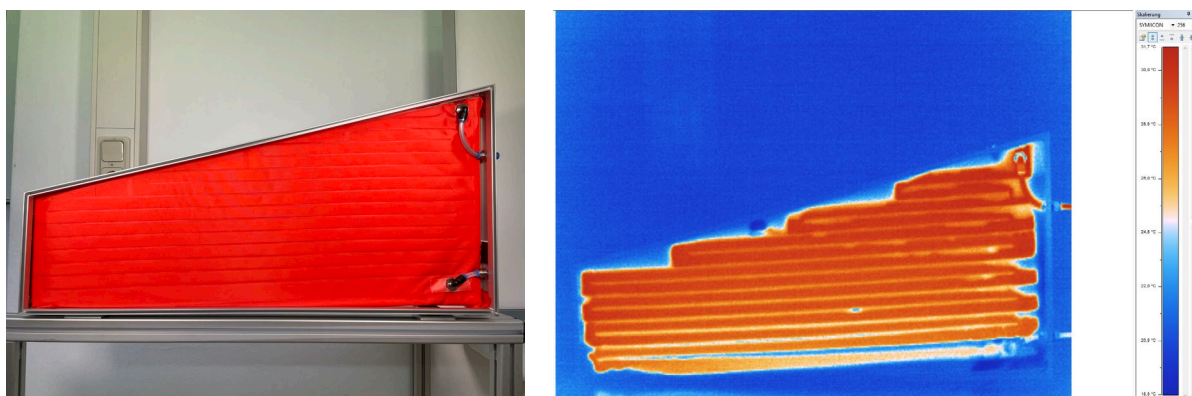


Abbildung 28: Raumteiler Variante 1, links Foto, rechts Thermografie-Aufnahme im Betrieb

Die Variante 2 in Abbildung 29 ist ebenfalls trapezförmig, mit kraftschlüssigen Steckanschlüssen und spiralförmigen, druckinduzierten Kanälen ausgebildet. Die IR-Aufnahme zeigt, dass nicht die gesamte Oberfläche des Funktionsmusters an der Wärmeübertragung teilnimmt und kältere Stellen existieren. Hohe Temperaturen sind in der Mitte des Funktionsmusters am Vorlauf konzentriert. Um die Medien im Raumteiler zu verteilen, muss die Flüssigkeit gegen die Auftriebskräfte gepumpt werden. Dies führt zu unnötigen Druckbelastungen an den Schweißnähten. Das System ist zudem aufgrund der ungleichmäßigen Durchströmung aus Sicht des Wärmeübergangs ineffizient, da sich nicht die gesamte Oberfläche erwärmt. Prinzipiell wurde das Element als Deckenelement konzipiert, da für eine waagerechte Anwendung eine zentrierte Entlüftung sinnvoll sein kann. Ähnlich einer mäanderförmigen Verlegung im Fußbodenbereich könnten hierfür optimale Formen aus einer Kombination von paralleler und serieller Durchströmung gefunden werden.

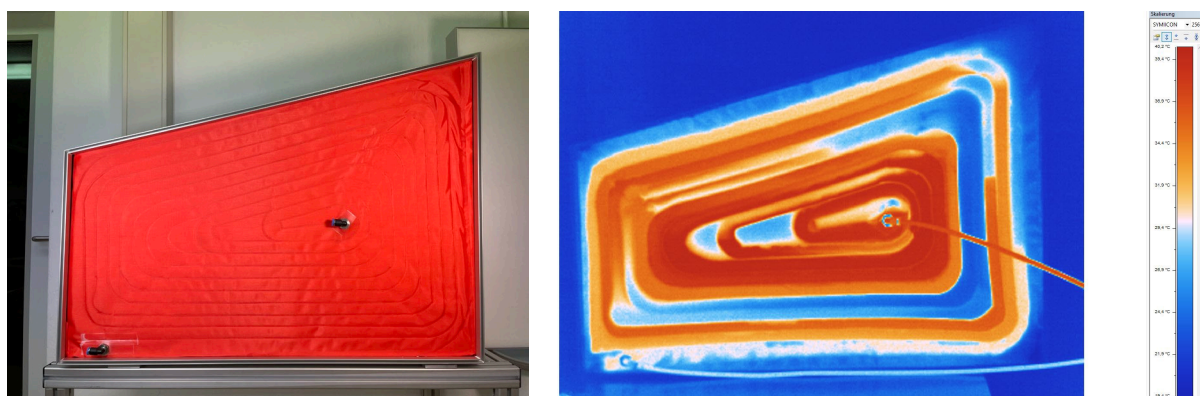


Abbildung 29: Raumteiler Variante 2, links Foto, rechts Thermografie-Aufnahme im Betrieb

Variante 3 ist ebenfalls trapezförmig, hier jedoch mit einem offenen Abstandsgewirke und integrierten Schläuchen konzipiert (Abbildung 30). Bei diesem Funktionsmuster wurden die Schläuche innerhalb des Abstandsgewebes verwendet. Die IR-Aufnahme zeigt, dass der Versuch einer Wärmeübertragung an das umgebende Textil deutlich ineffizienter ist. Eine direkt durchströmte Variante konnte im Rahmen des Projektes nicht realisiert werden, hat allerdings ein großes Potential, da mit ihm die größte Heiz- bzw. Kühlleistung realisierbar wäre.

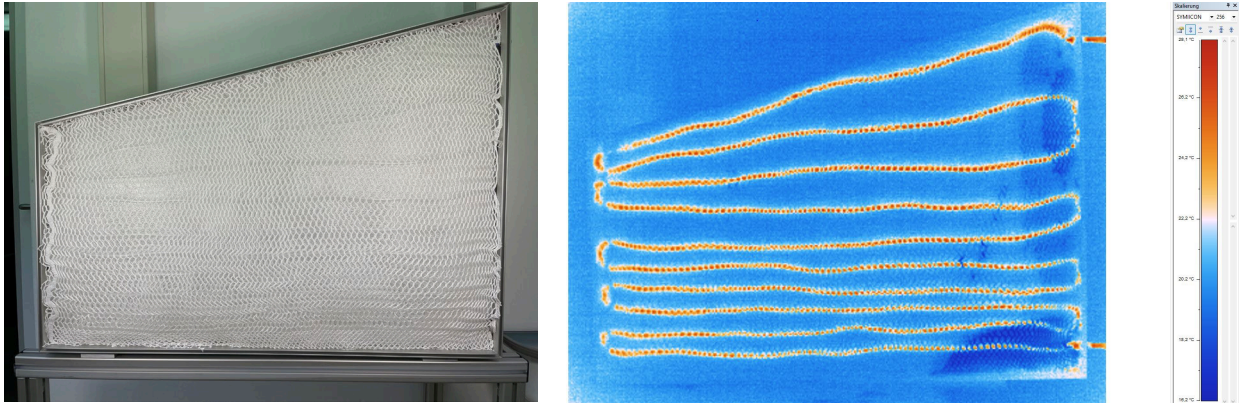


Abbildung 30: Raumteiler Variante 3, links Foto, rechts Thermografie-Aufnahme im Betrieb

2. Lamelle

Die Maße der Lamellen als Funktionsmuster, aus denen auch der von FE 3 untersuchte Demonstrator aufgebaut ist, wurden in Anlehnung an typische Lamellenvorhänge mit 0,12 m x 1,2 m gewählt. Die Anschlüsse wurden in drei Varianten realisiert. Für die erste Variante wurden Steckanschlüsse und Schläuche in die dafür vorgesehenen Öffnungen im Textil gesteckt und mit Hilfe von Klebstoff abgedichtet, siehe Abbildung 31. Die zweite Variante der geklebten Lamelle mit druckinduzierten Kanälen ist in allen Versuchen ausgeschieden. Die Formänderung durch die Druckbeaufschlagung führte zum Versagen der Klebeverbindungen.



Abbildung 31: Geklebte Variante mit Steckanschlüssen

Der dritte Variante wurde auf Basis von Standard-Anschlüssen und Pressverbindungen realisiert. Da die Mediendichtheit ohne zusätzliches Dichtband nicht zu 100% sichergestellt werden konnte, erfolgte eine zusätzliche Integration von Dichtbändern. Im Ergebnis wurden alle Funktionsmuster mit Dichtband im Anschlussbereich unabhängig vom Anschlusstyp als dicht befunden und für den Einsatz im Feldtest freigegeben. Abbildung 32 zeigt die letztlich daraus resultierende Variante für den bei FE 3 messtechnisch untersuchten Demonstrator.

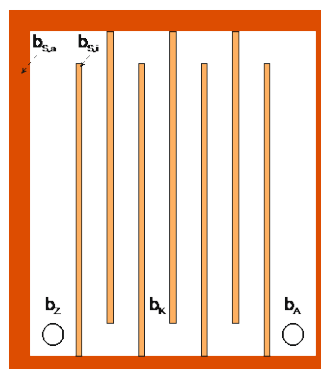


Abbildung 32: Kraftschlüssige Variante mit gewinkelten Steckanschlüssen (links) und Parameter für die kraftschlüssigen Varianten (rechts)

3. Wandelemente

Die Funktionsmuster „Wandelement“ sind durch die Kombination von Raumteilern hergestellt worden. Diese lassen sich an der Wand montieren, aber auch im Raum flexibel positionieren (Abbildung 33).

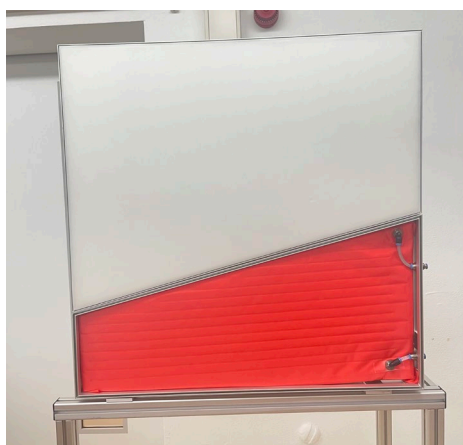


Abbildung 33: Wandelemente Funktionsmuster

Zusammenfassend zeigte sich, dass eine einzelne Füge-technologie nicht in der Lage ist, die Komplexität der Herstellung eines textilen Temperiersystems abzubilden. Hierzu ist ein funktionsfähiges, reparaturfähiges, zuverlässiges und reproduzierbares Verfahren notwendig, welches in dieser Form noch nicht existiert. Es besteht weiterer Klärungsbedarf bezüglich der verschiedenen Schweißtechnologien, um derartige Elemente deutlich effektiver zu realisieren. Die Anschlüsse müssen preiswerter und automatisierbarer realisiert werden.

Äußerst positiv ist die Flexibilität beim Design und der hydraulischen Gestaltung der Kanäle einzuschätzen. Das trapezförmige Funktionsmuster wurde bewusst entsprechend gewählt, um die mögliche geometrische Vielfalt des zugrundeliegenden Verfahrens zu zeigen. Prinzipiell sind beliebige zwei- aber auch dreidimensionale Formen realisierbar. Die Kanäle können durch das Ultraschallschweißen auf einfachste Weise eingepreßt werden. Somit lassen sich auch beliebige Kombinationen aus serieller und paralleler Verschaltung realisieren, oder auch bestimmte Bereiche bewusst ausschließen.

2.4 AP 4: Messtechnische Evaluierung, FE 3

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die Funktionsmuster messtechnisch unter verschiedenen Randbedingungen untersucht, um die thermischen Eigenschaften und das Systemverhalten zu bestimmen sowie die Ergebnisse der Simulationen aus AP 2 zu validieren bzw. Randbedingungen für die Simulationen bereitzustellen.

Zur Beurteilung der thermischen Eigenschaften der textilen Temperiersysteme wurden umfangreiche Leistungsmessungen im Heiz- und Kühlbetrieb an den Funktionsmustern durchgeführt. Um das Systemverhalten der textilen Temperiersysteme und die Behaglichkeit im Raum bei deren Anwendung zu untersuchen, wurden typische, transiente Lastverläufe in einem Laborraum mit temperierbaren Umfassungsflächen und innerer Wärmefreisetzung untersucht.

Zur Berücksichtigung des Einflusses der direkten Abfuhr von solarer Einstrahlung bei fensternaher Anbringung der Lamellen, wurden Messungen der Kühlleistung unter Variation der solaren Einstrahlungsintensität in einem Sonnensimulator durchgeführt. Zusätzlich wurde die maximale Wasserspeicherkapazität der Funktionsmuster mit Hilfe von erzwungener Kondensation in einer Klimakammer ermittelt.

Da die messtechnisch erfassten Daten von den Maßen der Funktionsmuster abhängen und im Rahmen der messtechnischen Evaluierung mehrere unterschiedliche Funktionsmuster zur Anwendung kamen, werden in jedem Teilabschnitt die verwendeten Maße der Funktionsmuster für die durchgeführten Untersuchungen angegeben. Die in diesem Arbeitspaket erarbeiteten Erkenntnisse wurden als Randbedingungen sowie als Validierung für die durchgeführten Simulationen verwendet.

2.4.1 Leistungsmessungen und Druckabfallbestimmung der Funktionsmuster

Zur umfassenden Beurteilung der thermischen Eigenschaften der textilen Temperiersysteme wurden die Leistungsmessungen an Funktionsmustern aus dem Arbeitspaket 3 durchgeführt.

Für den Heizfall wurden die Messungen nach dem Vorgehen der Heizkörperleistungsprüfung gemäß DIN EN 442-2 [DIN EN 442-2 2015] durchgeführt. Hierbei wird die Wärmeabgabe im stationären Zustand bei variierenden Randbedingungen gemessen, wobei die Raumlufttemperatur konstant gehalten wird. Um ein Betriebskennfeld zu erstellen, wurden bei gleichbleibendem Massenstrom verschiedene Vorlauftemperaturen eingestellt und die Wärmeabgabe durch die Messung der Rücklauf-temperatur bestimmt. Analog dazu werden die Kühlleistungen der untersuchten Funktionsmuster in einer Klimakammer erfasst. Dabei werden ebenfalls verschiedene Randbedingungen variiert und die Wärmeabgabe im stationären Zustand gemessen. Durch diese umfangreichen Leistungsmessungen können die thermischen Eigenschaften der textilen Temperiersysteme charakterisiert werden. Die Leistungsmessungen wurden hierbei mit 10 aktiven Funktionsmustern innerhalb des Prüfaufbaus durchgeführt. Die Funktionsmuster hatten hierbei die Maße 0,1 m x 1,2 m (0,12 m²).

Nachfolgende Abbildung 34 zeigt hierbei stellvertretend den Aufbau der Funktionsmuster in der Klimakammer zur Leistungsmessung. Im Vordergrund sind die Personendummies zur Freisetzung der inneren Wärmelasten zu erkennen.



Abbildung 34: Aufbau der Funktionsmuster in einer Klimakammer zur Leistungsmessung

In Abbildung 35 sind die Ergebnisse der Leistungsmessung von textilen Funktionsmustern dargestellt. Die Messungen wurden unter Berücksichtigung von Betriebsbedingungen mit und ohne aktivem Fenster durchgeführt. Die Funktionsmuster wurden während der Leistungsmessung in einer Ausrichtung parallel zur Kabinenrückwand positioniert, was einem "geschlossenen" Zustand einer „Klimagardine“ entspricht. Im Betrieb ohne Außenfenster wurde eine gemessene Nennleistung im Kühlfall von 19 Watt pro Lamelle ermittelt. Die Kühlleistung erhöht sich um etwa 30% auf 25 Watt pro Lamelle, wenn die Funktionsmuster vor einem Außenfenster platziert werden. Die Positionierung der Funktionsmuster parallel zur Kabinenwand vor einem Außenfenster wird in Abbildung 37 als Thermografieaufnahme dargestellt. Die Ausrichtung der Funktionsmuster senkrecht zur Kabinenwand (offen) ergab eine gemessene Kühlleistung von 18 Watt pro Lamelle. Bei Platzierung vor einem aktiven Fenster konnte eine Erhöhung der Leistung um etwa 20% festgestellt werden. Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse der Leistungsmessung im Heizbetrieb bei einer Anordnung der Funktionsmuster parallel (geschlossen) gegenüber senkrecht (offen) zur Kabinenwand. Das aktive Außenfenster stellte hierbei die einzige Wärmesenke dar. Die Abweichung der Heizleistung bezogen auf die Ausrichtung der Funktionsmuster gegenüber dem Außenfenster (parallel/senkrecht) beträgt hierbei ca. 15%. Die Positionierung der parallel zum Außenfenster angeordneten Funktionsmuster für den Heizfall wird in Abbildung 38 als Thermografieaufnahme dargestellt.

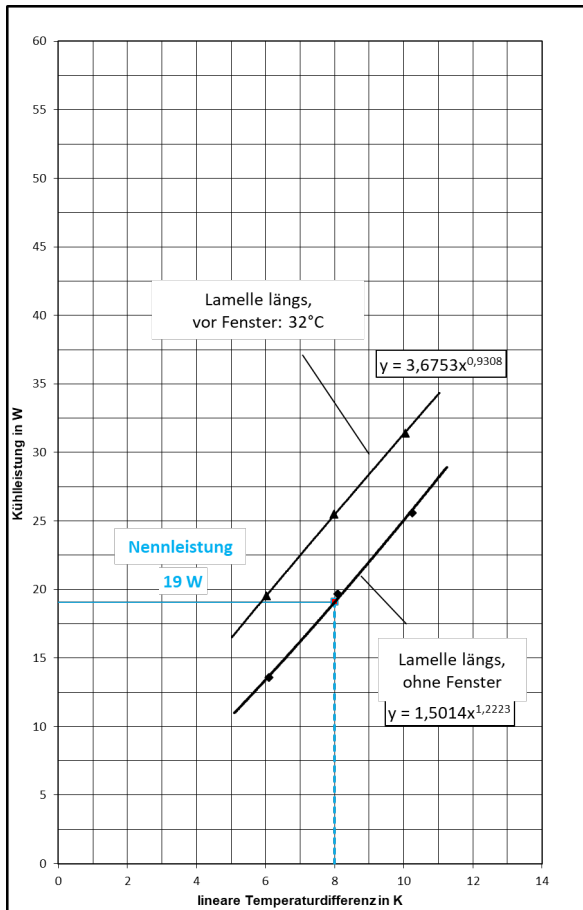


Abbildung 35: Leistungsmessung Kühlfall

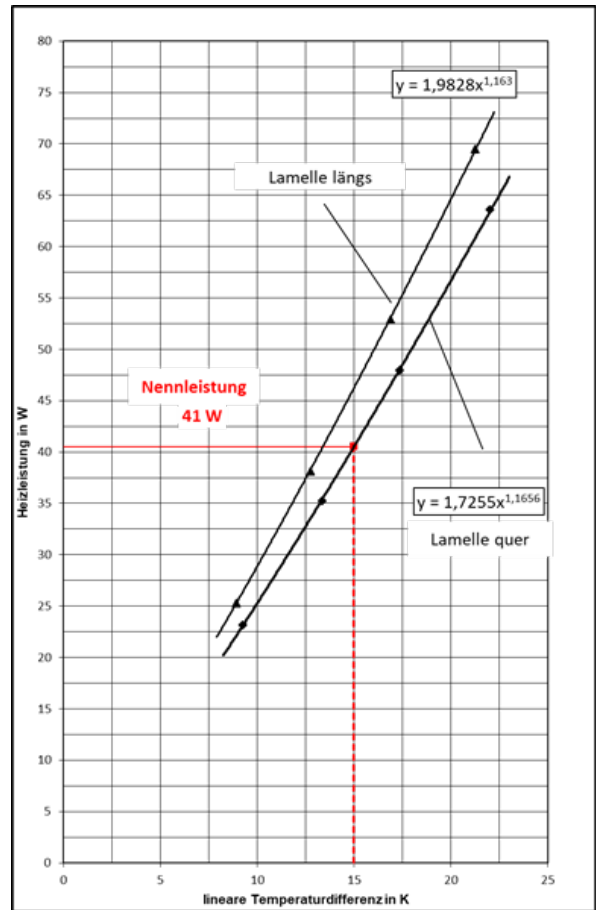


Abbildung 36: Leistungsmessung Heizfall

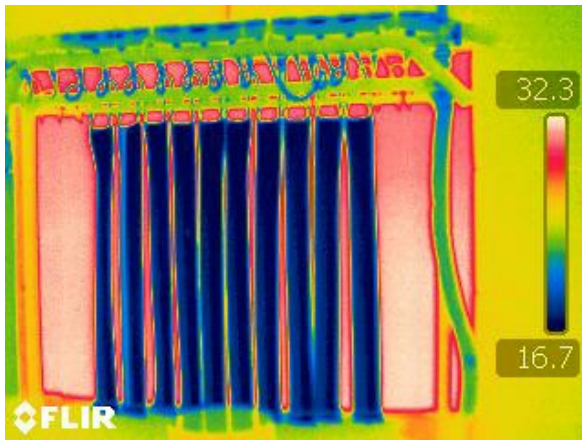


Abbildung 37: Thermografie Kühlfall

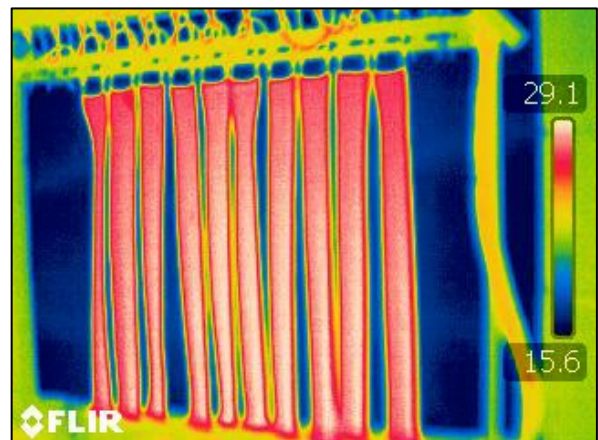


Abbildung 38: Thermografie Heizfall

Neben den thermischen Leistungen des Systems wurden auch die hydraulischen Eigenschaften hinsichtlich des Druckverlustes bei der Durchströmung der Kanäle für verschiedene Betriebspunkte bestimmt, um somit im Zuge des Forschungsvorhabens eine Optimierung der Funktionsmuster bezogen auf die hydraulischen Eigenschaften zu erzielen. Die ermittelten Kennfelder wurden anschließend als Randbedingungen in die numerischen Untersuchungen aus AP 2 einbezogen.

Abbildung 39 zeigt hierbei beispielhaft die Gegenüberstellung von Kennfeldern des Druckverlustes für zwei unterschiedliche Funktionsmuster bei variierender Wassertemperatur.

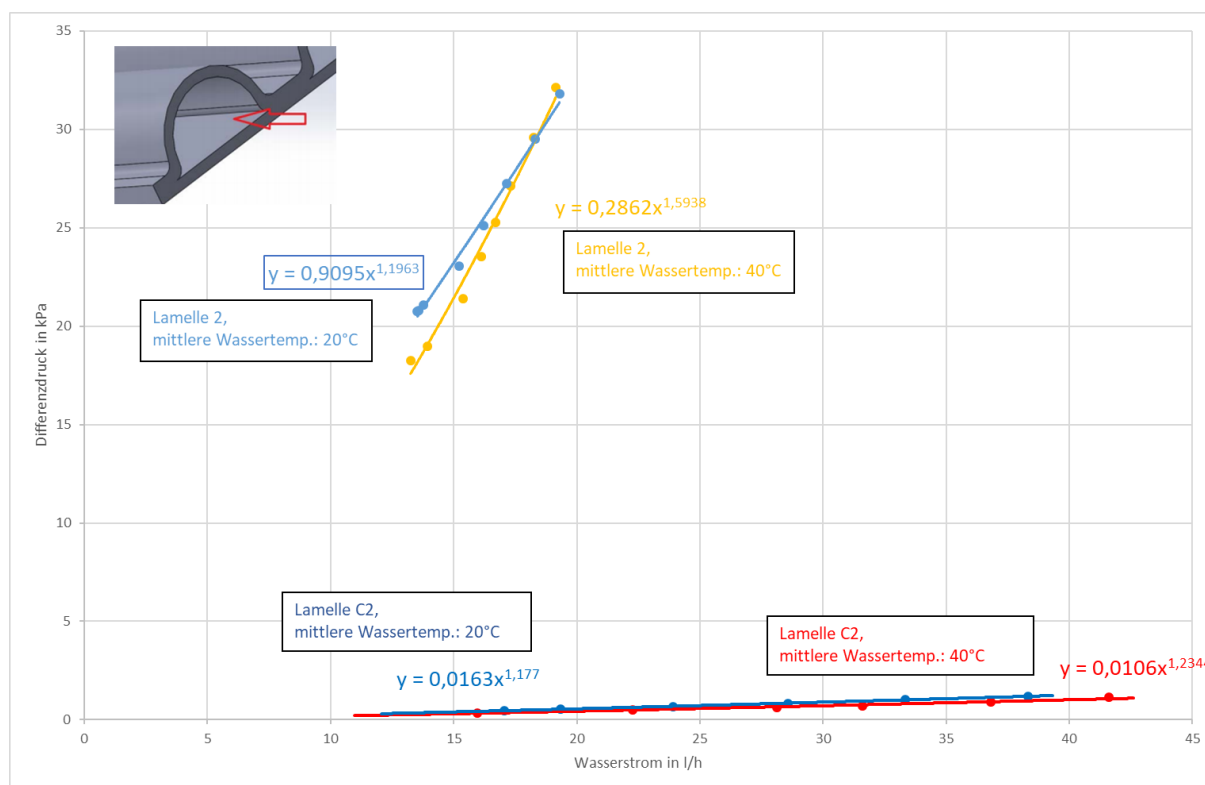


Abbildung 39: Beispiel der Kennfelder bezogen auf den Druckverlust unterschiedlicher Funktionsmuster bei variierender Wassertemperatur

Zu erkennen ist, dass der Druckverlust des Funktionsmusters „Lamelle C2“ gegenüber dem Funktionsmuster „Lamelle 2“ signifikant reduziert werden konnte. Ebenso ist eine leichte Temperaturabhängigkeit des Strömungswiderstands zu erkennen. Dies ist auf die Veränderung der Viskosität des Wassers, die "Steifigkeit" des Materials sowie einen möglicherweise variablen Querschnitt der Kanäle innerhalb des Funktionsmusters aufgrund von Ausdehnung bei höheren Temperaturen zurückzuführen. Der Einfluss der Temperatur auf den Strömungswiderstand nimmt mit zunehmendem Durchfluss und Druck ab. Die Funktionsmuster hatten hierbei die Maße 0,1 m x 1,2 m (0,12 m²). Innerhalb der Funktionsmuster wurden die Kanalquerschnitte und somit auch deren Anzahl innerhalb einer Lamelle variiert, siehe auch Abschnitt 2.3.4.

2.4.2 Untersuchung typischer Lastfälle in Laborräumen

In einem Laborraum mit temperierbaren Umfassungsflächen und innerer Wärmefreisetzung durch Personen-Dummys wurden typische Lastverläufe aufgeprägt und das Systemverhalten des textilen Temperiersystems sowie die thermische Behaglichkeit im Raum untersucht. Zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit wurde ein Messbaum zur Erfassung der Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur sowie ein Globe-Thermometer zur Erfassung der operativen Temperatur in den Laborraum eingebracht. Der Prüfaufbau umfasste dabei jeweils 10 textile Funktionsmuster als Klimagardine. Die Klimagardine wurde hierbei vor einer frei temperierbaren Wand positioniert, die zur Simulation eines Außenfensters diente. Die Maße der verwendeten Funktionsmuster waren hierbei 0,1 m x 1,2 m (0,12 m²) pro Lamelle.

Variiert wurden im Zuge der Untersuchungen beispielsweise die Oberflächentemperatur der Innenwände, um den solaren Eintrag im Tagesverlauf zu simulieren. Ebenso wurde die Fensterflächentemperatur tageszeitbezogen variiert.

Exemplarisch für die durchgeführten Untersuchungen werden nachfolgend Ergebnisse für die Betrachtung des Kühlfalls bei Variation der Vorlauftemperatur und der inneren Last dargestellt. Ebenso

werden Ergebnisse für den Heizbetrieb dargestellt, welche die Raumlufttemperatur mit und ohne aktiver Klimagardine aufzeigt.

Nachfolgende Abbildung zeigt die resultierenden Raumlufttemperaturen für einen Kühlfall im Laborraum unter Variation der Vorlauftemperatur (15°C bis 17°C) und der inneren Last (10 W/m² bzw. 20W/m²) bei Verwendung des textilen Temperiersystems gegenüber der Raumlufttemperatur ohne aktivem Kühlsystem.

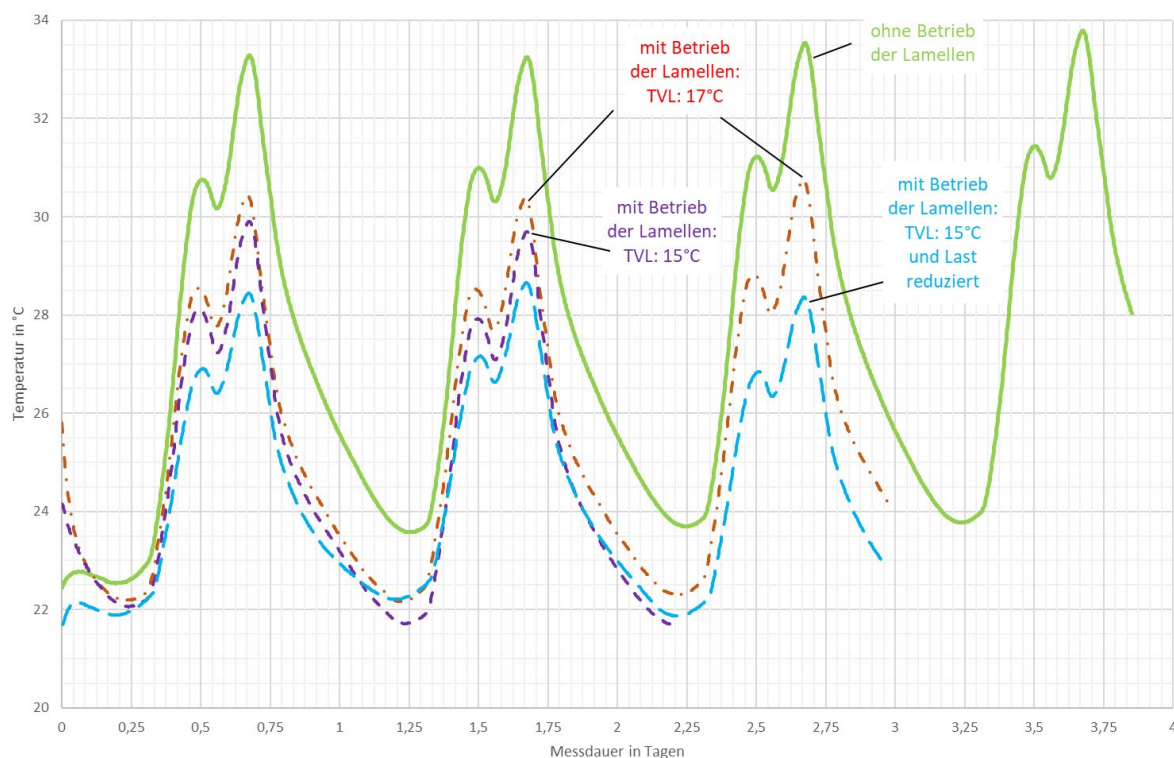


Abbildung 40: Zusammenfassung transiente Lastverläufe – Kühlfall

Die Ergebnisse zeigen, dass die maximale Raumlufttemperatur bei geringerer innerer Last von 10 W/m² und Reduzierung der Wasservorlauftemperatur auf 15°C auf ein Maximum von ca. 28°C gegenüber 34°C ohne aktivem Kühlsystem reduziert werden kann und somit einem Überwärmen des Raumes entgegengewirkt wird.

Analog wurden transiente Lastverläufe für den Heizfall untersucht. Hierbei wurden ebenfalls 10 textile Lamellen vor einem Außenfenster positioniert. Die Vorlauftemperatur wurde tageszeitabhängig zwischen 34°C und 24°C variiert. Bei einer Heizfallbetrachtung werden keine inneren Lasten im Laborraum angenommen. Die äußere Last wird hierbei ebenfalls durch die Variation der Oberflächentemperatur des Außenfensters zwischen 16°C bis 22°C im Tagesverlauf berücksichtigt. Die Gegenüberstellung der resultierenden Raumlufttemperatur im Heizfall mit und ohne Betrieb des textilen Temperiersystems ist in Abbildung 41 dargestellt.

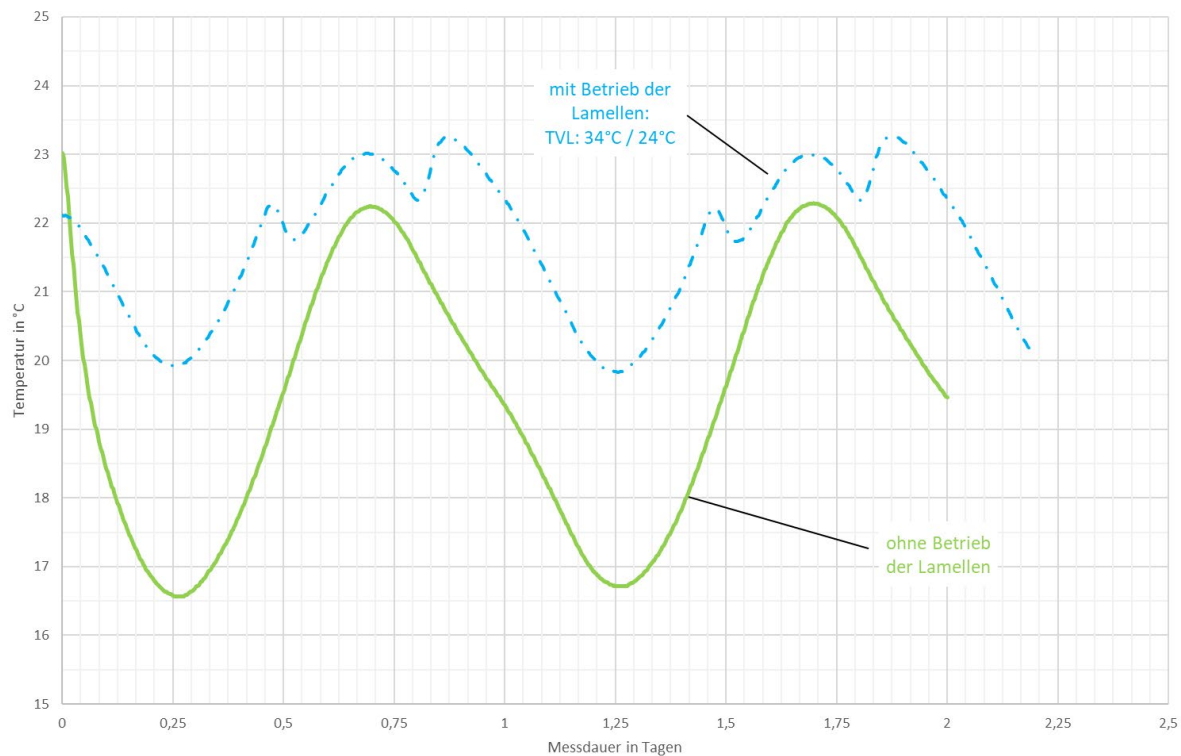


Abbildung 41: Zusammenfassung transiente Lastverläufe – Heizfall

Es ist zu erkennen, dass sich die Raumlufttemperatur, insbesondere nachts, durch den Betrieb der textilen Lamellen signifikant (ca. 3 Kelvin) erhöhen lässt und somit das Auskühlen eines Raumes verhindert werden kann.

2.4.3 Untersuchung der Kühlleistung bei Variation der solaren Einstrahlung

Bei fensternaher Anbringung der textilen Temperiersysteme bieten diese die Möglichkeit, die thermische Last aus der solaren Einstrahlung direkt abzuführen, bevor diese im Raum wirksam wird. Um diesen Effekt messtechnisch zu erfassen, erfolgten Messungen der Kühlleistung unter Variation der solaren Einstrahlungsintensität durch einen Sonnensimulator. Die verwendeten Funktionsmuster hatten hierbei die Maße 0,1 m x 1,2 m (0,12 m²).

Hierzu wurde das Aluminiumgestell mit der Aufnahme für die hydraulische Verteilung und die Funktionsmuster in den Sonnensimulator eingebracht (Abbildung 42). Die Übergabestation wurde vor der Prüfkabine angeordnet. Nachfolgende Abbildung zeigt die in den Sonnensimulator eingebrachten Funktionsmuster (bereits im Sinne eines Demonstrators).

Zur Bereitstellung der Kühlenergie wurde ein Wärmeübertrager in die Übergabestation integriert. Abbildung 43 zeigt exemplarisch für die durchgeführten Messungen die Gegenüberstellung der Kühlleistung des textilen Temperiersystems ohne (0 W/m²) und mit (575 W/m²) solarer Einstrahlung.



Abbildung 42: Ansicht Sonnensimulator mit eingebrachtem Demonstrator zur Ermittlung der Kühlleistung bei solarer Einstrahlung

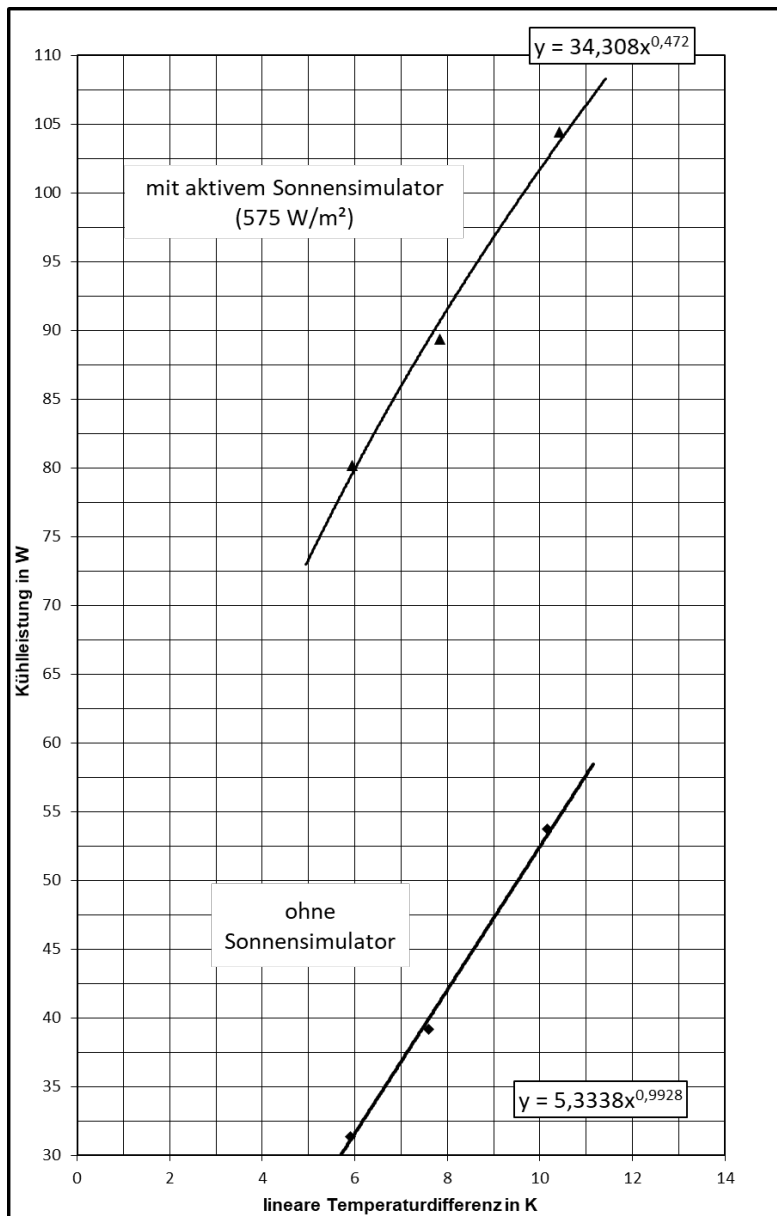


Abbildung 43: Vergleich der Kühlleistung des textilen Temperiersystems pro Lamelle mit und ohne solare Einstrahlung in einem Sonnensimulator

Die resultierende Leistungssteigerung bei direkter solarer Einstrahlung auf die textilen Funktionsmuster sind Tabelle 7 zu entnehmen. Es konnte eine Leistungssteigerung von bis zu 154 % bei zusätzlicher Sonneneinstrahlung gegenüber der Leistung ohne solare Einstrahlung gemessen werden.

Tabelle 7: Steigerung der Kühlleistung durch direkte Abfuhr der solaren Einstrahlung bei einer Strahlungsintensität von 575 W/m²

Vorlauftemperatur	Kühlleistung pro Lamelle		Leistungssteigerung
	ohne solarer Einstrahlung	mit solarer Einstrahlung (575 W/m ²)	
14 °C	53,5 W	103,1 W	93 %
17 °C	39,0 W	88,2 W	127 %
19 °C	31,2 W	79,2 W	154 %

Die Leistungssteigerung der verwendeten Funktionsmuster gegenüber den Ergebnissen in Kapitel 2.4.1 ist auf die weitere Optimierung der Fertigungsschritte sowie der hydraulischen Bedingungen der textilen Lamellen zurückzuführen.

Dieses Ergebnis zeigt, dass die thermischen Kennwerte von textilen Temperiersystemen muster-spezifisch sind und wesentlich von Fertigungsart, Genauigkeit und Ausführung abhängig sind. Die Angabe der Kennwerte wie Leistung und Druckverlust sind daher auf das jeweilige Funktionsmuster bzw. die jeweilige Lamelle bezogen.

2.4.4 Messung zu Feuchtespeichereffekten

Zur Quantifizierung der Wasserspeicherkapazität der Funktionsmuster wurden Untersuchungen in einer Klimakammer durchgeführt. Hierbei wurde ausgehend von einem festgelegten Raumluftzustand, beispielsweise 26°C Raumlufttemperatur und 80 % relative Luftfeuchte, eine Vorlauftemperatur unterhalb des Taupunktes an der textilen Oberfläche eingestellt, um die Kondensation der Luftfeuchte an der Oberfläche der Funktionsmuster zu erzwingen. Das Funktionsmuster hat das kondensierte Wasser zu einem gewissen Grad im textilen Stoff aufgenommen, was über die Massenänderung messtechnisch erfasst werden konnte. Durch Variation der Randbedingungen wurde die maximale Wasserspeicherkapazitäten des Stoffes der textilen Funktionsmuster ermittelt. Die Messungen der Masseänderung bei Erreichen der maximalen Wasseraufnahmekapazität der textilen Lamellen ergab eine mittlere Wasserspeicherkapazität von ca. 0,008 kg Wasser pro Meter Lamelle. Im Zuge der durchgeführten Szenarien konnte ebenfalls eine Entfeuchtung über die textilen Lamellen realisiert werden. Die maximale Entfeuchtungsleistung wurde im Zuge des Forschungsprojektes jedoch nicht untersucht.

2.4.5 Technologieerprobung und Langzeitversuche anhand der Demonstratoren im Kleinmaßstab in einem Büroraum

Im Rahmen dieses Unterarbeitspaketes wurde das Betriebsverhalten textiler Temperiersysteme unter realen Bedingungen, einschließlich der Berücksichtigung von Raumnutzung und Sonneneinstrahlung, in einem Büroraum untersucht. Die Maße der verwendeten Funktionsmuster waren 0,12 m x 1,0 m (0,12 m²). Hierfür wurde ein Demonstrator verwendet, der über einen längeren Zeitraum vor einem Fenster installiert war und textile Funktionsmuster beinhaltete. Der Demonstrator umfasste eine Übergabestation, welche die Komponenten zur Regelung des Massenstroms und Vorlaufemperierung beinhaltete, sowie ein Gestell aus Aluminiumprofilen zur Aufnahme der hydraulischen Verteilung und der Funktionsmuster. Der Aufbau des Demonstrators in einem Büroraum ist in Abbildung 44 dargestellt.



Abbildung 44: Aufbau des Demonstrators im Büroraum

Die Abbildung zeigt auf der linken Seite die Übergabestation, welche ein Durchflussmessgerät, eine Pumpe, einen Heizstab und ein Membranausdehnungsgefäß beinhaltet. In der Mitte des Bildes ist der Behaglichkeitsmessbaum zu sehen, der zur Bestimmung der Behaglichkeit im Raum eingesetzt wurde und mit einem Globe-Thermometer, Turbulenzgradsonden und Feuchtesensoren ausgestattet ist. Ebenfalls zu erkennen ist das Aluminiumgestell im Fenster, welches sowohl die Funktionsmuster als auch die hydraulische Verteilung nach dem Tichelmann-System für die einzelnen Lamellen aufnimmt.

Die Untersuchung des Betriebsverhaltens der textilen Temperiersysteme unter realen Bedingungen umfasste eine flexible Einstellung der Vorlauftemperatur und des Massenstroms zur Versorgung des Demonstrators. Zur Überprüfung des Betriebs wurden die thermischen Leistungen sowie der Raumluftzustand durch Erfassung der Temperatur, Feuchte und Luftgeschwindigkeit ermittelt. Um die lokale thermische Behaglichkeit im Raum zu bewerten, wurde gemäß DIN EN 7726 – 2.1 [DIN EN ISO 7726 2021] eine kontinuierliche Messung des Raumluftzustands in drei unterschiedlichen Höhen durchgeführt. Die Höhen wurden entsprechend einer sitzenden Tätigkeit mit Werten von 0,1 m (Knöchelhöhe), 0,6 m (Unterleibhöhe) und 1,1 m (Kopfhöhe) über dem Boden gewählt. Die solaren Einträge wurden mithilfe eines Pyranometers gemessen, welches die Solarstrahlungsintensität am Fenster in Watt pro Quadratmeter (W/m^2) erfasste.

Im Folgenden werden exemplarisch das Betriebsverhalten (vgl. Abbildung 45) sowie die resultierenden Behaglichkeitswerte PMV und PPD (vgl. Abbildung 46), welche aus den erfassten Messwerten des Raumluftzustandes berechnet wurden, für den Büroraum am 13. Januar 2023 aufgeführt. Die DIN EN ISO 7730 vereint in den Behaglichkeitsparametern PMV und PPD die Raumluft-/ Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit sowie die relative Raumluftfeuchte. Der PMV-Index gibt dabei einen Hinweis auf den durchschnittlichen Klimabeurteilungswert einer großen Gruppe von Personen. Der PPD-Index dagegen bietet eine quantitative Vorhersage über die Anzahl von Personen, die mit einem bestimmten Raumklima unzufrieden sein werden.



Abbildung 45: Betriebsverhalten Demonstrator an einem Wintertag (Januar)

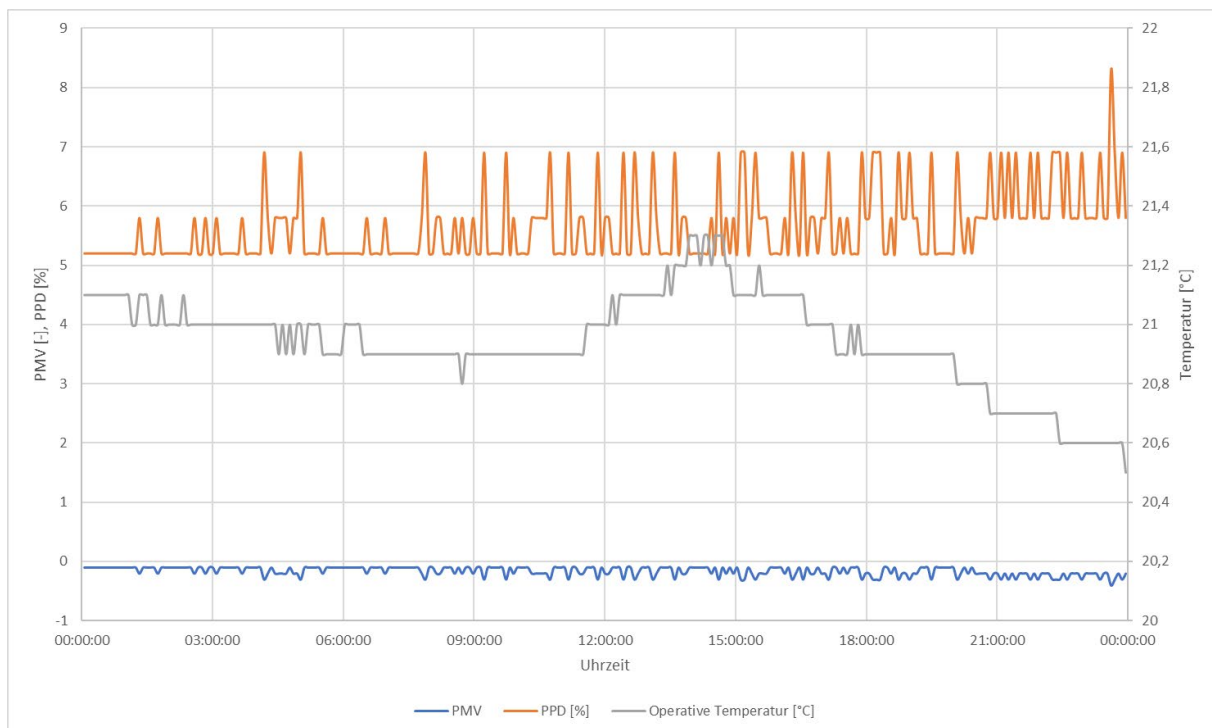


Abbildung 46: PMV und PPD an einem Wintertag (Januar)

Abbildung 45 zeigt, dass die thermische Leistung des textilen Temperiersystems bei einer Vorlauf-temperatur von 35°C und einem Massenstrom von insgesamt 1 l/min im Bereich von 100 bis 120 Watt liegt.

In Abbildung 46 ist zu erkennen, dass die PMV-Werte bei etwa -0,1 liegen. Diese Werte entsprechen der Kategorie A gemäß DIN EN ISO 7730. In ähnlicher Weise befindet sich der PPD-Wert über den

gesamten Zeitraum im Wertebereich unterhalb von 10 %, was ebenfalls der Kategorie A entspricht. Die Raumlufttemperatur betrug über den gesamten Tagesverlauf ca. 20,5 °C.

2.4.6 Bewertung der Systemeigenschaften und Raumklimawirkung sowie Ableitung von Vorschlägen zur Systemprüfung

Basierend auf den Ergebnissen von Laboruntersuchungen unter stationären Randbedingungen sowie transienten, typischen Lastverläufen der textilen Funktionsmuster und den Erkenntnissen aus der Langzeituntersuchung des Demonstrators in einem Büroraum lassen sich folgende Aussagen zu den Systemeigenschaften von textilen Temperiersystemen und deren Einfluss auf das Raumklima treffen. Diese systematische Zusammenstellung dient als Grundlage für praxisnahe Vorgaben bezüglich der Einsatzbereiche und -grenzen und wird in der Handlungsempfehlung in AP6 herangezogen.

Aus den Untersuchungen wurden folgende Erkenntnisse herausgearbeitet:

- Es ist ein Einfluss der Medientemperatur auf den Druckverlust in den textilen Lamellen zu beobachten. Dieser ist sowohl auf die Änderung der Viskosität des Wassers als auch auf die Änderung der „Steifigkeit“ des textilen Materials zurückzuführen. Der Einfluss der Temperatur nimmt mit steigendem Durchfluss/Druck ab.
- Durch einen größeren Strömungsquerschnitt der medienführenden Kanäle innerhalb der textilen Lamellen kann der Druckverlust und damit der Systemdruck minimiert werden. Dies ist insbesondere bei der Skalierung auf größere Maßstäbe, beispielsweise die Anbringung an gesamten Fensterfronten, von elementarer Bedeutung.
- Die thermischen Kennwerte von textilen Temperiersystemen sind stark von Fertigungsart, Genauigkeit und Ausführung der jeweiligen Lamelle abhängig. Die Kennwerte wie Leistung und Druckverlust sind daher auf das jeweilige Temperiersystem bezogen anzugeben.
- Die Leistung des textilen Temperiersystems „Gardine aus Lamellen“ unterscheidet sich, je nach Ausrichtung der Lamellen gegenüber dem Außenfenster/Außenwand. Die Leistung in einem „geschlossenen“ Zustand, parallel zur Außenwand, bewirkt eine Leistungssteigerung von 15%-20% gegenüber einem „offenen“ Zustand (senkrecht zur Außenwand)
- Die Ergebnisse zeigen eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Leistungsdaten. Dies ermöglicht eine schnelle Skalierung der Untersuchung auf neue und angepasste Funktionsmuster.
- Die Kriterien der thermischen Behaglichkeit werden in den untersuchten Szenarien, sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall eingehalten. Dies gilt sowohl für die Langzeitmessung im Büroraum als auch für die Untersuchungen in der Klimakammer
- Durch das textile Temperiersystem kann sowohl dem Abkühlen des Raumes im Heizfall als auch dem Überwärmen des Raumes im Kühlfall entgegengewirkt werden.
- Durch die direkte Anordnung der textilen Temperiersysteme vor dem Fenster kommt es in Folge der direkten solaren Einstrahlung zur effektiven Abfuhr der solaren Lasten, bevor diese im Raum wirksam werden.

2.5 AP 5, Betrachtungen zur Systemintegration der Funktionsmuster, FE 1

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgte eine grundlegende Recherche für die mechanische, hydraulische sowie regelungstechnische Systemanbindung der Funktionsmuster an vorhandene Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage. Daneben wurden Recherchen zu aktuell erhältlichen Systemen für die Integration in das Gebäudeenergiesystem sowie für die Gebäudeautomation durchgeführt. Darüber hinaus erfolgten Konzeptionen zur Systemintegration, die konstruktive Planung für einen

Versuchsaufbau zur Systemintegration und der Versuchsaufbau selbst. In Abbildung 47 ist eine grundlegende Konzeption für die Einbindung des Temperiersystems dargestellt.

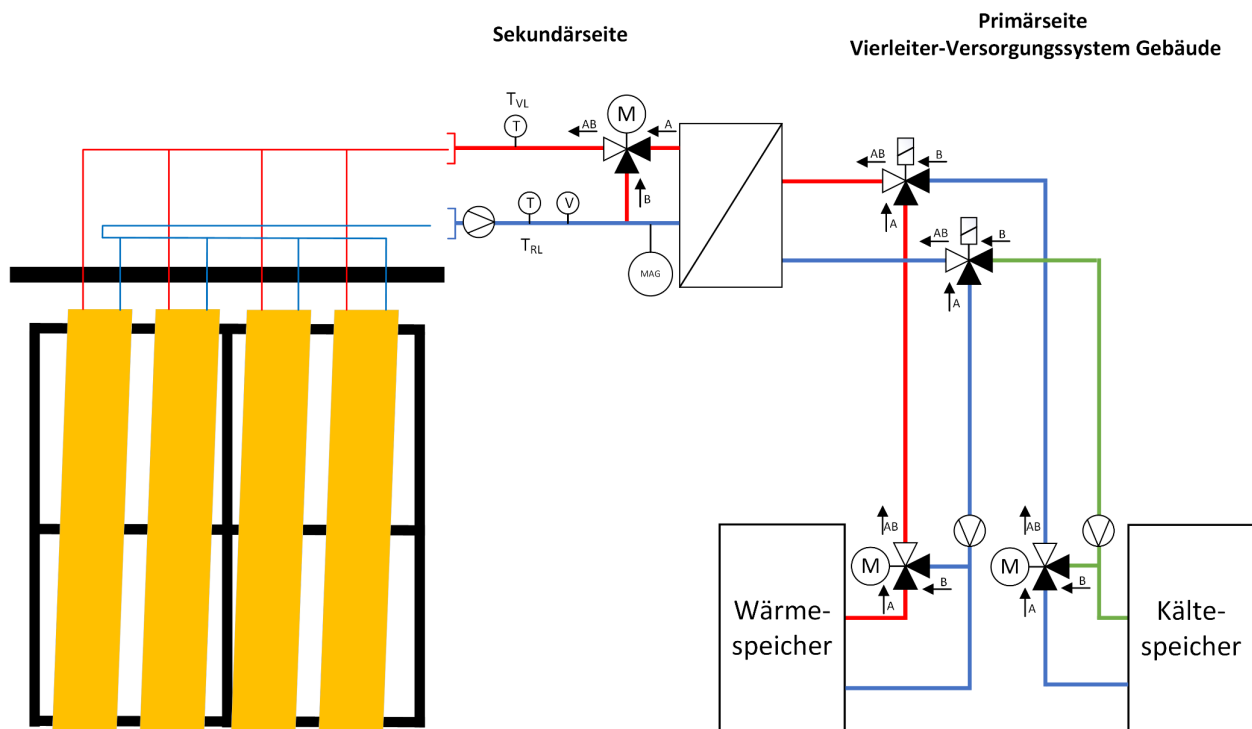


Abbildung 47: Konzeption für die Systemintegration des Temperiersystems in ein Gebäude

Hydraulisch / mechanische Anbindung textiler Temperiersysteme

Für die mechanische Anbindung eignet sich ein Schienensystem mit Laufwagen. Diese kommen auch bei den meisten erhältlichen Jalousiesystemen, welche dem Sonnen- und Sichtschutz dienen, zum Einsatz. Sie übernehmen die Aus- bzw. Einfahrbewegung sowie die Drehbewegung der einzelnen Lamellen. Um die einzelnen Lamellen hydraulisch zu verbinden, können Silikonschläuche verwendet werden. Diese haben ein großes Temperaturspektrum, sind sehr flexibel und können leicht verbaut werden. Die Schläuche werden über auf dem Markt verfügbare Steckkupplungen oder alternativ fest zwischen Verteil- und Sammlersystem sowie dem textilen Temperiersystem verbunden. Die Anbindung dabei erfolgt nach dem Tichelmann-Prinzip, um eine gleichmäßige Durchströmung aller textilen Temperiersysteme zu gewährleisten. Weiterhin wurde geprüft, inwiefern über ein mittels 3-D-Druckverfahren hergestelltes Verbindungsstück die Ankopplung von Schlauch und textilem Temperiersystem realisierbar ist. Hierbei zeigten sich jedoch Probleme bezüglich der Mediendichtheit. Für den späteren Anwendungsfall sind die Komponenten so zu konzipieren, dass diese in abgehängte Decken oder in Vorbaukästen integriert werden können.

Hydraulische Integration textiler Temperiersysteme

Für die hydraulische Integration des Temperiersystems im Gebäudeenergiesystem ist eine Entkopplung durch einen Wärmeübertrager erforderlich. Dementsprechend wurde ein separater Sekundärkreislauf zur Versorgung des textilen Temperiersystems errichtet. Damit wird ein vom Systemdruck des Gebäudeenergiesystems unabhängiger Betrieb erzielt und parallel dazu kann das Heiz- bzw. Kühlsystem des Gebäudes für andere Komponenten (z.B. Fußbodenheizung, Heizkörper) genutzt werden. Zudem konnte das Temperiersystem so ohne umständliche interne Umschaltung im Heiz- oder Kühlbetrieb betrieben werden. Eine zusätzliche Umwälzpumpe sorgte für die nötige Zirkulation. In Abbildung 48 ist das grundlegende Konzept des Versuchsaufbaus dargestellt.

Regelungstechnische Einbindung in die Gebäudeautomation

Die erläuterte mechanische sowie hydraulische Anbindung gewährleistet ebenso eine regelungstechnische Einbindung in die Gebäudeautomation. Für die Bewegung der Lamellen sind motorisierte Schienensysteme vorgesehen, die nach Stand der Technik erhältlich sind. Auch die Leistungsregelung des Temperiersystems kann mittels drehzahl geregelter Pumpen automatisiert werden.

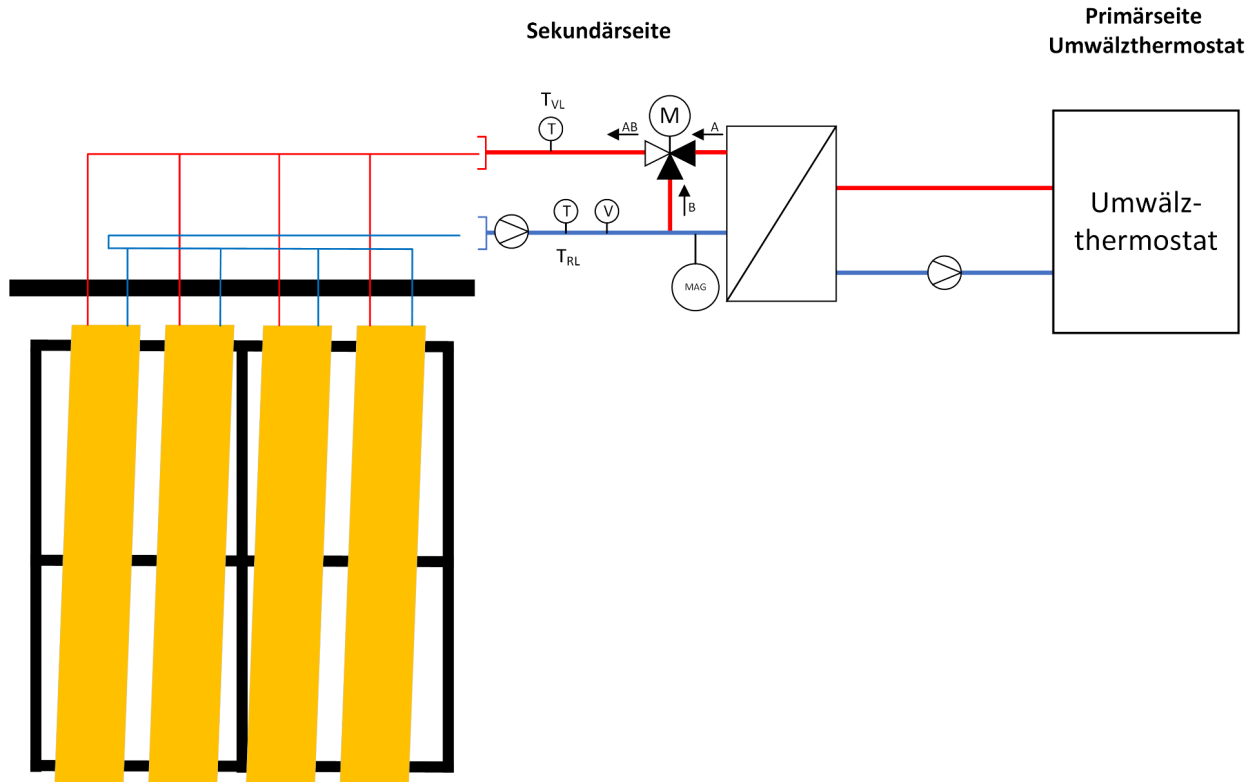


Abbildung 48: Schema des Versuchszustandes zur Systemeinkbindung

2.6 AP 6: Erarbeitung von Handlungsanweisungen, FE 1, 2, 3

Nachfolgend sind die aus dem Projekt abgeleiteten Handlungsanweisungen zusammengefasst:

- Durch einen angemessen großen Strömungsquerschnitt der medienführenden Kanäle innerhalb der textilen Lamellen kann der Druckverlust und damit der Systemdruck minimiert werden. Dies ist insbesondere bei der Skalierung auf größere Maßstäbe, beispielsweise der Anbringung an gesamten Fensterfronten von elementarer Bedeutung und ist entsprechend bei der Konzeption zu berücksichtigen.
- Die thermischen Kennwerte von textilen Temperiersystemen stark von Fertigungsart, Genauigkeit und Ausführung der jeweiligen Textilie abhängig. Die Angabe der Kennwerte wie Leistung und Druckverlust sind daher auf das jeweilige System bezogen anzugeben.
- Das textile Temperiersystem im Raum sichert bei fachgerechter Auslegung (vgl. Messwerte) die Einhaltung aller relevanten Kriterien der thermischen Behaglichkeit innerhalb der Anwesenheitszeiten, sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall, der Einsatz derartiger Systeme kann also als Alternative zu konventionellen Systemen empfohlen werden.
- Eine Gefahr von erhöhtem Zugluftisiko im Altbau infolge unkonventioneller Anordnung der Lamellen als „heizende“ Gardinen seitlich neben den Fenstern kann durch entsprechende Raumausstattung, insbesondere durch die geeignete Positionierung der Arbeitsplätze minimiert werden.

- Die Systeme liefern mit konventionellen Systemen vergleichbare Energiebedarfswerte bei vertikaler Anordnung, höhere Energiebedarfswerte treten hingegen bei Anordnung im Deckenbereich infolge der Temperaturschichtungen auf.
- Der Energiebedarf ist umso geringer, je näher sich die textilen Temperiersysteme an den Personen befinden. Wenn textile Temperiersysteme vor dem Fenster angeordnet sind, kommt es infolge der direkten solaren Einstrahlung zu einer effektiven Abfuhr solarer Lasten. Es ist deshalb empfehlenswert, textile Temperiersysteme entweder vor dem Fenster oder in der Nähe der Arbeitsplätze anzuordnen.
- Bezüglich der Systemintegration sind die Temperiersysteme über entsprechende Wärmeübertrager vom Gebäudesystem zu trennen, da sonst die Betriebsdrücke zu hoch für die textilen Systeme werden und da es zu Sauerstoffdiffusion kommen kann. Zudem sind textile Systeme anfällig gegen Verschmutzungen im Wasser.

3. 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.

Tabelle 8: Gegenüberstellung von Ergebnissen und Zielsetzungen der Projektarbeiten

Projektziele	Erreichte Ergebnisse
AP 1: Festlegung der Einsatzszenarien für die textilen Temperiersysteme, Ableitung Funktionsmuster und Demonstratoren (alle FE)	
1. Ableitung der Funktionsmuster und Demonstratoren	Erforderliche Funktionsmuster (Lamellen, Deckenelement, Raumteiler) und Demonstratoren (Einbringung der Lamellen als Gardine in einem Büroraum) wurden gemeinsam mit dem PA festgelegt.
2. Definition künftiger Einsatzszenarien textiler Temperiersysteme	In Diskussion mit dem PA wurden geeignete Einsatzbereiche systematisch zusammengestellt.
3. Schwachstellenanalyse und Verbesserungen in der Handhabung	Mögliche Schwachstellen und Verbesserungspotentiale wurden auf Basis vorhergehender Forschungsarbeiten und messtechnischen Untersuchungen systematisch identifiziert.
→ Keine Abweichung vom Projektantrag	
AP 2: Modellierung und Simulation der Einsatzszenarien (FE 1, FE 2)	
1. Anpassung der Simulationsmodelle an die Einsatzszenarien und Aufbau der Simulationsmatrix (auf Basis von Typtagverfahren)	Es erfolgte die Modellierung einer aus den Nutzungsszenarien abgeleiteten Variantenmatrix möglicher Einsatzkonfigurationen in realen Büroräumen. Hierzu gehörte die hoch aufgelöste Modellierung der Raumgeometrien sowie der Temperiersysteme für die gekoppelten Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulationen, die Parametrisierung der Simulationen hinsichtlich aller weiteren Rand- und Anfangsbedingungen sowie die Integration der Simulationsmodelle in ein Typtagverfahren zur gesicherten Modellierung kompletter Heiz- und Kühlperioden.
2. Simulation der Einsatzszenarien	Es wurden instationäre gekoppelte Gebäude-, Anlagen- und Raumluftrömungssimulationen zur Ermittlung der Heiz- und Kühlleistungen textiler Temperiersysteme unterschiedlicher Größe an unterschiedlichen Raumpositionen und bei variierenden Zuluft-Systemen und Wärmedämmstandards durchgeführt. Es wurden alle relevanten Einflussgrößen, von der geometrisch hoch aufgelösten Strahlungswärmeübertragung über die nutzerspezifischen thermischen Quellen bis hin zur Regelung der Leistungsparameter der textilen Temperiersysteme berücksichtigt und entsprechend abgebildet. Die Hochrechnung der Energiebedarfswerte auf Heiz- und Kühlperioden erfolgte auf Basis eines speziell konzipierten Typtagverfahrens.
3 Überprüfung der Einsatzszenarien je nach Ergebnis der Prüfmessungen und Projektfortschritt	Die Überprüfung ist erfolgt und die Modelle wurden bei Bedarf angepasst.
4. Weiterentwicklung bestehender Simulationsmodelle auf Basis der messtechnischen Evaluierung, Untersuchungen der Funktionsmuster in virtueller Prüfkabine	Im Rahmen der Weiterentwicklung der Simulationsmodelle erfolgten speziell Anpassungen bezüglich der messtechnisch ermittelten Kenngrößen der textilen Werkstoffe. Zudem wurden die Simulationsmodelle für die Berechnung der Einsatzszenarien mit Hilfe der virtuellen Prüfkabine und der dazugehörigen messtechnischen Untersuchungen validiert.

Projektziele	Erreichte Ergebnisse
5. Bilanzierung der Wasserspeichereffekte	Eine Anpassung der Simulationsmodelle zur Abbildung der Wasserspeichereffekte der textilen Temperiersysteme wurde als nicht notwendig erachtet, da die im Rahmen dieses Projektes entstandenen Funktionsmuster letztlich aus Materialien ohne nennenswerte Funktionalitäten zur Wasserspeicherung hergestellt wurden.
<p>→ Geringfügige Abweichung vom Projektantrag, siehe Punkt 5, dafür jedoch erheblich umfangreichere Simulation möglicher Einsatzszenarien.</p>	
AP 3: Entwicklung und Fertigung von Funktionsmustern/Demonstratoren (FE 2, FE 1, FE 3)	
1. Ermittlung einer Materialkombination (Flächenbildung/Beschichtung) für die textilen Temperiersysteme	Es wurden aus einem Portfolio drei unterschiedliche Werkstoffkombinationen ausgewählt und getestet. Die Entscheidung fiel auf Werkstoffe mit einer schweißbaren Beschichtung.
2. Ergebnisse der textilphysikalischen und chemischen Materialcharakterisierung und der Prüfung des Gebrauchsdauerverhaltens	Aus den textilphysikalischen Untersuchungen wurde ein Vorzugswerkstoff definiert. Das wesentliche Kriterium war die hohe Festigkeit bei guter Wasserdichtheit.
3. Konzipierung der Funktionsmuster (Raumteiler, Wand-/Deckenelement, Lamelle), Festlegung der Funktionalität	Es wurden verschiedene Konzepte entwickelt und der jeweilige Funktionsumfang definiert. Hieraus wurden die Anforderungen an den Raumteiler, die Lamelle und das Wand-/Deckenelement abgeleitet.
4. Parametrische 3D-CAD-Modelle der Funktionsmuster, Ableitung fertigungstechnischer Parameter	Aus den Vorzugsvarianten wurden jeweils CAD-Modelle entwickelt, aus welchen die fertigungstechnologischen Parameter abgeleitet werden konnten.
5. Konfektionstechnischer Fertigungsmöglichkeiten	Anhand von Benchmarkversuchen zum Schweißen wurden Bereichsdiagramme entwickelt. Das Ultraschallschweißen erwies sich als das geeignetste Verfahren im Vorhaben.
6. Lösungen zur Funktionsintegration für Verbindungsanschlüsse für Zu- und Ablauf, Wartungszugänge, Befestigungen	Während der gesamten Laufzeit wurde die Verbindungssysteme an die entsprechenden Gegebenheiten angepasst. Für die Funktionsmuster hat sich die Schott-Schraubverbindung als besonders zuverlässig und vor allem wiederverwendbar bewährt.
7. Funktionsmuster (3), Demonstrator (1)	Es erfolgte die Erstellung von drei Funktionsmustern an denen Versuche durchgeführt wurden: Modul 1(Raumteiler), Modul 2 (Lamelle) und Modul 3, (Wandelement, welches gleichzeitig als Deckenelement genutzt werden kann).
<p>→ Keine Abweichung vom Projektantrag</p>	
AP 4: Messtechnische Evaluierung (FE 3, FE 2)	
1. Leistungsmessungen und Druckabfallbestimmung der Funktionsmuster	Die Heiz- und Kühlleistung sowie das Kennfeld des Druckverlustes wurden für die Funktionsmuster messtechnisch ermittelt.
2. Untersuchung typischer Lastfälle in Laborräumen	Es wurden typische Lastfälle in einem Laborraum untersucht und die Erkenntnisse aufbereitet.
3. Untersuchung der Kühlleistung bei Variation der solaren Einstrahlung	Die Kühlleistung der Lamellen wurden in einem Sonnensimulator untersucht und der Einfluss der solaren Einstrahlung auf die Kühlleistung ermittelt.
4. Messung zu Feuchtespeichereffekten	Die Feuchtespeicherkapazität der Funktionsmuster wurde messtechnisch ermittelt.
5. Technologieerprobung und Langzeitversuche anhand der Demonstratoren im Kleinstmaßstab in einem Büroraum	Es wurde ein Demonstrator in einen Büroraum eingebracht und mittels installierter Messtechnik die Leistung des Demonstrators sowie die Behaglichkeitskriterien im Raum untersucht.

Projektziele	Erreichte Ergebnisse
6. Bewertung der Systemeigenschaften und Raumklimawirkung sowie Ableitung von Vorschlägen zur Systemprüfung	Die Systemeigenschaften des textilen Temperiersystems sowie dessen Raumklimawirkung wurden messtechnisch untersucht und bewertet.
→ Keine Abweichung vom Projektantrag	
AP 5: Betrachtungen zur Systemintegration der Funktionsmuster (alle FE)	
1. Untersuchungen zur hydraulischen/mechanischen Anbindung textiler Temperiersysteme	Im Rahmen der Untersuchungen der Funktionsmuster wurde auf Schraubverbindungen gesetzt, nachdem die textiltechnische Integration von Übergängen komplexer als erwartet war. An dieser Stelle sind weitere Arbeiten für flexible und preiswerte Anbindungsmöglichkeiten notwendig.
2. Untersuchungen zur hydraulischen Integration textiler Temperiersysteme	Es ist eine Entkopplung durch einen Wärmeübertrager erforderlich, um einen vom Systemdruck des Gebäudeenergiesystems unabhängigen Betrieb mit geringerem Systemdruck zu erzielen. Zudem kann das Temperiersystem ohne umständliche interne Umschaltung im Heiz- oder Kühlbetrieb betrieben werden.
3. Untersuchungen zur regelungstechnischen Einbindung in die Gebäudeautomation	Die mechanisch / hydraulische Anbindung gewährleistet eine regelungstechnische Einbindung in die Gebäudeautomation. Für die Bewegung der Lamellen sind motorisierte Schienensysteme empfohlen. Die Leistungsregelung der Temperiersysteme kann durch drehzahlgeregelte Pumpen automatisiert werden.
→ Keine Abweichung vom Projektantrag	
AP 6: Erarbeitung von Handlungsanweisungen für die Auslegung und Anwendung der textilen Temperiersysteme und Vorstellung der Ergebnisse bei Praxispartnern (alle FE)	
Erarbeitung von Handlungsanweisungen	Es wurden Handlungsanweisungen und Hinweise erarbeitet, die insbesondere die fertigungstechnischen Besonderheiten, die Positionierung und die Betriebsweise textiler Temperiersysteme betreffen. Zusammenfassend ist festzustellen, dass textile Temperiersysteme nach entsprechender Auslegung und Integration sehr gut zur Raumkonditionierung in der Lage sind.
→ Keine Abweichung vom Projektantrag	
AS 10: Öffentlichkeitsarbeit und Berichterstellung	
1. Regelmäßige Information der KMU	Die Einbindung der KMU erfolgte im Rahmen von vier Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses und auf Basis telefonischer Beratungen.
2. Fertigstellung des Endberichts	Der Endbericht wurde fristgemäß erstellt.
→ Keine Abweichung vom Projektantrag	

4. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse, insbesondere für KMU

Die Überführung der aus den Voruntersuchungen hervorgegangenen Erkenntnisse zu thermoaktiven Textilien in Form textiler Temperiersysteme sowie die energetischen Betrachtungen zu den Einsatzmöglichkeiten der Systeme lieferten entscheidende Grundlagen für die Entwicklung neuartiger, flexibler Produkte. Im Rahmen des Projektes wurde dementsprechend wichtiges und grundlegendes Wissen für die Entwicklung neuer Produkte auf Basis textiler Temperiersysteme erarbeitet und in Form von Handlungsempfehlungen verfügbar gemacht.

Aufgrund der hohen Akzeptanz und der weiten Verbreitung von Raumtextilien, der Effektivität und Flexibilität textiler Temperiersysteme im Gebrauch und der damit verbundenen Ressourcenschonung einerseits sowie der (thermischen) Komfortfunktionen andererseits ist die Anwendung textiler Temperiersysteme sowohl für Privatpersonen in Wohngebäuden als auch für Unternehmen in Nichtwohngebäuden interessant, wodurch sich ein potenziell sehr großer Kundenkreis erschließen lässt.

Die untersuchten, neuartigen Applikationen in Form mobiler, arbeitsplatznaher Anordnung der textilen Temperiersysteme, u. a. in Kombination mit Akustikwänden und Raumteilern, ermöglichen zudem individuelle, lokal beschränkte Raumkonditionierungen, die der flexiblen Arbeitsplatzorganisation entgegenkommen.

Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte, insbesondere des großen potentiellen Nutzerkreises, ist der wirtschaftliche Nutzen für KMU (Heizungs- und Klimatechnik, Textil- und Konfektionstechnik) als hoch einzuschätzen. Zunehmend werden in anderen Branchen die Vorzüge der innovativen, flexiblen und leichten textilen Funktionswerkstoffe sowie daraus hergestellter Hightech-Produkte, die oftmals mit weiteren Zusatzfunktionen ausgestattet sind, erkannt. Die Innovationsquote des Wirtschaftszweiges Textil- und Konfektionsbranche, d. h. der Anteil der Unternehmen mit einer Produkt- oder Prozessinnovation in den letzten drei Jahren, ist mit 47 % überdurchschnittlich im Vergleich zur deutschen Wirtschaft (insgesamt 36,1 %). Moderne Fügeverfahren, insbesondere thermische Fügeverfahren, wie das hier angewendete Ultraschallschweißen sind dabei von maßgeblicher Bedeutung.

Das in der Entwicklung von textilen Temperiersystemen liegende Innovationspotential kann den KMU der Textil- und Konfektionsindustrie, der Gebäudetechnik und der Bautechnik zu deutlichen Wettbewerbsvorteilen verhelfen. Potentielle Nutzer der Projektergebnisse sind ca. 200 Mitgliedsunternehmen im Industrieverband „Technische Textilien-Rollläden-Sonnenschutz e.V.“ (ITRS), die verschiedenen Fachverbände/Gremien, z.B. „Technische Konfektion“, „Bautechnik“, „Weberei/Beschichtung“ angehören.

Unternehmen der Heizungs- und Klimatechnik sowie Fachplaner und Architekten profitieren ebenfalls. Einerseits von den im Projekt erfolgten Untersuchungen zur Integration textiler Temperiersysteme in bestehende Anlagenkonzepte sowie andererseits von den ermittelten thermischen Kennwerten und Eigenschaften der Systeme. Auf Basis der Projektdaten haben KMU die Möglichkeit, textile Temperiersysteme zu nutzen, um optimal an die jeweilige Aufgabenstellung angepasste und in die Gebäude integrierte Heiz-/Kühlsysteme auf Basis textiler Temperierung herzustellen und anzubieten. Hier werden insbesondere Niedertemperatursysteme adressiert, die mit einem hohen Anteil regenerativer Energie arbeiten können. Das sind sowohl Wärmepumpensysteme, solarthermische Systeme in Verbindung mit einem Ergänzungssystem sowie Systeme mit passiver Kühlung.

Die Projektergebnisse haben somit auch für KMU in den Fachgebieten Energietechnik (EA), Mess- und Regelungstechnik (GD), Werkstoffe, Materialien (KB) und in den Fachgebieten Umformtechnik, Fügetechnik, Oberflächentechnik (MB) sowie der Bauforschung (NB) einen entsprechenden Nutzen.

Das große Interesse von KMU unterschiedlicher Branchen an der Thematik textiler Temperiersysteme zeigt sich nicht zuletzt in dem Umstand, dass sich ein Großteil der bisher im Projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Unternehmen für eine Fortsetzung der Forschungen an textilen Temperiersystemen ausgesprochen haben und diese weiter unterstützen würden.

5. Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten der Forschungsergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnte gezeigt werden, dass sich für textile Temperiersysteme aufgrund ihrer hohen Flexibilität und Funktionsvielfalt ein breites Anwendungsspektrum erschließen lässt. Der Transfer der Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis erfolgt durch die Einbindung der im PA organisierten KMU einerseits und durch entsprechende Veröffentlichung der Ergebnisse andererseits. Die Zusammensetzung des PA aus unterschiedlichen Bereichen der Textiltechnik sowie der Heizungs- und Klimatechnik berücksichtigt hierbei die verschiedenen erforderlichen Branchen.

Die für die Herstellung textiler Temperiersysteme verwendeten Verfahren, Materialien und Komponenten sind kommerziell erhältlich und stehen somit allen interessierten Unternehmen zur Verfügung. Auf Basis der erarbeiteten Handlungsempfehlungen sind KMU in der Lage, eigene textile Temperiersysteme zu erstellen und anzubieten. Somit können neue Geschäftsbereiche zur flexiblen und energieeffizienten Beheizung und Kühlung von Räumen erschlossen werden, wodurch ein Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU geleistet wird.

Im Bereich der Heizungs- und Klimatechnik wurde mit dem Vorhaben die Grundlage für ein neuartiges Wärme- und Kälteübergabesystem geschaffen, das den Anwendungsbereich der bestehenden Flächenheiz- und -kühlsysteme ergänzt. Aufbauend auf den vorliegenden Betrachtungen zur Integration von textilen Temperiersystemen in bestehende Anlagenkonzepte können Textilhersteller gemeinsam mit Komponentenherstellern der Heizungs- und Klimatechnik weitere Entwicklungen zur Schaffung neuer Produkte vornehmen. Insbesondere die Möglichkeit der Wandbehänge und Flächenteiler sowie die kombinierte Heiz- und Kühlfunktion kann die Verbreitung von Wärmepumpen (mit Heiz- und Kühlbetrieb) aufgrund des niedrigen Vorlauftemperaturniveaus unterstützen und bietet damit ein entsprechendes Marktpotential. Hierfür wurden im Forschungsvorhaben geeignete Anwendungsfelder (Gebäude- bzw. Raumarten) und entsprechende Anordnungspositionen in den Räumen (z.B. Anordnung als Wandbehang oder Raumteiler) aufgezeigt.

6. 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, Verbrauchsmaterial, Gerätebeschaffung und Ausgaben für Leistungen Dritter waren inhaltlich und in vollem Umfang angemessen und notwendig.

Die folgende Tabelle 9 gibt einen Überblick zum Einsatz des wissenschaftlich-technischen Personals (HPA-A & HPA-B) der Forschungseinrichtungen. Die Personalmittel waren für die erfolgreiche Bearbeitung des Projektes zwingend erforderlich und wurden vollumfänglich in abgerufener Höhe verausgabt. Aufwendungen für Geräte der Forschungseinrichtungen werden in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 9: Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

HPA	PM FE 1: IET		PM FE 2: ITM		PM FE 3: FG HLK	
	A	B	A	B	A	B
2020	6	0	4,68	1,2	4,5	0
2021	12	0	14,77	4,8	4,6	0
2022	6	0	3	0	3,9	0
Summe	24	0	22,45	6	13	0

Tabelle 10: Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

FE	Beschreibung	€ (netto)
FE 3: FG HLK	Messsystem zur Leistungsmessung von textilen Temperiersystemen	3.180,25
FE 3: FG HLK	Messsystem zur Behaglichkeitsmessung von textilen Temperiersystemen	6.231,31

7. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle Arbeiten der Forschungseinrichtungen im Projektzeitraum waren zur Erreichung der Projektzielstellung notwendig und angemessen. Es sind zahlreiche Funktionsmuster gefertigt, getestet und messtechnisch untersucht worden. Des Weiteren wurde ein Demonstrator hergestellt und sowohl hinsichtlich seiner Leistungsparameter als auch hinsichtlich seiner Praxistauglichkeit geprüft. Die Palette der entstandenen Simulationsergebnisse ist umfangreich und sehr aussagekräftig. Es muss festgestellt werden, dass es durch die verschiedenen Maßnahmen der Universitäten und Forschungseinrichtungen aufgrund der Corona-Bedingungen zu teils erheblichen Verzögerungen bei den experimentellen und praktischen Arbeiten kam. Die zeitlichen Verzögerungen wurden jedoch erfolgreich durch eine ausgabenneutrale Verlängerung ausgeglichen.

8. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft während der Projektbearbeitung sowie die geplanten Maßnahmen nach Projektabschluss sind in den nachstehenden Tabellen zusammengestellt. Mit der Umsetzung dieser Maßnahmenpakete wurden und werden gute Bedingungen für den Transfer der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse in die deutsche Wirtschaft geschaffen.

8.1 Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

In Tabelle 11 werden die durchgeführten Maßnahmen zum Ergebnistransfer während der Projektlaufzeit zusammengefasst.

Tabelle 11: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Information der Unternehmen des PA	direkter Ergebnistransfer in die Wirtschaft sowie Erfassung aktueller Problemstellungen	1. PA-Sitzung (online) 2. PA Sitzung (online) 3. PA Sitzung (Dresden/online) 4. PA Sitzung (Stuttgart/online)	06.07.2020 24.11.2021 06.07.2022 24.11.2022
		Telefongespräche und Austausch mit PA-Vertretern zum Verlauf des Projektes und Zwischenergebnissen	regelmäßig
	Information zum Stand des Forschungsvorhabens	Informationsschreiben an PA-Mitglieder	jährlich
	Fachdisk./Beratung vor Ort	Forschungseinrichtungen und Firmen	regelmäßig
Publikation von Projektinformationen im Internet	Projektinformation / Transfer für breites Fachpublikum	Projektinformation über die Websites und Forschungsinformationssysteme der TU Dresden, FG HLK und VdF HLK	jährl. aktual. ab 2020
Wissenschaftliche Publikationen	Bekanntmachung der Forschungsergebnisse in einschlägigen Fachzeitschriften	siehe Publikationsliste unterhalb der Tabelle.	s.u.
		Veröffentlichung im HLK-Brief der Forschungsvereinigung Heizung, Lüftung, Klimatechnik	2020, 2021, 2022
Vorstellung der Projektergebnisse	Präsent. auf Fachtagungen; Ergebnisinformation durch Poster u. Flyer für breites Fachpublikum	ADDITC; Texprocess; Clotech	2022
		siehe ergänzend Publikationsliste unterhalb der Tabelle.	s.u.
Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre und berufliche Qualifikation	Ergebnis- und Wissenstransfer an wissenschaftlich-technischen Nachwuchs	Einbeziehen von Studierenden (Graduiertenarbeiten, SHK) und Doktoranden im Projekt.	fortlaufend
		Verwendung der Ergebnisse innerhalb einer Dissertation am ITM. Die Dissertation ist zum Zeitpunkt der Berichtabgabe noch nicht abgeschlossen.	fortlaufend
Bau der Technologiedemonstratoren, die an der FE verbleiben	Ergebnisdokumentation für Fachbesucher und Studierendenausbildung	Messe Texprocess/TechTextil Vitrinen des ITM	2021 fortlaufend

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Transfer in die Industrie durch Verbände und Multiplikatoren	Vorstellung der Vorhabenergebnisse und Transfer in branchenübergreifenden Verbänden und Netzwerken	Mitgliederversammlung und Veranstaltungen des Vereins der Förderer der Forschung im Bereich Heizung, Lüftung, Klimatechnik Stuttgart e.V.	fortlaufend

Publikationen während des Projektes

Pietsch, K.; Reich, A.: Möglichkeiten zur Herstellung von flexiblen textilen Thermokörpern mittels US-Schweißen. In: Proceedings DVS-Congress - Große Schweißtechnische Tagung - DVS CAMPUS, Essen, 14.-17.09.2021.

Reich, A.; Kyosev, Y.: EVALUATION OF THE CONSTRUCTIVE SOLUTIONS FOR IMPELENTATION OF TEXTILE HEATING AND COOLING SYSTEMS. In: Proceedings AUTEX 2021, Braga, 05.-09.09.2021.

Saeed, H.; Reich, A.; Pietsch, K.; Kyosev, Y.: TEXTILE WELDING – APPLICATION, PROCESS INVESTIGATION, QUALITY ASSURANCE, AND CONTROL (Poster P9). In: Proceedings Aachen-Dresden-Denkendorf International Conference 09.-10.11.2021, online.

Reich, A.; Kyosev, Y.: NUMERICAL OPTIMIZATION OF THE SEAM ALLOWANCES DURING ULTRASONIC WELDING OF TEXTILE MATERIALS. In: Proceedings XVth International Izmir Textile and Apparel Symposium, Izmir, October 26-27, 2021, online

8.2 Transfermaßnahmen nach Projektabschluss

Die geplanten Transfermaßnahmen sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Transfermaßnahmen nach Projektabschluss

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Weitergabe von ausführlichen Forschungsberichten	Ergebnisdarstellung	Abschlussbericht	07/2023
	schnelle zielführende Ergebnisumsetzung in KMU	auf Anfrage interessierter KMU	nach Projektende
Wissenschaftliche Publikationen	Bekanntmachung der Forschungsergebnisse (Zeitschriften/Tagungen)	Abschlussveröffentlichung im Bereich Technische Textilien / Gebäudeenergie-technik	12/2023
Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre	Wissensvermittlung an wiss. techn. Nachwuchs (Vorlesung/ Praktika)	Vorlesung/Praktika an TU Dresden	mit Projektende
Beratung von Unternehmen	Überführung der Ergebnisse in industriennahe Anwendungen	Fachtagungen, Messen und bei Firmenbesuchen	nach Projektende
Werbe- u. Vermarktungsstrategien	Transfer der Ergebnisse in weitere Firmen	Beratungen/Treffen mit weiteren Firmen	mit Projektende
Gremienarbeit	Berücksichtigung der Ergebnisse bei Erstellung und Überarbeitung von Normen und Regelwerken	Erarbeitung von Vorgaben zur Leistungsermittlung und Charakterisierung der Eigenschaften; Erarbeitung von Vorgaben für die Auslegung und Installation	nach Projektende

9. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes erfolgten insbesondere innerhalb von AP 3 umfangreiche Untersuchungen der Eignung möglicher Materialien und Fertigungsverfahren zur konfektionstechnischen Herstellung textiler Temperiersysteme. Besondere Beachtung fanden hier verschiedene Schweißverfahren, um die erforderlichen wasserführenden Kanäle zu erzeugen und Anschlusssysteme, um die Einbindung an die Anlagentechnik sicherzustellen. Letztlich konnten erfolgreich die geplanten Funktionsmuster und Demonstratoren gefertigt und für die messtechnischen Untersuchungen zur Verfügung gestellt werden.

Es erfolgten im Rahmen des AP 4 umfangreiche Leistungsmessungen an den textilen Temperiersystemen im Heiz- und Kühlbetrieb. Die Untersuchung des Systemverhaltens und der resultierenden thermischen Behaglichkeit wurde mit Hilfe transienter Lastverläufe in einem temperierbaren Laborraum durchgeführt. Zur Berücksichtigung des Einflusses der direkten Abfuhr von solarer Einstrahlung bei fensternaher Anbringung von Lamellen, erfolgten Messungen der Kühlleistung unter Variation der solaren Einstrahlungsintensität in einem Sonnensimulator. Zusätzlich wurde die maximale Wasserspeicherkapazität der Funktionsmuster mit Hilfe von erzwungener Kondensation in einer Klimakammer ermittelt.

Die Kriterien der thermischen Behaglichkeit wurden in den untersuchten Szenarien, sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall eingehalten. Dies gilt neben den Langzeitmessungen im Büroraum auch für die Untersuchungen in der Klimakammer. Durch das textile Temperiersystem kann einerseits dem Abkühlen des Raumes im Heizfall und andererseits dem Überwärmen des Raumes im Kühlfall entgegengewirkt werden. Die direkte Anordnung der textilen Temperiersysteme vor dem Fenster ermöglicht erwartungsgemäß eine effektive Abfuhr solarer Gewinne bevor diese im Raum wirksam werden.

Die erarbeiteten Erkenntnisse wurden als Randbedingungen sowie als Validierung für die durchgeführten Simulationen verwendet. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Leistungsdaten, so dass eine Skalierung der numerischen und messtechnischen Konfigurationen auf neue und angepasste Funktionsmuster oder einzelne Parameter schnell realisierbar ist.

Im Zuge der in AP 2 vorgenommenen umfangreichen numerischen Untersuchungen möglicher Einsatzszenarien textiler Temperiersysteme in Büroräumen (Zwei- und Mehrpersonnbüros) erfolgten Variationen der Bauschwere, der Wärmedämmstandards sowie der Anordnung der Systeme im Raum von Raumteilern über Lamellen im Bereich der Fenster bis hin zu Wand- und Deckenelementen. Zudem wurden Untersuchungen einzelner Konfigurationen hinsichtlich unterschiedlicher Regelungsstrategien der textilen Temperiersysteme (z.B. Regelung nach unterschiedlichen Sensorpunkten, nach unterschiedlichen Sollwerten usw.) durchgeführt. Zur energetischen Bewertung der einzelnen Konfigurationen innerhalb der jeweils betrachteten Heiz- und Kühlperioden sind die entsprechenden Leistungsdaten sowie die Über-, Unterschreitungshäufigkeiten der Solltemperaturen, des Predicted Mean Vote (PMV) und der operativen Temperatur herangezogen worden.

Es zeigte sich, dass sich die modellierten textilen Temperiersysteme in nahezu allen untersuchten Fällen sehr gut zur Konditionierung der Büroräume eignen. Selbst bei den untersuchten Altbauvarianten waren sie stets in der Lage, die Kategorie A der thermischen Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7030 während der gesamten Büronutzung einzuhalten. Berücksichtigt man zusätzlich die

hier ebenfalls untersuchte Eignung der Textilien zur Abfuhr solarer Gewinne, so ist festzustellen, dass sie aus energetischer Sicht sehr gut zur Konditionierung von Büroräumen in der Lage sind.

Weiterer Forschungsbedarf zeigt sich hinsichtlich der Fertigungsprozesse, insbesondere bezüglich einer Verbesserung der Automatisierung und Reproduzierbarkeit der Prozessabläufe und bezüglich einer Verbesserung der funktionalen Eigenschaften (z.B. Vorformen der textilen Materialien für gleichmäßige und effektivere Kanalquerschnitte). Zudem sollte ebenfalls weiter an der Verbesserung der Anschlusssysteme gearbeitet werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

10. Danksagung

Das IGF-Vorhaben 21073 BG der Forschungsvereinigung Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V., Pfaffenwaldring 6a, 70569 Stuttgart, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Wir danken den beteiligten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel sowie den beteiligten Firmen des projektbegleitenden Ausschusses (PA) für die fachliche Unterstützung und die Bereitstellung von Versuchsmaterialien.

11. Literaturverzeichnis

[DIN EN 442-2 2015] DIN EN 442-2, Radiatoren und Konvektoren – Teil 2. Prüfverfahren und Leistungsabgabe. Beuth Verlag, Berlin 2015

[DIN EN ISO 7726 2021] DIN EN ISO 7726, Umgebungsklima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen. Beuth Verlag, Berlin 2021

[DIN EN ISO 7730 2006] DIN EN ISO 7730, Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit. Beuth Verlag, Berlin 2006

[FELSMANN et al. 2018] FELSMANN, C., ARENDT, M., GRITZKI, R., KANDZIA, C., RÖSLER, M.: „Thermoaktive Textilien zur Raumklimatisierung – vom Prototyp zum Demonstrator“, Tagungsbeitrag TGA Kongress 2018, Berlin, März 2018

[GRITZKI et al. 2019] GRITZKI, R.; KANDZIA, C.; RÖSLER, M.; FELSMANN, C.; STUBBE, D. Einfluss der Sensorpositionierung im Raum auf den Energiebedarf heiz- und raumluftechnischer Anlagen. Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben, Projektphase II, Förderkennzeichen 03ET1361A, Dresden, Germany, 2019, <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:1668998920>

[KNOPP et al. 2005] KNOPP, T., LUBE, G., GRITZKI, R., RÖSLER, M.: A near-wall strategy for buoyancy-affected turbulent flows using stabilized FEM with applications to indoor air flow simulation. Computer Meths. Applied mechan. Engrg. 194 (2005) 3797-3816

[LUBE et al. 2008] LUBE, G.; KNOPP, T.; GRITZKI, R.; RÖSLER, M.; SEIFERT, J. Application of domain decomposition methods to indoor air flow simulation. Int. Journal of Mathematics, 85:10, 1551-1562, <http://dx.doi.org/10.1080/00207160802033541>

[TRNSYS-TUD] PERSCHK, A. Gebäude- und Anlagensimulation – „Ein Dresdner Modell“. Gesundheitsingenieur. Haustechnik – Bauphysik - Umwelttechnik 2010, 131, 178–183.