

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,  
Demonstration und Beratung auf  
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,  
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für  
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

**Institutsleitung**

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Abschlussbericht IL-001/000/2019

## **Bewertungsverfahren Leichtbau**

### **Entwicklung eines vereinfachten Bewertungsverfahrens zur Bestimmung der wärmetechnischen Eigenschaften (U-Wert, g-Wert) von Membranhüllen-Konstruktionen**

Der Abschlussbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

**Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-15.04**

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren

Der Bericht umfasst

14 Seiten Text

1 Tabellen

0 Abbildungen

Autoren:

Dr. Walter Haase, Clemens Freitag, Andreas Kaufmann, Herbert Sinnesbichler, Matthias Kersken, Al-muth Schade, Florian Hess, Angela Püls

Valley, 12. Juli 2019

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Institutsleiter

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

Bearbeiter

Andreas Kaufmann

## Forschungspartner / Antragsteller

### **Fraunhofer-Institut für Bauphysik, IBP**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
Fraunhoferstr. 10  
83626 Valley  
Telefon +49 8024 / 643-0

Projektleitung: Andreas Kaufmann.  
Autoren: Andreas Kaufmann  
Herbert Sinnesbichler  
Dr. Matthias Kersken  
Almuth Schade  
Florian Hess  
Angela Püls.

### **Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, ILEK**

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren  
Direktor: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h.c. Werner Sobek  
Pfaffenwaldring 7 + 14  
70569 Stuttgart  
Telefon +49 711 / 685 63599

Projektleitung: Dr. Walter Haase  
Autoren: Dr. Walter Haase  
Projektbearbeitung: Clemens Freitag  
Projektunterstützung: Theo Baur  
Christoph  
Pfeil, Jan Bolay

## Industriepartner / Drittmittelgeber

**CENO TEC GmbH**  
**Mehler Technologies GmbH**  
**Evonik**  
**VERSEIDAG-INDUTEX GmbH**  
**Wacotech GmbH & Co.**  
**HP Gasser AG**  
**Seele cover GmbH**

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Ausgangssituation</b>	<b>5</b>
2.1	Problemstellung	5
2.2	Zielsetzung	5
<b>3</b>	<b>Projektstruktur</b>	<b>6</b>
3.1	Projekt- und Berichtaufbau	6
3.2	Arbeitspakete und Arbeitsverteilung	6
3.3	Projektverlauf	8
3.4	Abweichung vom zeitlichen Ablaufplan	8
3.5	Projekterfolg	9
3.6	Diskussion und Projektergebnisse	9
3.6.1	Projektteil Fraunhofer IBP	9
3.6.2	Projektteil Universität Stuttgart, ILEK	11
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>14</b>

# 1 Einleitung

Membrankissen-Konstruktionen sind seit einigen Jahren durch prestigeträchtige Bauten, wie beispielsweise die Allianz-Arena in München, ins Blickfeld der Öffentlichkeit gerückt. Weniger offensichtlich und prägnant, aber weiter verbreitet, sind hingegen textile Konstruktionen. Der neue Flughafen in Bangkok ist ein bekanntes Beispiel dafür. Membrankonstruktionen gelten immer noch als innovativ und zukunftsweisend, obwohl es bereits seit rund 30 Jahren damit Erfahrungen im Bauwesen gibt. „Vorteil dieser Bauweise ist die leichtere, flexiblere und kostengünstigere Realisierung im Vergleich zu herkömmlichen Gebäudehüllen aus Glas, Metall oder starren Kunststoffelementen. Der Materialaufwand der Foliensysteme ist gering und die Materialien lassen sich sortenrein recyceln“ [1].

Während textile Konstruktionen ihre Stabilität gegen Wind und Schneelasten durch eine mechanische Vorspannung erhalten, indem das Gewebe umlaufend auf Zug gehalten wird, werden Membrankissen pneumatisch stabilisiert. Dafür wird ein geringer Überdruck im Kissen erzeugt. Das erfordert eine permanente Luftversorgung und führt damit gegenüber mechanisch stabilisierten Systemen zu einem zusätzlichen energetischen und technischen Aufwand. Im Vergleich zu Konstruktionen aus Glas bieten Membrankissen aber viele Vorteile. Große Flächen können mit einer filigranen Tragkonstruktion transparent überspannt werden, was mit Glas erheblich aufwändiger, schwerer und teurer wäre. Diese baulichen und architektonischen Vorteile haben Membrankissen insbesondere für Freizeitanlagen, zoologische Gärten und Erlebnisbäder attraktiv gemacht. Allerdings ist bislang der Nachweis der wärmetechnischen Eigenschaften von membranbasierten Gebäudehüllen noch nicht explizit normativ geregelt und die für die pneumatische Stabilisierung von Membrankissen-Konstruktionen erforderliche Hilfsenergie wird im Vorfeld oft nicht berücksichtigt oder richtig eingeschätzt. All das birgt Unsicherheiten für die Verantwortlichen im Entscheidungsprozess für oder gegen eine bauliche Umsetzung. Aus diesem Grund hat diese Form des Ultraleichtbaus immer noch damit zu kämpfen, sich in großen Projekten gegen konventionelle Konstruktionen durchzusetzen. Oft wird die Entscheidung dabei abhängig gemacht von einem Faktor - dem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert).

In mehreren vorangegangenen Projekten haben sich die beiden Forschungspartner dieses Projekts, das Institut für leichtes Entwerfen und Konstruieren ILEK und das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP mit membranbasierten Strukturen im Bauwesen beschäftigt. Immer wieder ist dabei die Frage nach der korrekten wärmetechnischen Bemessung aufgetaucht. Für das Fraunhofer IBP stand bei den transparenten Membrankissen die Frage im Raum, ob der U-Wert als Bemessungsgröße überhaupt geeignet ist oder ob ein neuer adaptierter Kennwert nötig ist, um die komplexen physikalischen Bedingungen an und in den Kissen in einfacher Weise bemessbar zu machen.

Daneben werden zunehmend auch mehrlagige textile Systeme, bestehend aus unterschiedlichen Materialien, mit unterschiedlicher Transparenz als Wand- und



Dachbildner eingesetzt. Mit diesen Mehrlagen-Membransystemen beschäftigt sich das ILEK seit geraumer Zeit, um auch dafür eine einfache wärmetechnische Bemessung zu entwickeln.

Die offenen Fragen und die Tatsache, dass in diesem Bereich bislang deutsche Systemanbieter im globalen Markt führend sind, hat zum vorliegenden, vom BBSR geförderten Projekt geführt. Die Entwicklung einfacher Verfahren zur wärmetechnischen Bemessung von Membran-Konstruktionen (Membrankissen und Mehrlagen-Systeme) war der ursprüngliche Ansatz und das gesetzte Ziel. Erst zu Projektbeginn wurde, basierend auf der Überlegung, dass auch andere Leichtbau-Materialien und Konstruktionen von dieser Fragestellung betroffen sind, der Fokus erweitert auf Konstruktionen aus Doppelstegplatten und adaptive Verglasungen.

## 2 Ausgangssituation

### 2.1 Problemstellung

Das wärmetechnische Verhalten von Ultraleichtbau-Konstruktionen, wie beispielsweise transparenten Membrankissen-Konstruktionen oder textilen Mehrschichtsystemen, die als Wand- und Dachsystem eingesetzt werden, war bislang auf Basis der bestehenden Normung nicht korrekt nachweisbar. Das lag im Wesentlichen daran, dass die verfügbaren Normen diese Konstruktionen nicht ausdrücklich einbezogen und berücksichtigten und somit die konstruktiven Besonderheiten in Form und Funktionsweise der Membrankissen implizit die Anwendbarkeit dieser Normen eingeschränkt. [2] In Ermangelung anderer, dafür zugelassener Nachweisverfahren war aber die Anwendung der normativen Berechnungsverfahren auf diese Konstruktionen gängige Praxis der Hersteller ohne zu wissen, ob die so erzielten Ergebnisse der Realität entsprechen. Die Anwendbarkeit der bestehenden Normen war bislang nie validiert worden.

Auf wissenschaftlicher Ebene wurde einige Zeit sogar diskutiert, ob der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) als Kennwert für derartige Systeme grundsätzlich geeignet ist oder ob die Entwicklung eines besser geeigneten Kennwerts zur Beschreibung des möglicherweise komplexen wärmetechnischen Verhaltens notwendig wäre. Die physikalischen Abläufe an und in den Konstruktionen waren nicht ausreichend bekannt, insbesondere bei den Membrankissen, die sensibel auf sich ändernde Randbedingungen reagieren. Bislang konnte deshalb niemand eine belegbare Aussage darüber treffen, wie signifikant die nach Norm ermittelten Werte für deren wärmetechnisches Verhalten sind. Gerade der Wärmedurchgangskoeffizient ist aber eine wichtige Kenngröße der Baubranche, die in vielen Fällen großen Einfluss auf die Entscheidungsfindung für eine bauliche Umsetzung hat.

### 2.2 Zielsetzung

Übergeordnete Zielsetzung des Projekts ist es, ein praktikables und einfach anzuwendendes Bemessungsverfahren für das wärmetechnische Verhalten von

Ultraleichtbau-Konstruktionen, insbesondere Membran-Mehrlagen-Systeme und Membrankissen-Konstruktionen, bereitzustellen. Dieses Verfahren ist insbesondere zur energetischen Bewertung im Rahmen des öffentlich-rechtlichen Nachweises (EnEV, DIN V 18599) von Bedeutung und soll in die einschlägigen Nachweisverfahren übernommen werden können.

Um fundierte, vereinfachte Bewertungsverfahren für mehrlagige Membran-Konstruktionen vorschlagen zu können, ist es notwendig, ein tiefes Verständnis bezüglich der in diesen Konstruktionen ablaufenden physikalischen Prozesse zu erhalten. Wesentlicher Inhalt des Projekts ist deshalb die messtechnische Untersuchung von Ultraleichtbau-Konstruktionen, die Erhebung der wesentlichen Einflussfaktoren auf den Wärmedurchgang, die Entwicklung eines Bemessungsverfahrens und dessen Validierung.

## **3 Projektstruktur**

### **3.1 Projekt- und Berichtaufbau**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die wesentlichen Einflüsse, die das wärmetechnische Verhalten von Ultraleichtbaukonstruktionen (z.B. Faserverbundwerkstoffe, Polycarbonat-Bauelemente, Membrankissen und mehrlagige textile Gebäudehüllen) bestimmen, im Rahmen von umfangreichen messtechnischen Analysen identifiziert. Das erforderte die Erstellung von Prüfkörpern und die Durchführung messtechnischer Untersuchungen unter realitätsnahen Einbau-Bedingungen. Anschließend erfolgte die Messdatenanalyse einschließlich Überprüfung und Anpassung der verwendeten Rechenverfahren. Im letzten Schritt wurde ein angepasstes Bewertungsverfahren für Leichtbaukonstruktionen, einschließlich der Vorschläge zur Ergänzung der normativen Berechnungsverfahren, erarbeitet und validiert.

Aufgrund des großen Umfangs zu klärender Fragestellungen, wurde das Projekt thematisch in zwei große Teilbereiche gegliedert, die zum einen am Fraunhofer IBP (Membrankissen-Konstruktionen und Leichtbau-Platten) und zum anderen am ILEK (Membran-Mehrlagen-Systeme, adaptive Verglasungen und Membrankissen) parallel bearbeitet wurden. Die Teilung der Arbeiten wird im vorliegenden Bericht aufgegriffen und der inhaltlichen Bearbeitung gemäß in jeweils zwei separaten Teilberichten dargestellt. Im vorangestellten allgemeinen Teil, wird das Projekt als Ganzes beschrieben und die Projektergebnisse übergreifend diskutiert.

### **3.2 Arbeitspakete und Arbeitsverteilung**

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden die wesentlichen Einflüsse, die das wärmetechnische Verhalten von Ultraleichtbaukonstruktionen bestimmen, mit Hilfe von umfangreichen messtechnischen Analysen identifiziert. Dafür werden Komplettbauteile, wo erforderlich inkl. Rahmen (bzw. Klemmprofile bei Membran-Konstruktionen) betrachtet. Der Schwerpunkt der Arbeiten am Fraunhofer IBP liegt hierbei auf In-situ-Messungen großformatiger Membrankissen. Die

Messungen werden am kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand des Fraunhofer IBP durchgeführt. Der Fokus der Arbeiten am ILEK ist auf leichte, transparente, transluzente und adaptive Fassaden sowie Mehrlagen-Membran-Systeme ausgerichtet. Hierbei werden messtechnische Untersuchungen an verkleinerten Musteraufbauten und an Mustern in Originalgröße durchgeführt. Aus der Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Messungen unter realen Einbau-Geometrien und den Labormessungen im verkleinerten Maßstab werden Rückschlüsse gezogen, inwieweit Laborprüfungen zur Bestimmung der energetischen Eigenschaften geeignet sind bzw. welche Modifikationen im Bereich der Prüfvorschriften nötig sind.

Tabelle 1: Arbeitsplan und Aufteilung der Arbeitspakete zwischen den Forschungspartnern.

Nr.	Arbeitspaket	Durchgeführt
<b>AP 1</b>	<b>Literaturrecherche</b>	IBP ILEK
1.1	Anwendungsgrenzen bestehender Normung	
1.2	Physikalische Grundlagen von Ultraleichtbaukonstruktionen	
1.3	Prüfung existierender Lösungsansätze	
<b>AP 2</b>		
<b>2.1</b>	<b>Erstellen von (Mess-) Datensätzen</b>	IBP ILEK
2.1.1	Klassifizieren typischer UL-Konstruktionen	
2.1.2	Erstellen der Prüflinge	
2.1.3	Ermittlung U- & g-Werte im Kalorimeter	
2.1.4	Ermittlung Spektraldaten und der gewichteten Mittelwerte	
<b>2.2</b>	<b>Energetische Analyse von Rand- &amp; Klemmprofilen</b>	
2.2.1	Energetische Analyse Randverbund	ILEK
2.2.2	Messwerte Rand	IBP
<b>AP 3</b>	<b>Datenanalyse</b>	IBP ILEK
3.1	Bestimmung der wesentlichen Einflüsse	
3.2	Anwendbarkeit U- & g-Wert	
3.3	Anpassung / Neuentwicklung und Validierung	
	Instationäre Rechenverfahren	IBP
	Iterative Rechenmodelle	ILEK
<b>AP 4</b>	<b>Ausarbeitung eines Bewertungsverfahrens</b>	IBP ILEK
4.1	Erarbeitung stationäres Monatsbilanzverfahren	IBP
	Iteratives Berechnungsverfahren	ILEK
4.2	Analyse Hilfsenergieaufwand der Stützluft	IBP
		Industriepartner
4.3	Ausarbeitung eines Vorschlags zur Implementierung in Norm	IBP
<b>AP 5</b>	<b>Dokumentation und Berichterstellung</b>	IBP ILEK

### 3.3 Projektverlauf

Der am 17.11.2014 eingereichte Projektantrag wurde am 8.07.2015 vom Projektträger BBSR bewilligt. Mit dem Kick-off-Meeting am 27.10.2015 unter Beteiligung der beteiligten Partner wurde die inhaltliche Bearbeitung des Projekts gestartet. Die Projektlaufzeit war mit der Bewilligung auf den 13.04.2017 festgelegt. Im April 2017 wurde ein Antrag auf kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis zum 31.10.2017 gestellt und bewilligt. Die fachlich-inhaltlichen Arbeiten waren bis zu diesem Datum abgeschlossen. Aufgrund der terminlichen Verfügbarkeit der Projektpartner fand das Projekt-Abschluss-Treffen erst am 5.12.2017 in Stuttgart statt. Folge dieses Treffens war allerdings eine intensive und lange Diskussion mit Systemanbietern bezüglich des entwickelten Bemessungsverfahrens und dessen finaler Festschreibung, die als Basis für eine normative Vorgabe geeignet sein soll.

### 3.4 Abweichung vom zeitlichen Ablaufplan

Aufgrund gewonnener Erkenntnisse während der anfänglichen Messungen am ersten Membrankissen-Prüfling musste der geplante Verlauf des Projektes umstrukturiert werden. Das vorgesehene Messprogramm der weiteren Membrankissen-Prüflinge musste an den Stellen reduziert werden, an denen keine signifikanten Veränderungen zu erwarten waren und an anderen Stellen wiederum erweitert werden, um bestimmte Neigungswinkel oder Randbedingungen intensiver betrachten zu können. Zudem haben witterungsbedingte Verzögerungen dazu beigetragen, dass die Messungen nicht im vorgesehenen Zeitplan durchgeführt werden konnten.

Die Erstellung der Kunststoffstegplatten-Prüfkörper verzögerte sich aufgrund des Engpasses der Hersteller bzw. der Industriepartner. Diese Verzögerung gefährdete den Zeitplan allerdings nicht, da die Kunststoffstegplatten erst nach den Membranen getestet wurden und damit die Entwicklung des vereinfachten kalkulatorischen Bemessungsverfahrens nicht beeinflussten.

Das an realen Dachsystemen durchgeführte Monitoring von Stützluftanlagen konnte erst verspätet gestartet werden, da es bei der Auswahl geeigneter Realobjekte Schwierigkeiten gab. Eine bereits zugesagte Untersuchungsmöglichkeit konnte letztlich aufgrund von unhaltbaren Auflagen nicht durchgeführt werden. Die Suche nach alternativen Untersuchungsmöglichkeiten, die letztlich im Tierpark Hellabrunn gefunden werden konnten, hatte sich länger hingezogen, als ursprünglich geplant.

Vor dem Hintergrund der genannten Verzögerungen war es nicht möglich, den ursprünglichen Zeitplan einzuhalten, weshalb eine Laufzeitverlängerung von 6 Monaten beantragt werden musste.

Zudem haben nach dem offiziellen Projektende intensive Diskussionen bezüglich der korrekten Anwendung und Festschreibung der vereinfachten kalkulatorischen Bemessung für Membrankissen-Konstruktionen mit den industriellen

Projektpartnern und weiteren Systemanbietern eingesetzt. Nachdem die Ergebnisse dieses Projekts für die Membranbau-Branche hoch sensibel sind, ist bei deren Beschreibung äußerste Sorgfalt erforderlich, was zu einer langen Verzögerung bei der Berichtslegung geführt hat.

### **3.5 Projekterfolg**

Die im Projektantrag angeführten Projektziele konnten vollumfänglich erreicht werden! Es wurden insbesondere neue Erkenntnisse über das energetische Verhalten von Ultraleichtbaukonstruktionen gewonnen und die grundlegende Anwendbarkeit derzeit verfügbarer normativer Bemessungsmodelle nachgewiesen. Notwendige Anpassungen der normativen Berechnungsverfahren zur Berücksichtigung abweichender, spezifischer Eigenschaften von Membrankissen-Konstruktionen, wie der Transparenz im langwelligen Bereich, wurden identifiziert und als Ergänzungsvorschläge beschrieben.

Durch die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens wird die energetische Leistungsfähigkeit von Ultraleichtbaukonstruktionen für Fachplaner und Bauherren zuverlässig bewertbar, was die Bereitschaft zum Einsatz solcher Ultraleicht-Systeme erhöht und damit zur Sicherung dieser hauptsächlich von deutschen KMU getragenen Technologie beiträgt.

Die Sicherheit in der wärmetechnischen Bemessung führt im zweiten Schritt dazu, dass passende wärmetechnische Produkt- und Systemoptimierungen angestoßen werden können, die die Konkurrenzfähigkeit dieser Art von Konstruktionen gegenüber herkömmlichen Systemen weiter verbessern kann. Das Vorhandensein von eindeutigen Kriterien zur Bewertung des energetischen Verhaltens von Ultraleichtbaukonstruktionen steigert die Bauqualität und vermindert Baufolgeschäden, weil damit Behauptungen zur technischen Leistungsfähigkeit eines Produkts überprüfbar sind. Durch das Projekt sind künftig einfache Verfahren zur wärmetechnischen Bemessung von ultraleichten Systemen, wie Mehrlagen-Membranen oder Membrankissen, verfügbar, praktikabel und einfach anzuwenden.

### **3.6 Diskussion und Projektergebnisse**

#### **3.6.1 Projektteil Fraunhofer IBP**

Der Einsatz von Membranen oder textilen Systemen als konstruktive Elemente im Bauwesen ist seit Jahren etabliert. Für viele dieser Konstruktionen gibt es bislang aber keine spezifisch angepassten Vorschriften, um deren wärmetechnisches Verhalten zu bemessen. Die gängigen Normen für die U-Wert-Berechnung sind entweder nicht uneingeschränkt anwendbar oder deren Anwendbarkeit ist noch nicht untersucht und validiert. [2] Diese Lücke zu schließen ist der Ansatz und die Zielsetzung dieses Projekts. Nachdem der ursprüngliche Fokus zunächst ausschließlich auf Membrankissen-Konstruktionen gelegen hatte, wurde dieser während des Projektbewilligungs-Prozesses ausgeweitet auf andere Leichtbaukonstruktionen, um auch für diese Systeme Klarheit zu schaffen.

Die durchgeführten Untersuchungen wurden deshalb erweitert um Mehrlagen-Membransysteme, Doppelstegplatten und adaptive Verglasungen. Allen gemeinsam ist, dass sie von der bestehenden Normung im Bereich der wärmetechnischen Bemessung nicht ausreichend abgedeckt werden.

Das vorliegende Projekt und dessen Ergebnisse stützen sich im Wesentlichen auf drei Fragen, die es zu klären galt:

- 1) Sind die verfügbaren Normen für die wärmetechnische Bemessung von ultraleichten Konstruktionen wie Membrankissen, Mehrlagen-Membransysteme, Doppelstegplatten oder adaptive Verglasungen anwendbar?
- 2) Falls sie nicht uneingeschränkt anwendbar sind, wie können diese Systeme auf einfache Weise wärmetechnisch bemessen werden?
- 3) Wie groß ist der Aufwand an erforderlicher Hilfsenergie für den Betrieb von Membrankissen-Systemen?

Aufgeteilt wurde die Projektbearbeitung in der Weise, dass Mehrschicht-Systeme und adaptive Verglasungen am ILEK untersucht wurden. Zudem wurden dort auch Untersuchungen von Membrankissen-Konstruktionen unter Laborbedingungen (Hotbox) durchgeführt. Demgegenüber standen die messtechnischen Untersuchungen am Fraunhofer IBP unter realitätsnahen Bedingungen in einer kalorimetrischen Hotbox auf dem Freilandgelände, deren Kaltseite der Außenraum ist. Dieser heliostatisch betreibbare, multifunktionale Prüfstand ist in dieser Form einzigartig und lässt die genaue Messung des Energietransfers durch ein Konstruktionselement zu. Es wird also unter realen Witterungsbedingungen gemessen. Am IBP lag der überwiegende Aufwand der messtechnischen Untersuchungen dabei auf den transparenten Membrankissen-Konstruktionen.

Eine wesentliche Erkenntnis aus den durchgeführten Messungen in der Freiland-Hotbox ist, dass Membrankissen sehr schwierig zu messen sind. Sie sind extrem massearm, besitzen einen großen Luftraum und reagieren schnell und sensibel auf veränderliche äußere Bedingungen. Dieses Verhalten ist messtechnisch schwer zu erfassen. Die gewonnenen Messergebnisse sind deshalb mit größeren Unsicherheiten und Schwankungsbreiten behaftet, als ursprünglich gedacht, was letztlich die Validierung des vereinfachten kalkulatorischen Verfahrens zur wärmetechnischen Bemessung erschwert hat.

Als ein Ergebnis der Untersuchungen lässt sich festhalten, dass die verfügbaren Normen (siehe Berichtsteil IBP) Stegplatten hervorragend abbilden und dafür uneingeschränkt anwendbar sind. Das gilt sowohl für die Betrachtung des  $g$ -Werts als auch für den  $U$ -Wert.

Die Bemessungsvorschriften für den  $g$ -Wert, wie sie in der DIN EN 410 [3] festgeschrieben sind, können auch uneingeschränkt auf Membrankissen-Konstruktionen angewendet werden. Dabei ist der lotrechte zu betrachtende Lichteinfall

auf die „Projektionsfläche des Kissens“ (= Öffnungsquerschnitt) zu beziehen. Der Krümmungswinkel der nach außen hin abfallenden Membranfläche ist den Ergebnissen nach zu vernachlässigen.

Auch die für den U-Wert verfügbaren Normen DIN EN ISO 6946 [4] [5] und DIN EN 673 [6] sind prinzipiell für Membrankissen-Konstruktionen anwendbar, wie die messtechnischen Analysen gezeigt haben. Allerdings ist für beide Normen, die für ETFE-Folienmaterial übliche Transparenz im langwelligen Bereich zwingend zu berücksichtigen. Eine einfache Berechnungsvorschrift für diese Berücksichtigung wurde im Rahmen des Projekts erarbeitet. Im Prinzip führt diese Transparenz im langwelligen Bereich dazu, dass der U-Wert von Membrankissen-Konstruktionen, je nach Bedruckungsgrad und Ausführung, im Bereich von ca. 5 bis 10 % höher liegt, als er ohne diese Berücksichtigung läge.

Der Aufwand für die Hilfsenergie zur Aufrechterhaltung des Überdrucks in Membrankissen wird bei der Planung oft wenig betrachtet. Allerdings haben die Messungen an realen Objekten gezeigt, dass damit ein erheblicher Energieaufwand verbunden sein kann. Die Bereitstellung der reinen Stützluft macht dabei allerdings nur ein Drittel bis ein Viertel des Hilfsenergieaufwands aus. Der überwiegende Teil geht zu Lasten der Stützluft-Trocknung. Hierfür gibt es derzeit nur wenige Bestrebungen, den energetischen Aufwand zu reduzieren. Optimierte Stützluft-Trocknungsanlagen könnten helfen, die damit verbundenen Betriebskosten zu senken.

Mit den im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Ergebnissen haben Hersteller und Anwender von Leichtbausystemen die Sicherheit, dass die bestehende Normung im Bereich des wärmetechnischen Verhaltens diese Systeme hinreichend gut abdeckt. Darüber hinaus steht nun der Membranbau-Branche ein validiertes Verfahren zur Verfügung, um Membrankissen-Konstruktionen entsprechend korrekt zu bemessen. Dieses Verfahren wiederum kann nun von der einschlägigen Branche sukzessive in Regularien und Vorschriften überführt werden.

### **3.6.2 Projektteil Universität Stuttgart, ILEK**

Eine textile Mehrlagenfassade besteht aus mindestens einer Innen- und einer Außenmembrane, die typischerweise jeweils als beschichtetes Gewebe ausgeführt sind. Zur Verbesserung der bauphysikalischen Eigenschaften können weitere Membranlagen oder Funktionswerkstoffe wie Dämmvliese mit in den Aufbau integriert werden. Diese können ausgeführt werden als transluzente oder opake Fassaden.

Mehrlagige textile Fassadenelemente weisen im Vergleich zu konventionellen Hüllen deutlich geringere Flächengewichte und sehr geringe spezifische Wärmekapazitäten auf. Sie reagieren daher bei Veränderungen des Außen- wie auch des Innenraumklimas sehr dynamisch.

Die Wärmeübertragung im textilen Fassadenelement sowie zwischen der Fassade und der Außen- sowie der Innenraumumgebung wird wesentlich beeinflusst von strahlungsbedingten Übertragungsvorgängen. Die übertragene Wärmestrahlungsleistung ist abhängig von der vierten Potenz der absoluten Oberflächentemperaturen der im Strahlungsaustausch stehenden Oberflächen. Der Strahlungswärmeübertrag ist daher in großem Maße nichtlinear bezüglich einer Änderung der Oberflächentemperaturen.

Für eine sichere Beurteilung der Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit einer textilen Mehrlagenfassade ist es daher notwendig, die mögliche Variation des Wärmedurchgangswertes bei der Fassadenauslegung und der konstruktiven Gestaltung der Fassade einzubeziehen. Bei gleichen Temperaturdifferenzen zwischen den Oberflächentemperaturen der Außen- und der Innenmembrane aber unterschiedlichen Temperaturniveaus kommt es zu deutlichen Veränderungen im U-Wert. Zudem beeinflusst der Bewölkungszustand den Strahlungsaustausch der äußeren Membranlage mit dem Himmel wesentlich. Insbesondere wenn Fassadenelemente im direkten Strahlungsaustausch mit dem Himmel stehen, wie es bei schräg-geneigten Fassaden oder Membrandächer der Fall ist, kann es bei klaren und kalten Nächten zu einer Abkühlung der Außenhülle unter die Taupunkttemperatur und somit zur Kondensat-Bildung auf den beiden Seiten der Außenmembrane kommen. Zudem bewirken bei derart orientierten Fassaden Änderungen im Bewölkungsgrad deutliche Veränderungen im Wärmedurchgang. Der Grund hierfür ist die Änderungen im Strahlungswärmeaustausch mit dem Himmel.

Für eine energetische Bilanzierung von Räumen und Gebäuden mit Membranhüllen, basierend auf Jahressimulationen, führt die Einbeziehung der Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten von der Außen- und Innenraumtemperatur sowie vom Bewölkungszustand zu belastbareren Ergebnissen.

Eine rechnerische Ermittlung der Wärmedurchgangswerte für derartige textile Mehrlagenfassaden setzt die Einbeziehung der Strahlungsvorgänge mit einer mathematisch korrekten Formulierung voraus. Zudem ist für unterschiedliche Umströmungsgeschwindigkeiten, im Wesentlichen auf der Außenseite der Fassade, ein Ansatz zur Berücksichtigung von dessen Einfluss auf den entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten nötig (z.B. nach DIN EN ISO 6946:2018 Anhang C). Bei der Anwendung der DIN EN ISO 6946:2018 Anhang C bzw. Anhang D ist der Ansatz für den Strahlungsaustausch zu präzisieren durch einen Ansatz nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz unter Berücksichtigung der Oberflächenemissionskoeffizienten und der Sichtfaktoren. Bei den transluzenten textilen Fassaden wirken sich zudem solare Gewinne auf das Innenraumklima aus, die aus dem Anteil der durchgelassenen direkten Strahlungstransmission und dem Anteil aus der sekundären Wärmeabgabe nach innen bestehen. Ein rechnerischer Ansatz zu deren Berücksichtigung ist, anders als für Verglasungen in der DIN EN 410 angegeben, für Mehrlagensysteme nicht verfügbar. Ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmedurchgangskoeffizienten für unterschiedliche Mehrlagensysteme, basierend auf wissenschaftlich fundierten Ansätzen für die konvektiven und strahlungsbedingten Wärmetransportvorgänge innerhalb des Lagenaufbaus sowie mit der Umgebung, wurde im Rahmen eines Zukunft Bau-Forschungsprojekts des ILEK erstellt (Layer-Simulationstool). [7]



Für die am ILEK untersuchte adaptive Verglasung kann die Ermittlung des U-Wertes sowie des g-Wertes erfolgen unter Anwendung der für Verglasungen relevanten Normen (DIN EN 410: Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen und DIN EN 673: Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten) unter Einbeziehung der schaltstufenabhängigen, veränderlichen Transmissions- und Absorptionswerte.

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitsplan und Aufteilung der Arbeitspakete zwischen den Forschungspartnern.

7

## Literaturverzeichnis

- [1] Fraunhofer IFAM, „Membrankissen und Fügetechnik Kleben - Innovation für den Bau,“ 2012.
- [2] A. Schmitt, Katalog - Bewertung von Bemessungsvorschriften, 2008.
- [3] *DIN EN 410 Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen; Deutsche Fassung EN 410:2011.*
- [4] DIN EN ISO 6946 Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2007.
- [5] DIN EN ISO 6946 Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO 6946:2017); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2017.
- [6] DIN EN 673 - Glas im Bauwesen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Berechnungsverfahren; Deutsche Fassung EN 673:2011.
- [7] W. Haase, Haase, W. et al.: Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen, ILEK, Stuttgart, 2011.

Anlage zum IBP-Abschlussbericht IL-001/000/2019

Berichtsteil Fraunhofer IBP

## **Bewertungsverfahren Leichtbau**

Entwicklung eines vereinfachten Bewertungsverfahrens zur Bestimmung der wärmetechnischen Eigenschaften (U-Wert, g-Wert) von Membranhüllen-Konstruktionen

Der Berichtsteil IBP umfasst

101 Seiten Text

21 Tabellen

66 Bilder

Autoren:

Andreas Kaufmann

Dr. Matthias Kersken

Almuth Schade

Herbert Sinnesbichler

Florian Hess

Angela Püls

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Übersicht der IBP-Arbeitspakete</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Messtechnische Untersuchungen</b>	<b>5</b>
2.1	Kunststoffstegplatten	5
2.1.1	Anwendung / Einsatz	5
2.1.2	Aktuelle Normen	8
2.1.3	Grenzen der Normen	11
2.1.4	Bestimmung des U-Werts (Beispiele)	12
2.1.5	Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrades	18
2.2	Membrankissenkonstruktionen	18
2.2.1	Prüfkörper und Versuchsdesign	18
2.2.2	Spektralmessungen, optische Kennwerte und g-Wert	23
2.2.3	Kalorimetrisches Mess- und Prüfverfahren	30
2.2.4	Thermographie der Membranprüflinge	43
2.2.5	Messtechnische Untersuchung Randverbund	44
2.2.6	Auswertung und Messergebnisse	47
2.3	Stützluftanlagen	57
2.3.1	Prinzipieller Aufbau	57
2.3.2	Untersuchung Stützluftanlagen	58
2.3.3	Messergebnisse	64
2.3.4	Auswertung und Ergebnisse	70
2.3.5	Schlussfolgerung Stützluft-Anlagen	73
<b>3</b>	<b>Entwicklung eines membranspezifischen Bemessungsverfahrens</b>	<b>75</b>
3.1	Grundlagen	75
3.1.1	Pneumatisch gespannte Membrankissen	75
3.1.2	Normative Bemessung	76
3.2	Sensitivitätsanalyse der Berechnungsmodelle	78
3.3	Bestimmung der Temperaturdifferenz über den Luftraum	81
3.4	Instationäre Randbedingungen und Monatsbilanzverfahren	84
3.4.1	Zeitlicher U-Wert-Verlauf über ein Jahr	84
3.4.2	Monatsbilanzverfahren und Schlussfolgerungen	86
3.5	Berücksichtigung der IR Transmission	87
3.5.1	Korrigierter Emissionsgrad	88
3.5.2	Korrigierter Strahlungsaustauschgrad	92
3.5.3	Einfluss der transmittierten Strahlung auf den U-Wert	92
3.5.4	Validierung der Transmissionskorrektur	93

<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Validierung des Berechnungsverfahrens</b>	<b>95</b>
4.1	Validierung der g-Wert Berechnung	95
4.2	Validierung der U-Wert Berechnung	97
4.3	Vergleich ISO 6946 und EN 673	98
<b>5</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>100</b>
<b>6</b>	<b>Bilderverzeichnis</b>	<b>102</b>
<b>7</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>106</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>107</b>

# 1 Übersicht der IBP-Arbeitspakete

Die im Rahmen des Projekts vom Fraunhofer IBP bearbeiteten Arbeitspakete sind in nachfolgender Tabelle als Übersicht dargestellt. Das Projekt ist insgesamt vollständig bearbeitet und inhaltlich erfolgreich abgeschlossen worden.

Tabelle 1:  
Übersicht Arbeitspakete des IBP.

Nr.	Arbeitspaket
<b>AP 1</b>	<b>Literaturrecherche</b>
1.1	Anwendungsgrenzen bestehender Normung
1.2	Physikalische Grundlagen von Ultraleichtbaukonstruktionen
1.3	Prüfung existierender Lösungsansätze
<b>AP 2</b>	
<b>2.1</b>	<b>Erstellen von (Mess-) Datensätzen</b>
2.1.1	Klassifizieren typischer UL-Konstruktionen
2.1.2	Erstellen der Prüflinge
2.1.3	Ermittlung U- & g-Werte im Kalorimeter
2.1.4	Ermittlung Spektraldaten und der gewichteten Mittelwerte
<b>2.2</b>	<b>Energetische Analyse von Rand- &amp; Klemmprofilen</b>
2.2.1	Energetische Analyse Randverbund
2.2.2	Messwerte Rand
<b>AP 3</b>	<b>Datenanalyse</b>
3.1	Bestimmung der wesentlichen Einflüsse
3.2	Anwendbarkeit U- & g-Wert
3.3	Anpassung / Neuentwicklung und Validierung Instationäre Rechenverfahren Iterative Rechenmodelle
<b>AP 4</b>	<b>Ausarbeitung eines Bewertungsverfahrens</b>
4.1	Erarbeitung stationäres Monatsbilanzverfahren Iteratives Berechnungsverfahren
4.2	Analyse Hilfsenergieaufwand der Stützluft
4.3	Ausarbeitung eines Vorschlags zur Implementierung in Norm
<b>AP 5</b>	<b>Dokumentation und Berichterstellung</b>

## 2 Messtechnische Untersuchungen

### 2.1 Kunststoffstegplatten

#### 2.1.1 Anwendung / Einsatz

Transparente Kunststoffstegplatten sind im Vergleich zu Glas leichter und kostengünstiger und kommen deshalb unter anderem für folgende Anwendungen zum Einsatz:

- Sporthallenverglasungen
- Lichtbänder / Lichtkuppeln
- Gewächshäuser
- Wintergärten
- Terrassendächer
- Schwimmbadüberdachungen
- Stadionüberdachungen
- Bahnhöfe
- Giebelverkleidungen

Meist handelt es sich dabei um Platten aus Polycarbonat (PC) oder Polymethylmethacrylat (PMMA), seltener aus anderen Kunststoffen wie z.B. Polyvinylchlorid (PVC). Tabelle 2 zeigt einen Vergleich von PMMA- und PC-Stegplatten. In Tabelle 3 sind die Eigenschaften von PMMA und PC zusammengefasst.

Beispiele für den Einsatz von Kunststoffstegplatten sind zu finden in [1] und [2].

Tabelle 2:  
Vergleich PMMA- und PC-Stegplatten.

	<b>Polymethylmethacrylat PMMA</b>	<b>Polycarbonat PC</b>
Dicken (üblich)	8 mm – 32 mm	4 mm – 60 mm
Lagenanzahl (üblich)	2 - 5	2 - 12
Stegabstände	bis zu 6 x Dicke	kleiner als bei PMMA
Lichttransmission	etwas höher als PC (für das Auge nicht wahrnehmbar)	ähnlich Glas (diffuser als PMMA)
UV-Schutz	mehr	weniger
Preis	teurer als PC	preiswerter als PMMA
Beständigkeit	kein Vergilben + Verspröden	altert (matt) unempfindlicher gegen Stöße und Kratzer als PMMA
Firmenbezeichnungen	Plexiglas® Akrylon®	Makrolon® Lexan®



Tabelle 3:  
Eigenschaften von PMMA (Acrylglas) und PC (Polycarbonat) nach [3].

Eigenschaft	Acrylglas	Polycarbonat
Dichte $\rho$	1190 kg/m <sup>3</sup>	1200 kg/m <sup>3</sup>
Elastizitätsmodul $E$	ca. 3200 N/mm <sup>2</sup>	ca. 2400 N/mm <sup>2</sup>
Querkontraktionszahl $\mu$	0,37 bei 23°C	0,40 bei 23°C
Erweichungstemperatur	110°C	220°C
Mittlerer thermischer Längenausdehnungskoeffizient $\alpha_{T0,50}$	$70 \cdot 10^{-6}$ 1/K	$65 \cdot 10^{-6}$ 1/K
Zugfestigkeit bei		
-40°C	100 N/mm <sup>2</sup>	80 N/mm <sup>2</sup>
23°C	75 N/mm <sup>2</sup>	60 N/mm <sup>2</sup>
70°C	35 N/mm <sup>2</sup>	50 N/mm <sup>2</sup>
UV-Beständigkeit	gut	vergilbt leicht
Brandverhalten	B2 normal entflammbar	B2 normal entflammbar
Wärmedurchgangszahl $k$	für 1 mm: 5,8 W/m <sup>2</sup> K für 5 mm: 5,3 W/m <sup>2</sup> K für 10 mm: 4,4 W/m <sup>2</sup> K	für 1 mm: 5,8 W/m <sup>2</sup> K für 5 mm: 5,2 W/m <sup>2</sup> K für 10 mm: 4,6 W/m <sup>2</sup> K
Reflexionsverlust je Grenzfläche im sichtbaren Bereich	4 %	5 %
Maximale Gewichtszunahme nach Wasserlagerung	2,1 %	0,37 %
Härte nach Mohs	2-3	2-3
Spezifische Wärmekapazität $C_P$	$1,47 \cdot 10^3$ J/kg-K	$1,47 \cdot 10^3$ J/kg-K
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	0,19 W/m-K	0,19 W/m-K
Mittlerer Brechungsindex im sichtbaren Bereich $n$	1,491	1,586
Bruchzähigkeit $K_{Ic}$	$1,62$ N/mm <sup>2</sup> ·m <sup>1/2</sup>	

## 2.1.2 Aktuelle Normen

In diesem Kapitel werden die normativen Anforderungen zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert), des Gesamtenergiedurchlassgrades (g-Wert) sowie der direkten Strahlungstransmission  $\tau_e$  und der Lichttransmission  $\tau_v$  für Kunststoffstegplatten zusammengefasst (Tabelle 4).

Für Kunststoffstegplatten selbst existieren zwei Produktnormen:

DIN EN 16153: Stegmehrfachplatten aus Polycarbonat (PC) mit oder ohne Funktionsschichten ohne Füllmaterialien [4]

DIN EN ISO 12017: Stegdoppel- und Stegdreifachplatten aus Polymethylmethacrylat (PMMA) [5]

Des Weiteren gibt es Normen für Bauteile, die zum Teil aus Kunststoffstegplatten bestehen können:

DIN EN 14963: Dachlichtbänder [6]

DIN EN 1873: Lichtkuppeln [7]

Tabelle 4:  
Normative Anforderungen für Stegmehrfachplatten zur Bestimmung von U-Wert, g-Wert, sowie der direkten Strahlungs- und Lichttransmission.

Norm	Anwendungsbereich	Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert	Strahlungsphysikalische Kennwerte	Gesamtenergie- durchlassgrad, Solarfaktor / Sonnen- faktor
<b>DIN EN 16153 5/2015</b>  Lichtdurchlässige, flache Stegmehrfachplatten aus Polycarbonat (PC) für Innen- und Außenanwendungen an Dächern, Wänden und Decken - Anforderungen und Prüfverfahren	lichtdurchlässige Stegmehrfachplatten (extrudiert, mit oder ohne Funktionsschichten aus PC oder anderen Materialien, ohne Füllung) aus PC für Innen- und Außenanwendungen an Dächern, Wänden und Decken	EN ISO 10077-2 (Definition in EN 673) alternativ EN 674 (Berücksichtigung eines horizontal und/oder vertikal durchgehenden Wärmestroms senkrecht zu den Flächen der Stegmehrfachplatten messen)	direkter Strahlungs- und Lichttransmissionsgrad: Spektralmessungen ggf. als dicke Proben [8] Auswertung nach DIN EN 410	symmetrische Querschnitte: als virtuelle 2-Scheibenverglasung nach DIN EN 410 (Bild 1 und Bild 2) nicht symmetrische Querschnitte (Bild 3): g-Wert-Messung erforderlich
<b>DIN EN ISO 12017 11/1996</b>  Poly(methylmethacrylat) Stegdoppel- und Stegdreifachplatten - Prüfverfahren	extrudierte, flache Poly(methylmethacrylat)platten, die aus farblosen und eingefärbten durchsichtigen, durchscheinenden und undurchsichtigen Materialien bestehen (mind. 80% MMA und höchstens 20% Acryl-Ester oder anderen Monomeren, dürfen auch Weichmacher, Pigmente, UV-Absorber, etc. enthalten)	ISO 8302 (wie 674)	Plattendicken bis 40 mm und Stegabstände bis 35 mm: Spektralmetermessung mit Integrationskugel $d \geq 1000$ mm Lichttransmission für Lichtart A (Annahme: $\tau_A$   $\tau_{D65}$   $\tau_C$ )	keine Angabe
<b>DIN EN 14963 12/2006</b>	Dachlichtbänder aus Kunststoff (z.B. GF-UP, PC, PMMA, PVC) mit oder ohne Tragkonstruktion zur Verwendung mit oder ohne Aufsetzkränzen (aus z.B. PVC, Stahl, Aluminium, Holz, Beton) Neigungen bis zu 10°	Berechnung auf Grundlage der Eigenschaften der Einzelbauteile: DIN EN ISO 6946 Wärmebrücken nach DIN EN ISO 10211-1 (gewichtet nach Flächenanteil) und/oder DIN EN ISO 14683 alternativ	kann am flachen Probekörper oder am fertigen Produkt gemessen werden Kunststoffplatten nach DIN EN ISO 13468-1 bzw. 13468-2 Lichttransmissionsgrad der Stegplatten nach DIN EN ISO 12017, (1996), Anhang A	DIN EN 410

Norm	Anwendungsbereich	Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert	Strahlungsphysikalische Kennwerte	Gesamtenergie- durchlassgrad, Solarfaktor / Sonnen- faktor
Dachdeckungen - Dachlichtbänder aus Kunststoff mit oder ohne Aufsetzkränzen - Klassifizierung, Anforderungen und Prüfverfahren		Messung nach EN ISO 12567-2 oder ETAG 010 (→ DIN EN ISO 6946, DIN EN ISO 14683, DIN EN 673, DIN EN ISO 10211) Messung der thermophysikalischen Eigenschaften nach DIN EN ISO 8990, DIN EN 12664, DIN 674, DIN 675	alternatives Prüfverfahren nach Anhang B (Probe vor weißen Kasten mit Lichtquelle und Fotozelle)	
<b>DIN EN 1873 8/2014</b>  Vorgefertigte Zubehörteile für Dachdeckungen – Lichtkuppeln aus Kunststoff – Produktspezifikation und Prüfverfahren	Lichtkuppeln aus Kunststoffmaterialien (z.B. PC, PMMA, PVC) und Lichtkuppeln mit Aufsetzkränzen aus z.B. PVC, Stahl, Aluminium oder Holz zum Einbau in Dächern fest zur Beleuchtung mit Tageslicht Lichtkuppeln rechteckig oder rund mit einer Breite oder einem Durchmesser $\leq 2,5$ m und einer Länge $\leq 3$ m in Dachflächen mit Neigungen $\leq 25^\circ$ nicht für Lichtkuppeln, die zur Tragfähigkeit oder Steifigkeit des Daches beitragen	U-Wert in Bezug auf die gesamte Außenfläche nach Anhang D: DIN EN ISO 12567-2 (Heizkastenverfahren)	DIN EN 410 direkter Strahlungstransmissionsgrad durch Messung oder Berechnung Lichttransmission: alternatives Prüfverfahren (Probe vor weißen Kasten mit Lichtquelle und Fotozelle)	DIN EN 410 (Der Einfallswinkel sollte für unterschiedliche Sonnenstände berücksichtigt werden, was allerdings nicht genauer erläutert wird.) PC-Stegplatten nach DIN EN 16152 PMMA-Stegplatten nach DIN EN ISO 12017 falls Berechnung nicht anwendbar: Messung des Gesamtenergiegrad durchlassgrads

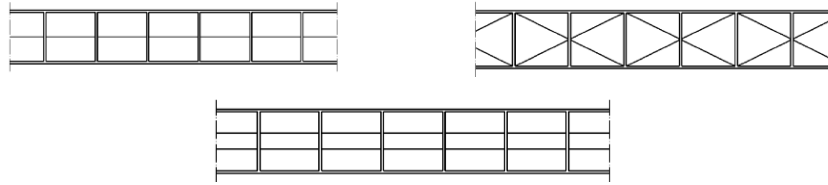


Bild 1:  
Platten mit symmetrischem Querschnitt nach DIN EN 16153.

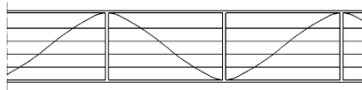


Bild 2:  
Platte mit symmetrischer Spiegelachse nach DIN EN 16153.



Bild 3:  
Platten mit unsymmetrischer Geometrie nach DIN EN 16153.

### 2.1.3 Grenzen der Normen

Im Wesentlichen finden sich die normativen Anforderungen von Kunststoffstegplatten in den beiden Produktnormen DIN EN 16153 und DIN EN ISO 12017. In Tabelle 5 sind die Grenzen der Normen zusammengestellt. Der Anwendungsbereich betreffend der bauphysikalischen Anforderungen (U-Wert, g-Wert sowie der strahlungsphysikalischen Kennwerte) der Normen kann meist über diese Grenzen hinaus erweitert werden. Teilweise sind die Anwendungsgrenzen auch durch das Alter der Norm zu erklären. Die DIN EN ISO 12017 ist bereits beispielsweise über 20 Jahre alt. Auf eine Bestimmung des g-Werts für Kunststoffstegplatten konnte damals verzichtet werden, da deren Einsatz begrenzt war. Außerdem existieren heutzutage zusätzlich dickere Kunststoffstegplatten, die sich auch aus mehreren Schichten zusammensetzen.

Tabelle 5:  
Grenzen der Normen und ggf. in Anlehnung an die Norm.

<b>Grenzen der Normen DIN EN 16153 (5/2015) DIN EN ISO 12017 (11/ 1996)</b>	<b>„Erweiterung“ der Norm</b> durch Vergrößerung der Anwendungsbereiche (→ Nachweise durch „Anlehnung“ an die Norm)*
<b>bzgl. Material:</b> Normen nur für PC- und PMMA-Kunststoffstegplatten	Kunststoffstegplatten aus anderen Materialien, wie z.B. PVC, können nach den gleichen Verfahren wie Platten aus PMMA und PC gemessen bzw. berechnet werden
<b>bzgl. Geometrie:</b> <b>PMMA-Stegplatten</b> auf 3 Schichten begrenzt	die Verfahren sind vor allem abhängig von der Gesamtdicke (nicht von der Anzahl der Lagen): es muss untersucht werden, ob die Platten als „dicke“ Proben ( [9] und [8]) gemessen werden müssen, d. h. entsprechende Messeinrichtungen müssen gewählt werden
<b>bzgl. Füllung:</b> alle Normen nur für Kunststoffstegplatten ohne Füllung	die Kunststoffstegplatten dürfen auch mit Füllung nach den Normverfahren gemessen und berechnet werden
<b>bzgl. Lichttransmission:</b> <b>bei PMMA-Stegplatten:</b> Dicken $\leq 40$ mm Stegabstände $\leq 35$ mm	abhängig von vorhandener Integrationskugel auch größere Dicken und Stegabstände möglich (Definition von „dicken“ Proben nach CIE 130 [8])
<b>bzgl. g-Wert (PC-Stegplatten):</b> vereinfachtes Verfahren für symmetrische Querschnitte	Vereinfachung nur für symmetrische Querschnitte bei PC-Stegplatten, aber auch andere Materialien möglich
<b>bzgl. U-Wert:</b> Berechnung nur für PC-Platten	Berechnung kann auch für PMMA-Platten alternativ zur Messung verwendet werden
* betrifft nur die Abschnitte bzgl. der strahlungsphysikalischen Kenndaten (Transmission) und des Gesamtenergiedurchlassgrades sowie des U-Werts	

#### 2.1.4 Bestimmung des U-Werts (Beispiele)

In Tabelle 6 sind die U-Werte von verschiedenen Stegplatten aus Polycarbonat zusammengestellt. Die Werte wurden gemessen und/oder berechnet.

Tabelle 6:  
U-Werte von Stegplatten aus Polycarbonat.

Skizze: $a_s$ Stegabstand $t$ Dicke A Außengurt I Innengurt M Mittellage D Diagonale	Gesamt- dicke [mm]	Kammern in Richtung Q	Geometrie						Einbau		U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	
			$t_A$ [mm]	$t_{SA}$ [mm]	$t_{SI}$ [mm]	$t_M$ [mm]	$a_s$ [mm]	Messung (DIN EN 674) ohne Füllung	Berechnung (DIN EN ISO 10077-2) ohne Füllung	Berechnung (DIN EN ISO 10077-2) Aerogefüllung <sup>(4)</sup>		
	40	2	1,09	0,55	0,72	0,17	44,00	X		1,90	0,53	
	40	3	0,89	0,62	0,62	0,16	33,10	X	1,70	1,60	0,54	
	50	9	0,84	0,36	0,57	0,06	24,15	X	1,50	1,40	0,53	
										0,87		
								X	1,00	0,85		

Skizze: $a_s$ Stegabstand $t$ Dicke A Außengurt I Innengurt M Mittellege D Diagonale	Gesamt- dicke [mm]	Kammern in Richtung Q	Geometrie						Einbau	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	
			$t_A$ [mm]	$t_I$ [mm]	$t_{SA}$ [mm]	$t_{SI}$ [mm]	$t_M$ [mm]	$a_s$ [mm]		Messung (DIN EN 674) ohne Füllung	Berechnung (DIN EN ISO 10077-2) ohne Füllung
	16	2	0,79	0,75	0,55 <sup>(2)</sup>	0,55 <sup>(2)</sup>	0,25	20,00	x	2,40	1,30
	20	2	0,95	0,9	0,55 <sup>(2)</sup>	0,55 <sup>(2)</sup>	0,25	20,00	x	2,20	1,10
	10	1	0,51	0,48	0,50 <sup>(2)</sup>	0,50 <sup>(2)</sup>	-	10,90	x	3,40	2,10
	16	1	0,65	0,65	0,55 <sup>(2)</sup>	0,55 <sup>(2)</sup>	-	11,00	x	2,90	1,50
	16	4 <sup>(1)</sup>	0,74	0,61	0,56 <sup>(2)</sup>	0,24 <sup>(3)</sup>	0,11	18,50	x	2,20	
	25	4 <sup>(1)</sup>	0,70	0,65	0,60 <sup>(2)</sup>	0,35 <sup>(3)</sup>	0,30	19,00	x	1,90	

(4)  $\lambda = 0,019 \text{ W/(mK)}$

(1) davon 2 Kammern diagonal  
 (2) Stärke des Stegs  $t_S$   
 (3) Stärke der Diagonale  $t_D$



Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte im Zweiplattenverfahren mit Schutzring nach DIN EN 12667. Dieses Verfahren stellt eine Methode zur direkten und absoluten Messung der Wärmeleitfähigkeit bereit. Zwei gleiche Proben werden zwischen der Heiz- und den Kühlplatten angeordnet. Im stationären Temperaturzustand fließt ein konstanter Wärmestrom durch die Proben. Durch den separat beheizten Schutzring wird sichergestellt, dass kein Wärmestrom seitlich in oder aus der Probe fließen kann. Die Wärmeleitfähigkeit wird bestimmt aus der elektrischen Leistung der Heizplatte, der mittleren Temperaturdifferenz zwischen den Probenoberflächen und den Abmessungen der Proben. (Bild 4, Bild 5 und Tabelle 7). Bei der Messung für Kunststoffstegplatten wird eine Messgenauigkeit von kleiner  $\pm 5\%$  vom Messwert erreicht.

Die Berechnung erfolgt nach DIN EN ISO 10077 Teil 2.

Die Unterschiede zwischen Messung und Berechnung von U-Werten (Tabelle 6) liegen in der gleichen Größenordnung wie die Unterschiede zwischen Messung und Berechnung von U-Werten bei Verglasungen. Diese lassen sich bei Polycarbonat-Kunststoffstegplatten unter anderem auch durch Unterschiede in der Geometrie erklären:

Die Abmessungen von zwei Platten unterscheiden sich je nachdem, ob sie am Anfang oder am Ende der Produktionsstrecke entnommen wurden.

- Die zumeist dünnen Stege entsprechen nicht genau der „Plangeometrie“ (Bild 6).

Die U-Werte können also wie in den Normen vorgeschlagen berechnet oder gemessen werden. Es spricht nichts dagegen, die U-Werte auch für PMMA-Platten nach DIN EN ISO 10077-2 zu berechnen.



Bild 4:  
Foto des verwendeten schwenkbaren Plattengeräts (Fraunhofer IBP, Standort Stuttgart, Gruppe Wärmekennwerte und Klimasimulation).

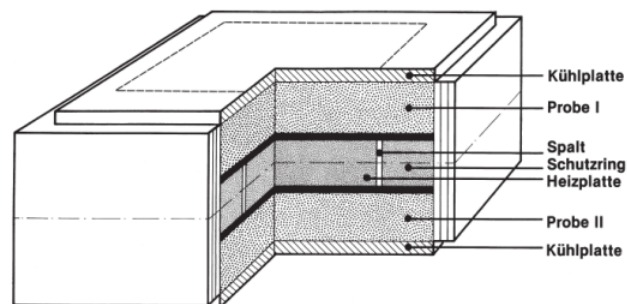


Bild 5:  
Skizze des Verfahrens zur U-Wert-Bestimmung.

Tabelle 7:  
Messmöglichkeiten des Plattengeräts (Fraunhofer IBP, Standort Stuttgart,  
Gruppe Wärmekennwerte und Klimasimulation).

Messgrößen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wärmeleitfähigkeit <math>\lambda</math></li> <li>▪ Wärmedurchlasswiderstand R</li> <li>▪ Wärmedurchgangskoeffizient U</li> </ul>
Messbereich	$0,01 \text{ W/(mK)} < \lambda < 2,0 \text{ W/(mK)}$
Normen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ DIN EN 12664</li> <li>▪ DIN EN 12667</li> <li>▪ DIN EN 674</li> <li>▪ DIN 52612</li> </ul>
Einbaulage	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ vertikal</li> <li>▪ horizontal</li> </ul>

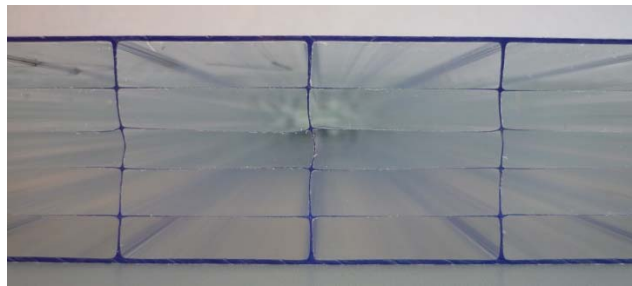


Bild 6:  
Schnitt durch PC-Kunststoffstegplatte.

## 2.1.5 Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrades

Für Kunststoffstegplatten mit symmetrischen Querschnitten (Bild 1 und Bild 2) darf der Gesamtenergiedurchlassgrad näherungsweise nach DIN EN 16153 [4] als virtuelle Zweischeibenverglasung nach DIN EN 410 [10] bestimmt werden. Dafür ist zuerst die Messung des direkten Strahlungstransmissionsgrades  $\tau_e$  notwendig, wobei für Kunststoffstegplatten in Außenbauteilen meist eine Messung für „dicke lichtdurchlässige Proben“ durchgeführt werden muss. Das bedeutet, dass die üblichen Integrationskugeln aufgrund ihres Durchmessers und Probenports nicht für diese Messung geeignet sind. Nach DIN EN 14500 bzw. CIE 130 [8] ist eine lichtdurchlässige Probe als dick anzusehen, wenn besondere Verfahren erforderlich sind, um zu verhindern, dass ein wesentlicher Anteil der reflektierten oder durchgelassenen Strahlung aufgrund lateraler Verluste nicht nachgewiesen wird. Es muss daher ein Spektrometer mit Integrationskugel mit entsprechend größerem Durchmesser und Probenport verwendet werden. Mit Hilfe des gemessenen direkten Strahlungstransmissionsgrades  $\tau_e$  darf beim Näherungsverfahren für symmetrische Querschnitte der sekundäre Wärmeabgabegrad nach innen  $q_i$  und damit der g-Wert näherungsweise als virtuelle Zweischeibenverglasung bestimmt werden.

Für Kunststoffstegplatten mit nicht symmetrischen Querschnitten (Bild 3) ist eine Messung des Gesamtenergiedurchlassgrads erforderlich.

Sowohl das Näherungsverfahren als auch die Messung sind unabhängig vom Material (PMMA oder PC) anwendbar.

## 2.2 Membrankissenkonstruktionen

### 2.2.1 Prüfkörper und Versuchsdesign

In Abstimmung mit den projektbeteiligten Industriepartnern werden 5 Prüflinge festgelegt, die typische Schichtaufbauten aktueller Membrankissenkonstruktionen repräsentieren. Je größer die Fläche eines Prüflings ist, desto größer und damit deutlicher ist das „Signal“, das messtechnisch erfasst werden muss, verglichen mit unerwünschten Störeinflüssen. Die Größe dieser 5 Prüflinge wird so gewählt, dass sie die Prüflingsöffnung des Kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstands vollständig ausfüllen. Basierend auf dem Prüfling 1 wird ein weiterer, sechster Prüfling mit identischem Aufbau aber reduzierter Größe definiert. Dieser Prüfling soll dazu dienen, ggf. auftretende Skalier-Effekte bei der Größenänderung von Membrankissen zu untersuchen. Die Prüflinge bestehen aus dem ETFE-Membrankissen selbst, einem entsprechenden Klemmprofil am Rand und einer umlaufenden hölzernen Adapterplatte, auf der das Klemmprofil, der Montagerahmen und die Dämmung befestigt sind. Diese 6 Prüflinge variieren hinsichtlich der Lagenanzahl, des Bedruckungsgrads, der Bedruckungsfarbe, des Druckmusters und der Größe.

Eine Übersicht über die 6 festgelegten Prüflinge und die Parameter bezüglich derer sie sich unterscheiden findet sich in Bild 7. Andere Parameter können mit Hilfe des Versuchsdesigns an einem einzigen Prüfling hintereinander untersucht werden. Dies sind bei der Bestimmung des g-Werts der Sonneneinfallswinkel und die Einbaulage und bei der U-Wert-Messung die Einbaulage und Position der Mittellage. Um den letztgenannten Parameter ohne Umbau des Prüflings variieren zu können, sind die 3-lagigen Membrankissen geometrisch so ausgebildet, dass die Mittellage durch eine gezielte Änderung der Druckverhältnisse in den beiden Kammern des Kissens auch nach innen gewölbt werden kann. Eine Planzeichnung aller 3-lagigen Prüflinge findet sich in Bild 8, die Darstellung des 4-lagigen Prüflings Nr. 4 in Bild 9.

<p><b>Prüfling 1</b></p> <p>3-Lagen</p> <p>Punktdruck 16mm; 50 %</p> <p>Standard Silber 01249</p>	<p><b>Prüfling 2</b></p> <p>3-Lagen</p> <p>Hexagonaldruck 9:89; 89 %</p> <p>Standard Silber 01249</p>
<p><b>Prüfling 3</b></p> <p>3-Lagen</p> <p>Bedruckung 0 %</p> <p>transparent</p>	<p><b>Prüfling 4</b></p> <p>4-Lagen</p> <p>Punktdruck 16mm; 50 %</p> <p>Standard Silber 01249</p>
<p><b>Prüfling 5</b></p> <p>3-Lagen</p> <p>Punktdruck 8 mm; 50 %</p> <p>Dichtes Silber 78100</p>	<p><b>Prüfling 1.1 – KLEIN (ILEK)</b></p> <p>3-Lagen</p> <p>Punktdruck 16mm; 50 %</p> <p>Standard Silber 01249</p>

Bild 7: Übersicht über die festgelegten Membranprüflinge und ihrer variierenden Parameter.

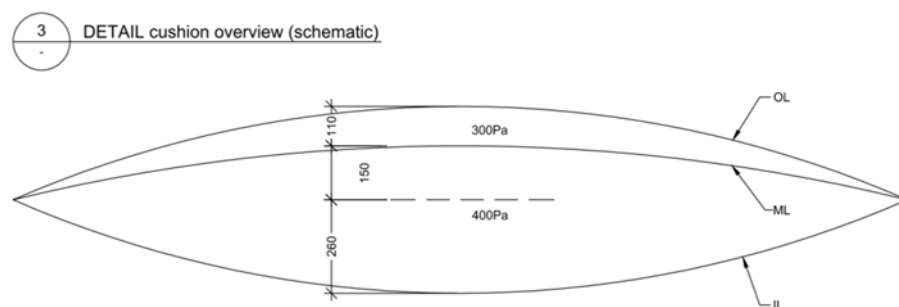


Bild 8: Planzeichnung der 3-lagigen Membranprüflinge. OL: Oberlage; ML: Mittellage; IL: Innenlage.

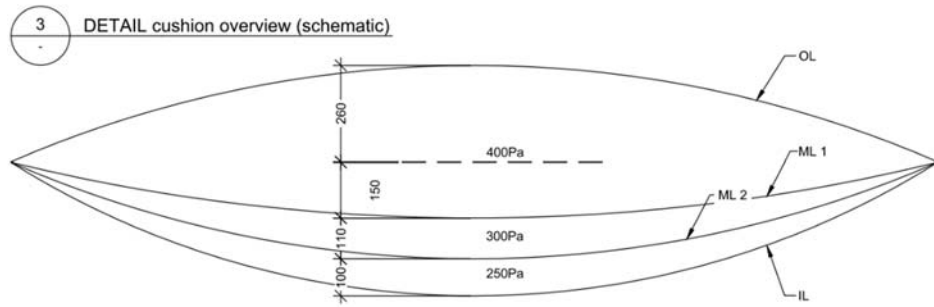


Bild 9:  
 Planzeichnung des 4-lagigen Membranprüflings.  
 OL: Oberlage; ML: Mittellage; IL: Innenlage.

Um ein besseres Verständnis über die thermisch-energetischen Vorgänge in den Prüflingen zu erhalten, wird zusätzlich zur kalorimetrischen Wärmemengenzählung das Innere des Kissens sowie dessen Oberflächen mit zahlreichen Messsensoren ausgestattet. Hierzu werden 2 Messachsen durch das Kissen definiert, eine mittig an der Stelle des maximalen Stiches und die andere oberhalb davon im oberen Drittelspunkt. Entlang dieser Messachsen werden auf jeder Folienschicht die Oberflächentemperaturen des Materials und in jedem Luftraum die solarstrahlungsgeschützte Lufttemperatur erfasst. Da pneumatisch gestützte Membrankissen am Rand verschweißt werden, ist das nachträgliche Austauschen von ausgefallener Sensorik nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wird die Sensorik der mittleren Messachse redundant ausgeführt. Zusätzlich wird an der mittleren Messachse eine Wärmeflusscheibe an der Innen- und der Außenlage des Kissens angebracht. Dieses Messkonzept ist in Bild 10 grafisch dargestellt. Generell gilt, dass je mehr Messachsen bzw. Messstellen gewählt werden, desto detailliertere Informationen können über die Vorgänge im Kissen gewonnen werden. Allerdings beeinflusst jeder Sensor und dessen Verkabelung wiederum die Prozesse in den Kissens durch eine erhöhte Strahlungsabsorption und ggf. eine Behinderung der Luftströmungen. Dies gilt vor allem für die großen Wärmeflusscheiben und die großen Strahlungsschirme der Lufttemperaturfühler. Mit dem hier beschriebenen Messaufbau wurde bezüglich der Anzahl der Messstellen ein Kompromiss gewählt.

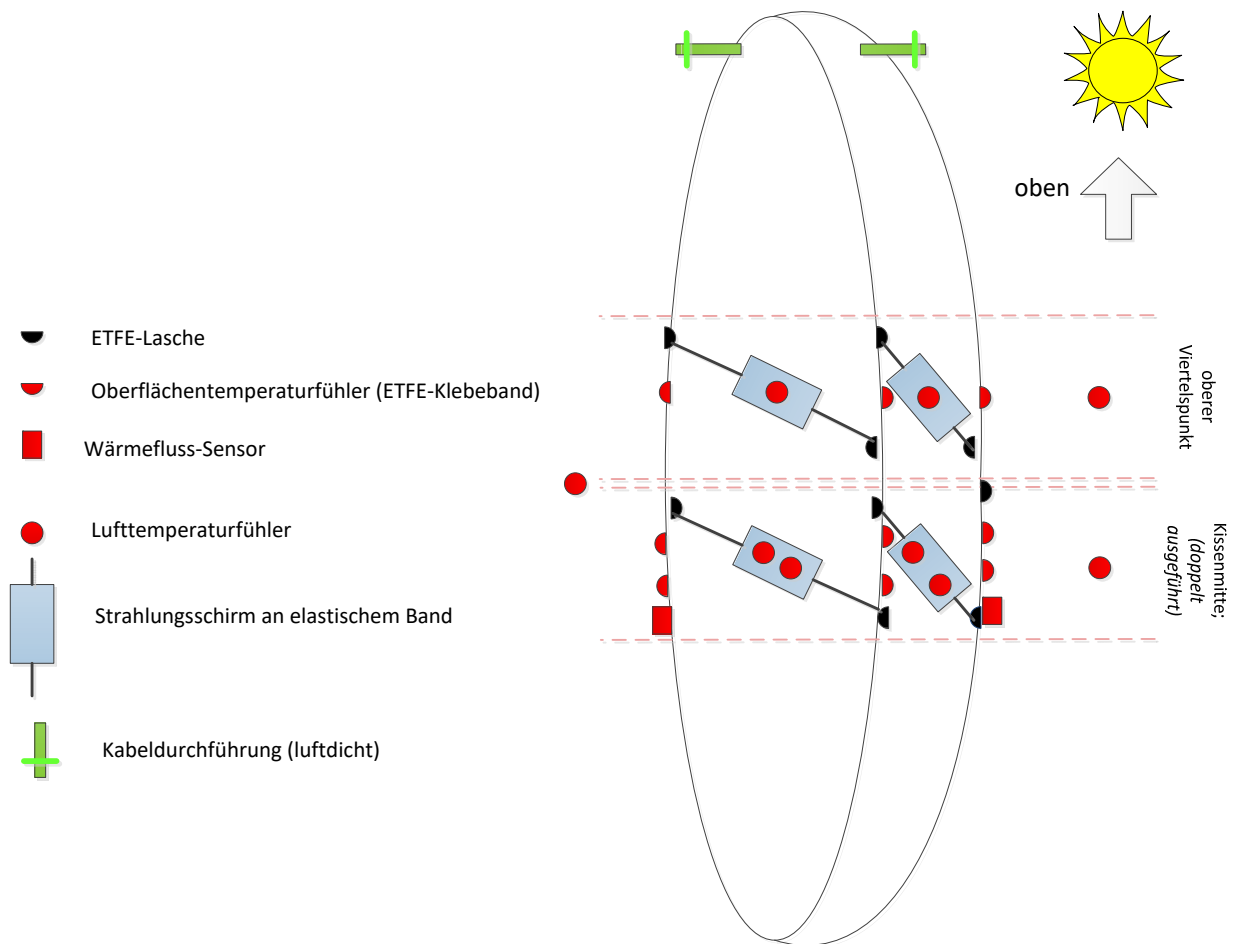


Bild 10:  
Skizze der Sensorausstattung der 3-lagigen Membranprüflinge.

Da g-Werte immer möglichst ohne mittlere Temperaturdifferenz zwischen innen und außen gemessen werden, ist die Temperatur in der Prüfkammer durch die Außenlufttemperatur des jeweiligen Versuchstags bzw. deren Vorhersagewert bestimmt [11]. Als Freiheitsgrade bei einem Prüfling verbleiben noch die Einbaulage, der Sonneneinfallswinkel und der Positionswechsel der Mittellage. Da sich bei in situ-Messungen auf Grund der Veränderung der Sonnenhöhe im Tagesverlauf die Einbaulage und der Einfallswinkel nicht trennen lassen, sind 2 unterschiedliche Messstrategien möglich. Einerseits kann der Prüfling der Sonne nachgeführt werden, so dass der Einfallswinkel auf den Prüfling immer senkrecht bzw. konstant ist, wobei sich hier allerdings die Einbaulage, also die Kissenneigung über den Tagesverlauf, verändert. Durch diese Veränderung der Kissenneigung können die vorherrschenden Konvektionsvorgänge wechseln. Bei dem alternativen, gewählten Messverfahren wird der Prüfling auf feste Neigungswinkel von z.B. 45 ° eingestellt und der Sonne nur nachgedreht (siehe Bild 11). So bleibt die Einbaulage konstant und der Einfallswinkel des direkten Solarstrahlungsanteils variiert. Bezüglich der U-Werte werden die Einbaulage und der Positionswechsel der Mittellage variiert.

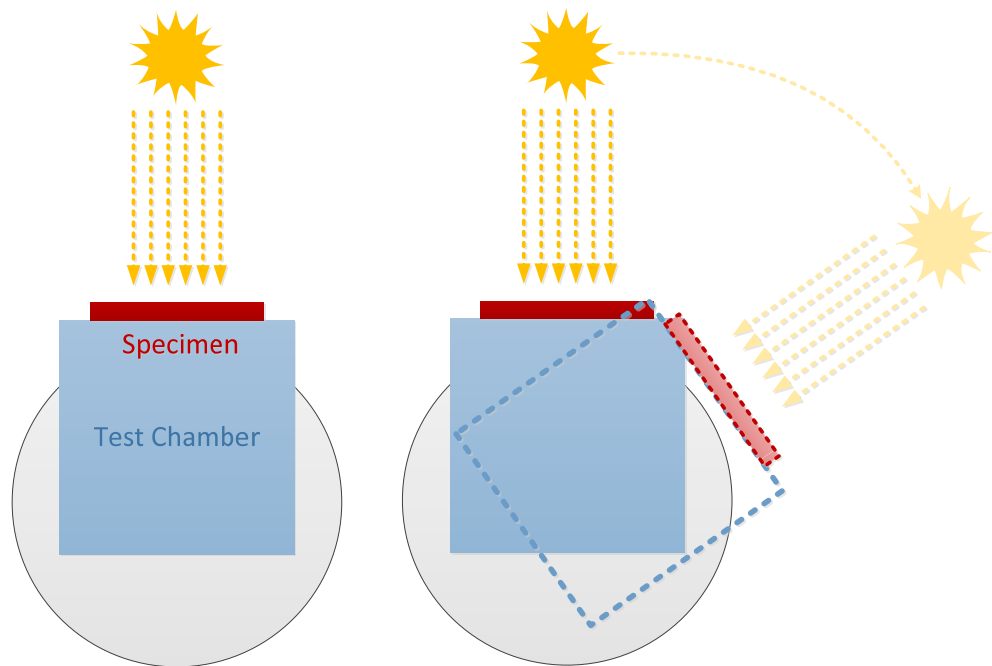


Bild 11:  
Nachdrehen des Prüflings mit der Sonne (Blick von oben).

Ein weiterer Punkt bei der energetischen Bewertung von Membrankissen ist, ähnlich wie bei Verglasungen, der Einfluss des Rahmens. Im Zuge des hier beschriebenen Forschungsprojekts erfolgt diese Betrachtung mit Hilfe 2-dimensionaler Finite-Elemente Berechnungen. Um die hierfür verwendeten Rechenmodelle validieren zu können, wird das Klemprofil, wie in Bild 12 dargestellt, an einer Stelle mit 4 Wärmeflusscheiben und 5 Oberflächentemperaturfühlern ausgestattet.



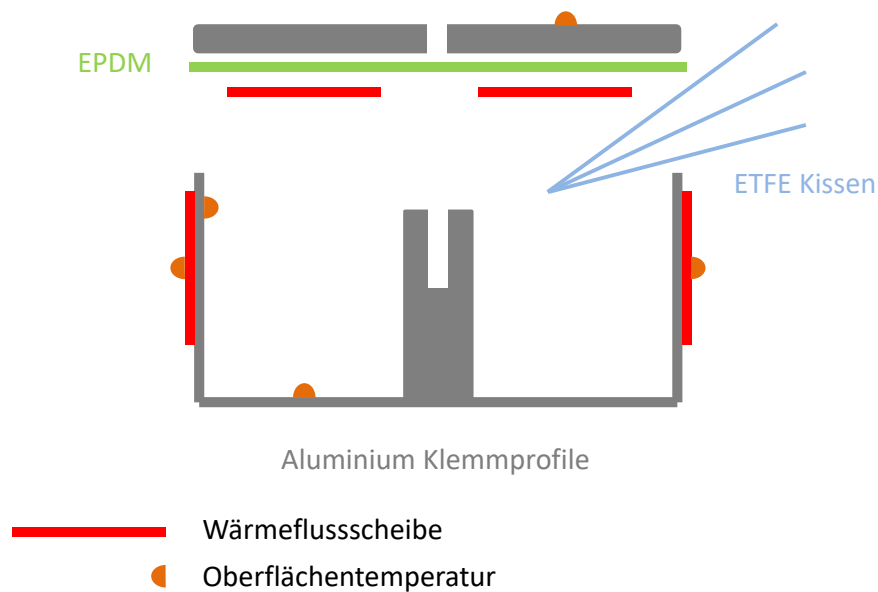


Bild 12:  
Schematische Darstellung der Sensorpositionen im Klemmprofil.

## 2.2.2 Spektralmessungen, optische Kennwerte und g-Wert

Derzeit existieren noch keine Normen für die Bestimmung des Gesamtenergie-durchlassgrades und des Lichttransmissionsgrades von Membrankissen. Aus diesem Grund wird hier vereinfacht nach der Norm DIN EN 13363 Teil 2 [12] bzw. DIN EN 410 [10] (begrenzt auf 3 Schichten) verfahren. Dabei wird eine planparallele Anordnung der Schichten angenommen. Die Bestimmung des Gesamtenergie-durchlassgrades  $g$  erfolgt in Anlehnung an diese Norm aus den Spektraldaten der einzelnen Schichten unter folgenden Randbedingungen:

- Wärmeübergangskoeffizient außen  $h_{c,e} = 18 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Wärmeübergangskoeffizient innen  $h_{c,i} = 3,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Außentemperatur = Strahlungstemperatur  $T_e = T_{r,e} = 278 \text{ K} (5^\circ\text{C})$
- Innentemperatur  $T_i = 293 \text{ K} (20^\circ\text{C})$
- senkrechter Einbau der Prüfkörper

Dabei handelt es sich um die Referenzbedingungen aus DIN EN 13363 Teil 2, die für Vergleiche von Produkten und für Berechnungen der durchschnittlichen solaren Einstrahlung während der Heizperiode herangezogen werden.

Die spektrale Transmission  $\tau(\lambda)$  und Reflexion  $\rho(\lambda)$  der einzelnen ETFE-Folien im UV/Vis/NIR-Bereich werden entsprechend DIN EN 410 (April 2011) gemessen: An einem Zweistrahl-Gitterspektrometer Lambda 19 von Perkin-Elmer mit einer hochreflektierenden Integrationskugel ( $\varnothing 150 \text{ mm}$ , Bariumsulfat-Beschichtung) werden Reflexion und Transmission im Wellenlängenbereich von 300 nm bis

2500 nm (Gesamtsolarbereich ) unter nahezu senkrechtem Strahlungseinfall (normal-hemisphärisch) gemessen. Als Referenzmaterial für die Reflexion dient ein kalibriertes Spectralon.

Die direkten Strahlungsreflexionsgrade  $\rho_e$  und Strahlungstransmissionsgrade  $\tau_e$  werden mit Hilfe der normierten relativen spektralen Verteilung der Globalstrahlung  $S_\lambda$ , multipliziert mit dem Wellenlängenintervall  $\Delta\lambda$  von 300 nm - 2500 nm nach DIN EN 410, Tabelle 2 ermittelt. Die direkten Strahlungsabsorptionsgrade  $\alpha_e$  der Folien ergeben sich zu:  $\alpha_e = 1 - \rho_e - \tau_e$ .

Die Lichttransmissionsgrade  $\tau_v$  werden entsprechend mit der normierten relativen spektralen Strahlungsverteilung  $D\lambda$  der Normlichtart D65, multipliziert mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad  $V(\lambda)$  und dem Wellenlängenintervall  $\Delta\lambda$ , multipliziert mit dem Wellenlängenintervall  $\Delta\lambda$  nach DIN EN 410, Tabelle 1, ermittelt.

Die Spektralverläufe der Reflexion und Transmission der mit Muster bedruckten Folien werden proportional zum Bedruckungsgrad aus den Kenndaten der vollflächig bedruckten und der unbedruckten Folien ermittelt. Die Bedruckung liegt auf der Kisseninnenseite.

In Bild 13 und Tabelle 8 sind die verschiedenen Membranaufbauten zusammengestellt.

Bild 14 und Bild 15 zeigen die Verläufe der spektralen Transmission und Reflexion der ETFE-Folien im solaren Wellenlängenbereich. In Tabelle 9 sind die strahlungsphysikalischen Kenndaten der ETFE-Folien zusammengefasst.

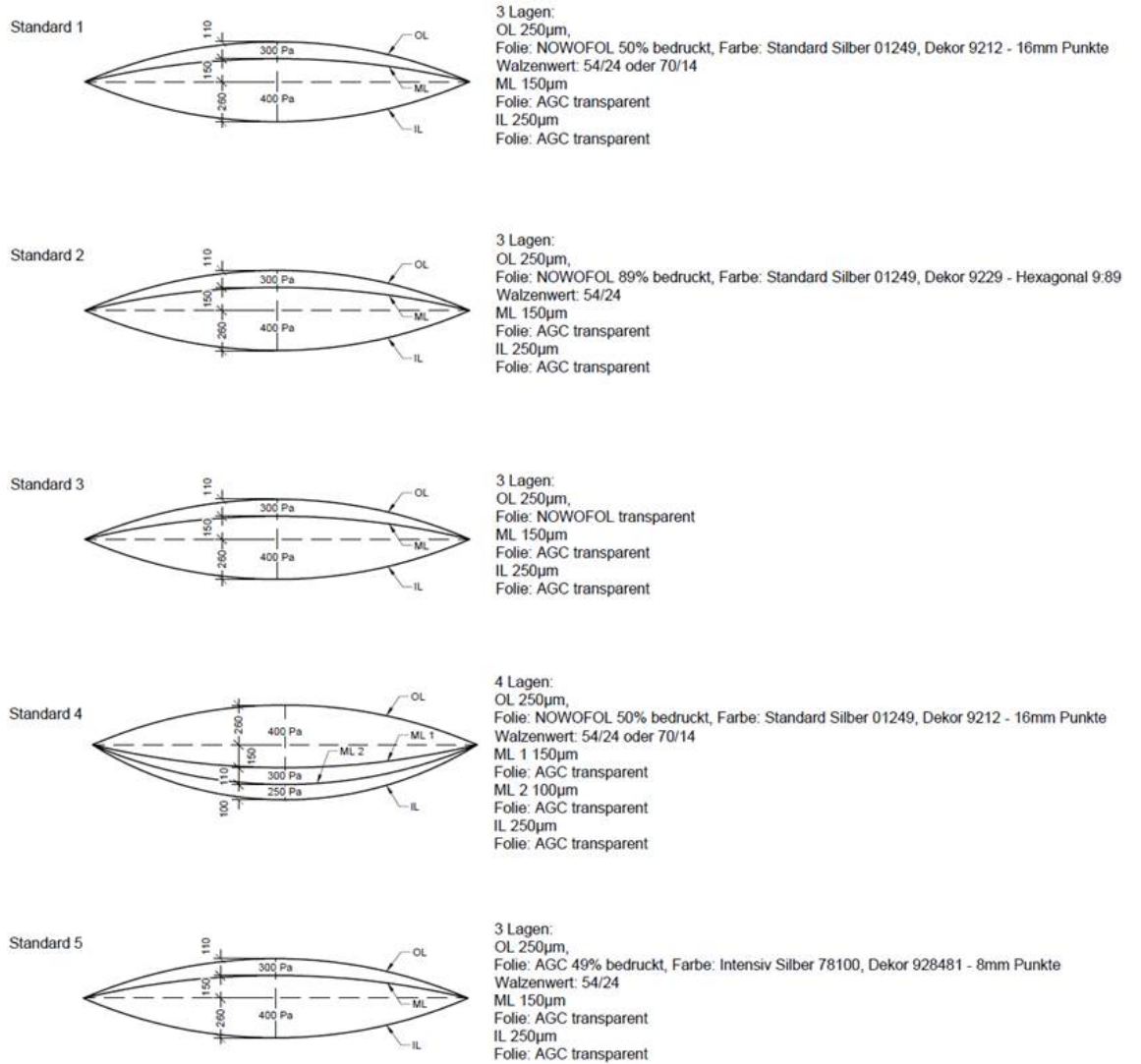


Bild 13:  
 Membran-Prüflinge.

Tabelle 8:  
Aufbau der Prüflinge.

Prüfling	Obere Lage (OL)	Mittellage (ML) bzw.		Untere Lage (UL)
		Mittellage 1	Mittellage 2	
<b>1</b>	Nowofol 250 µm 50% Standard Silber 01249 Dekor 9212: 16 mm Punkte (Walzenwert 54/24 oder 70/14)	AGC 150 µm transparent		AGC 250 µm transparent
<b>2</b>	Nowofol 250 µm 89% Standard Silber 01249 Dekor 9229: Hexagonal 9:89 (Walzenwert 54/24)	AGC 150 µm transparent		AGC 250 µm transparent
<b>3</b>	Nowofol 250 µm transparent	AGC 150 µm transparent		AGC 250 µm transparent
<b>4</b>	Nowofol 250 µm 50% Standard Silber 01249 Dekor 9212: 16 mm Punkte (Walzenwert 54/24 oder 70/14)	AGC 150 µm transparent	AGC 100 µm transparent	AGC 250 µm transparent
<b>5</b>	Nowofol 250 µm 49% Intensiv Silber 78100 Dekor 928481: 8 mm Punkte (Walzenwert 54/24)	AGC 150 µm transparent		AGC 250 µm transparent

Tabelle 9:  
Gemessene strahlungsphysikalische Kenndaten der einzelnen Folien.

Folie	Farbe / Bedruckung	Seite	SOLARBEREICH						THERMISCHER BEREICH		
			Reflexion		Transmission		Absorption	Reflexion	Transmission	Emission	
			$\rho_v$ [-] 380 nm – 780 nm	$\rho_e$ [-] 300 nm – 2.500 nm	$\tau_v$ [-] 380 nm – 780 nm	$\tau_e$ [-] 300 nm – 2.500 nm	$\alpha_e$ [-] 300 nm – 2.500 nm	R [-] 2,5 $\mu\text{m}$ – 50 $\mu\text{m}$	T [-] 2,5 $\mu\text{m}$ – 50 $\mu\text{m}$	$\epsilon$ [-] 2,5 $\mu\text{m}$ – 50 $\mu\text{m}$	
AGC 100 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,06	0,06	0,93	0,94	0,00	0,05	0,21	0,74	
AGC 150 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,07	0,07	0,92	0,93	0,00	0,05	0,14	0,81	
AGC 250 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,08	0,08	0,90	0,91	0,01	0,04	0,07	0,89	
<u>Nowofol</u> 250 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,09	0,08	0,89	0,90	0,02	0,04	0,07	0,89	
<u>Nowofol</u> 250 $\mu\text{m}$	Standard Silber 01249	a (bedruckt)	0,24	0,24	0,66	0,67	0,09	0,20	0,05	0,75	
	50% Dekor 9212	b (Rückseite)	0,23	0,23							
<u>Nowofol</u> 250 $\mu\text{m}$	Standard Silber 01249	a (bedruckt)	0,37	0,36	0,48	0,48	0,16	0,32	0,04	0,64	
	89% Dekor 9229	b (Rückseite)	0,35	0,35							
<u>Nowofol</u> 250 $\mu\text{m}$	Intensiv Silber 78100	a (bedruckt)	0,30	0,30	0,53	0,54	0,16	0,23	0,04	0,73	
	49% Dekor 928481	b (Rückseite)	0,28	0,28							

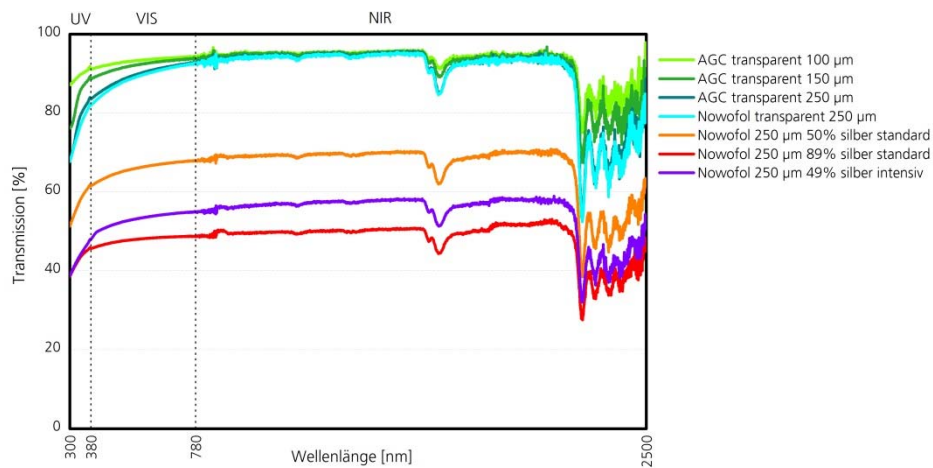


Bild 14:  
Spektrale Transmission der einzelnen Folien.

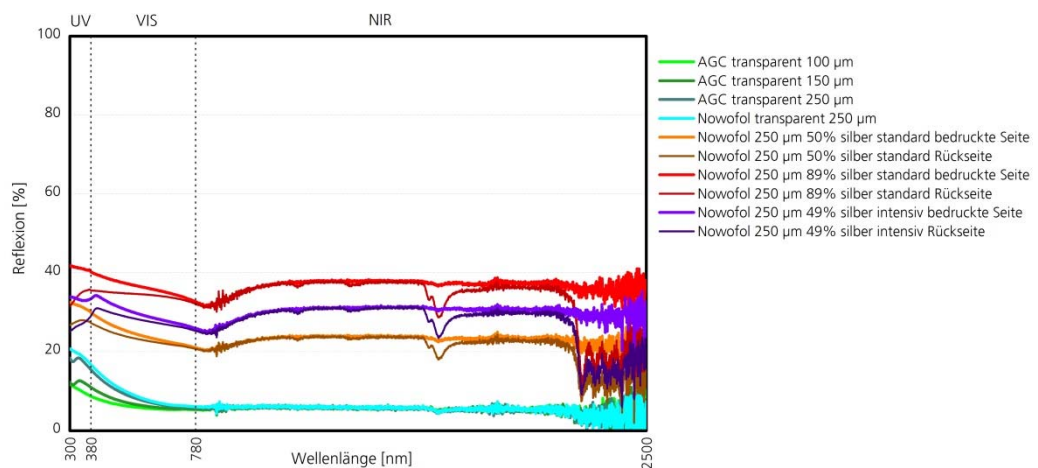


Bild 15:  
Spektrale Reflexion der einzelnen Folien.

## Randbedingungen nach DIN EN 13363 Teil 2

Es gelten zwei Gruppen von Randbedingungen für senkrechte Anordnung der Verglasung und der Sonnenschutzvorrichtung (Bild 16).

### 1) Referenzbedingungen

Diese Randbedingungen entsprechen den grundsätzlichen Annahmen von EN 410. Sie müssen für Vergleiche von Produkten und für Berechnungen der

durchschnittlichen solaren Einstrahlung während der Heizperiode herangezogen werden.

## 2) Sommerbedingungen

Diese Randbedingungen sind für extremere Bedingungen repräsentativ. Sie sind für Bewertungen der Behaglichkeit und der Kühllast heranzuziehen.

<b>Referenzbedingungen</b>			
<u>außen</u>			
Lufttemperatur	$T_e$		278 K (5 °C)
Strahlungstemperatur <sup>4)</sup>	$T_{r,e}$		278 K (5 °C)
Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient <sup>5)</sup>	$h_{c,e}$		18 W/(m <sup>2</sup> K)
Solare Strahlungsintensität	$E_s$		300 W/m <sup>2</sup>
<u>innen</u>			
Lufttemperatur	$T_i$		293 K (20 °C)
Strahlungstemperatur	$T_{r,i}$		293 K (20 °C)
Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient <sup>6)</sup>	$h_{c,i}$		3,6 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>Sommerliche Bedingungen</b>			
<u>außen</u>			
Lufttemperatur	$T_e$		25 °C
Strahlungstemperatur <sup>4)</sup>	$T_{r,e}$		25 °C
Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient <sup>7)</sup>	$h_{c,e}$		8 W/(m <sup>2</sup> K)
Solare Strahlungsintensität	$E_s$		500 W/m <sup>2</sup>
<u>innen</u>			
Lufttemperatur	$T_i$		25 °C
Strahlungstemperatur	$T_{r,i}$		25 °C
Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient <sup>8)</sup>	$h_{c,i}$		2,5 W/(m <sup>2</sup> K)

Bild 16:  
Referenz- und sommerliche Bedingungen nach DIN EN 13363 Teil 2.

Zugrunde gelegte Annahmen für die Berechnung:

- Referenzbedingungen
- senkrechter Einbau
- Luftschicht 80 mm
- planparallele Anordnung

Die Ergebnisse für die Prüflinge 1 bis 5 sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10:  
Ergebnisse nach DIN EN 13363 Teil 2.

Prüfling	Aufbau	Lichttransmission	Direkter Strahlungstransmissionsgrad	Gesamtenergie-durchlassgrad
		$\tau_v$ [-]	$\tau_e$ [-]	g [-]
1	Nowofol 250 $\mu\text{m}$ 50% Standard Silber AGC 150 $\mu\text{m}$ transparent AGC 250 $\mu\text{m}$ transparent	0,57	0,58	0,61
2	Nowofol 250 $\mu\text{m}$ 89% Standard Silber AGC 150 $\mu\text{m}$ transparent AGC 250 $\mu\text{m}$ transparent	0,42	0,43	0,46
3	Nowofol 250 $\mu\text{m}$ transparent AGC 150 $\mu\text{m}$ transparent AGC 250 $\mu\text{m}$ transparent	0,75	0,77	0,79
4	Nowofol 250 $\mu\text{m}$ 50% Standard Silber AGC 150 $\mu\text{m}$ transparent AGC 100 $\mu\text{m}$ transparent AGC 250 $\mu\text{m}$ transparent	0,54	0,56	0,58
5	Nowofol 250 $\mu\text{m}$ 49% Intensiv Silber AGC 150 $\mu\text{m}$ transparent AGC 250 $\mu\text{m}$ transparent	0,46	0,48	0,51

### 2.2.3 Kalorimetrisches Mess- und Prüfverfahren

Beim kalorimetrischen Messprinzip wird in der Regel der gesamte Prüfling bewertet. Bei klassischen Messungen, v.a. bei In-situ Messungen, wird die relevante Größe direkt am Prüfling aber nur lokal an einzelnen, repräsentativen Sensorpositionen erfasst. Soll eine Messgröße direkt am Prüfling gemessen werden, muss auch der Sensor selbst direkt am Prüfling befestigt werden. Bei transparenten oder transluzenten Prüflingen stellt sich hier in der Regel das Problem, dass die strahlungsphysikalischen Eigenschaften des Sensors vollkommen anders sind als die des Prüflings, wodurch die Messergebnisse dieses Sensors maßgeblich beeinflusst werden. So wird sich ein opaker Temperaturfühler, der auf eine Verglasung aufgeklebt ist bei Sonneneinstrahlung wesentlich stärker aufheizen als das Glas selbst. Die Kalorimetrie ermöglicht ein zuverlässiges Erfassen von Zwischenschicht-Effekten wie z.B. Mehrfachreflexionen zwischen den verschiedenen Schichten eines mehrlagig bedruckten Glasaufbaus oder



zwischen Verglasung und den schräg stehenden Lamellen eines Sonnenschutzes. Auch sind bei einer kalorimetrischen Messung die gewonnenen Messwerte nicht nur lokal an bestimmten Positionen gültig sondern sie sind repräsentativ für den gesamten Prüfling. Sie stellen eine gesamtheitliche, messtechnische Bewertung dar. Diese Eigenschaft erlaubt es, beliebig inhomogene Prüflinge zu vermessen. Beispiele hierfür sind inhomogen bedruckte Verglasungen oder Bauteile, die über ihre Fläche variierende Dicken aufweisen, wie es bei Membrankissen der Fall ist. Die Umsetzung der kalorimetrischen Messung, wie beim Prüfstand des Fraunhofer IBP durchgeführt, erlaubt nicht nur eine flächige Messung, sondern erfasst den gesamten Prüfling. Durch die Ausbildung der entsprechenden Einbausituation kann zudem festgelegt werden, ob der umlaufende Rahmen eines Prüflings Teil der Messaufgabe sein soll oder ob er nicht in die Bewertung eingehen soll.

### **Funktionsprinzip des Fassaden- und Dachprüfstands**

Der kalorimetrische Fassaden- und Dachprüfstand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP besteht im Wesentlichen aus der Messbox, die um 90 ° neigbar und um annähernd 360 ° drehbar ist. Im Kellerraum unter der Messbox ist sowohl die Versorgungs- als auch die Mess-, Steuer- und Regeltechnik untergebracht.

Die Messbox, die in Bild 17 dargestellt ist, besitzt an ihrer Frontseite einen abklappbaren Rahmen, in den die Prüflinge montiert werden. Die restlichen fünf Umschließungsflächen der Box sind stark gedämmt und mittels eines wasserführenden Absorbers adiabatisch ausgebildet (Adiabatabsorber). Adiabatisch bedeutet, dass es keine Wärmeströme aus der Prüfkammer durch das Bauteil nach außen gibt. Dies wird dadurch erreicht, dass an dem Adiabatabsorber im Inneren der Dämmebene der Umschließungsflächen dieselbe Temperatur eingestellt wird wie in der Prüfkammer. An den Innenflächen der Messbox befinden sich die fünf Messabsorber, die zusammen mit der Luftkonditionierung die Prüfkammer heizen oder kühlen können.

Dabei werden die aufgewendeten Energiemengen messtechnisch erfasst. Die im Kellerraum unter der Messbox untergebrachte Versorgungstechnik besteht im Wesentlichen aus den Antriebskomponenten, die das Drehen und Neigen der Messbox erlauben, der hydraulischen Versorgung der verschiedenen Absorber der Prüfbox inklusive ihrer magneto-induktiven Durchflussmesser und den Schaltschränken der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR-Technik).



Bild 17:  
Messbox des kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstands mit einem pneumatisch gestützten, zweilagigen ETFE-Membrankissen in der Prüflingsöffnung.

### Umschließungsflächen

Aufgrund der Geometrie des Prüfstandes beträgt das Verhältnis von Umschließungsflächen und Größe des Prüflings etwa eins zu sieben. Folglich steht den Wärmeströmen durch die Umschließungsflächen mindestens siebenmal so viel Übertragungsfläche zur Verfügung wie den zu messenden Energieströmen durch den Prüfling. Diese Wärmeströme durch die Umschließungsflächen sind bei der Verwendung eines kalorimetrischen Messprinzips, wie es in diesem Abschnitt beschrieben ist, unerwünscht, da sie nicht von den Wärmeströmen durch den Prüfling zu separieren sind. Um diese Wärmeströme zu minimieren, sind im Inneren der Umschließungsflächen wasserführende Adiabatabsorber platziert, wie dem schematischen Aufbau in Bild 18 entnommen werden kann. Der Aufbau beginnt auf der rechten Seite der Darstellung mit der Hüll- und Tragkonstruktion. Weiter zum Inneren der Prüfkammer befindet sich die Dämmebene mit ihrem mittig angeordneten Adiabatabsorber. Die innerste Ebene der Konstruktion wird von den Messabsorbern gebildet. Eine Einschränkung des umgesetzten Adiabatsystems ist die Tatsache, dass alle fünf Adiabatabsorber nur mit einer einzigen Vorlauftemperatur angesteuert werden können.

Diese Absorber dienen dem Zweck, die Wärmeströme zwischen den Messabsorbern und der Adiabatebene durch eine entsprechende Temperatureinstellung auf null zu regeln. Hierfür sind zwei Regelszenarien denkbar. Die Adiabatabsorber können auf den Mittelwert der Vor- und der Rücklauftemperaturen aller Messabsorber eingestellt werden. Hierdurch wird die Entstehung einer Temperaturdifferenz zwischen dem Prüfkammer-Inneren und dem Inneren der Umschließungsflächen-Konstruktion vermieden. Ohne Temperaturdifferenz entstehen keine Wärmeströme. Alternativ sind zwischen der Mess- und der Adiabatabsorber-Ebene Wärmefluss-scheiben in der Dämmung installiert. Damit können die Adiabatabsorber so geregelt werden, dass der mittlere Wärmestrom durch diese Wärmefluss-scheiben gleich null wird. Welche der beiden beschriebenen Regelstrategien für die Adiabatabsorber zielführend ist, wird in Voruntersuchungen geklärt.

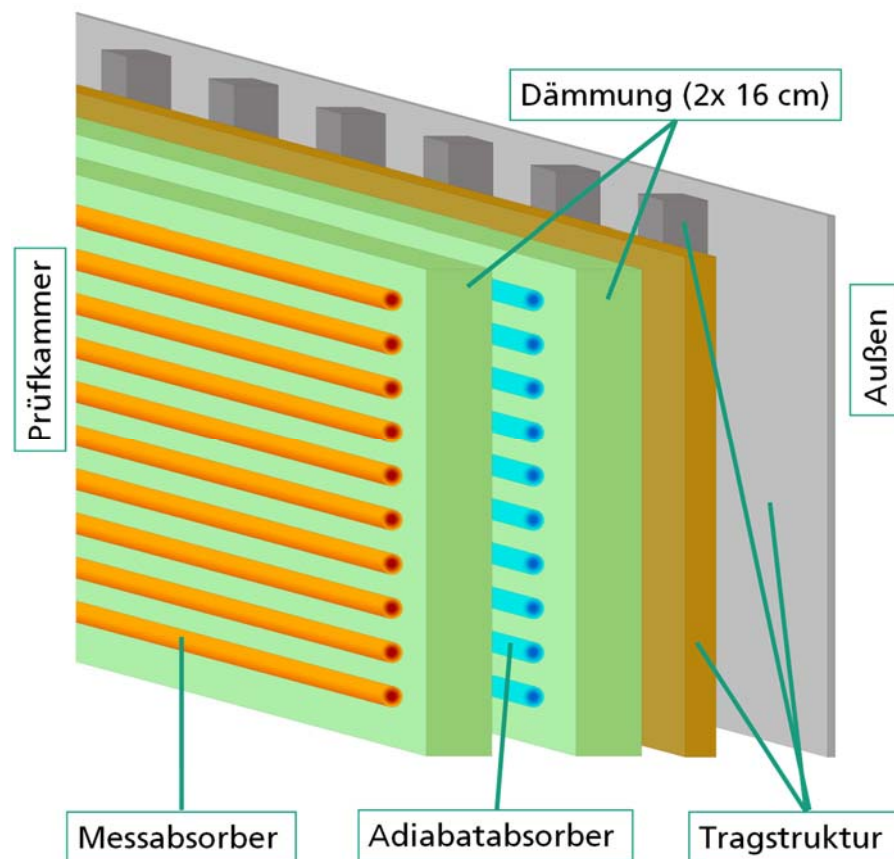


Bild 18:  
Schematischer Aufbau der Umschließungsflächen der Prüfbox bestehend aus der Hüll- und Tragkonstruktion, den Dämmebenen und den Adiat- und Messabsorbern.

## Konditionierungseinrichtungen

Prüfkammerseitig tauscht der Prüfling über zwei Mechanismen Energie aus. Dies ist zum einen der konvektive Wärmeaustausch mit der Prüfkammerluft, welcher vor allem durch die Lufttemperatur in der Prüfkammer bestimmt wird. Der zweite Mechanismus ist der langwellige Strahlungsaustausch mit den Oberflächen der Messabsorber. Dieser Strahlungsaustausch hängt vor allem von den Oberflächentemperaturen der Messabsorber ab. Um den Wärmeaustausch durch diese beiden Mechanismen bestimmen zu können, werden sowohl die Luft- als auch die Oberflächentemperaturen in der Prüfkammer kontrolliert.

Alle fünf Messabsorber werden zusammen mit dem Luftwärmetauscher mit derselben, einstellbaren Vorlauftemperatur versorgt. Die thermische Leistung der Absorber, und damit deren Temperatur, werden für jeden Absorberkreis einzeln über ein Drosselventil geregelt. Die sich real einstellenden Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauftemperaturen in den Heiz-/Kühlflächen müssen in Vorversuchen ermittelt werden. Es gilt jedoch, dass die Oberflächentemperaturen der Messabsorber möglichst gleichmäßig sein sollten, damit der Austausch der Wärmestrahlung so gleichmäßig wie möglich ist. Die Gleichmäßigkeit der Absorbentemperaturen ist nicht nur von der Höhe der Gesamtspreizung abhängig, sondern ebenfalls vom Konstruktionsprinzip der Absorber. Werden die Absorber nach dem normalen Tichelmann-Prinzip [13] ausgebildet, herrscht an einer Seite die Vorlauf- und an der entgegengesetzten Seite die Rücklauftemperatur, was dem maximal möglichen Temperaturunterschied entspricht. Das normale Tichelmann-Prinzip befördert den Wärmeträger wie einen Kamm in parallelen Leitungen vom Vor- zum Rücklauf, wie in Bild 19 links zu erkennen ist. An einer Seite des Absorbers entspricht die Absorber-Oberflächentemperatur der Vorlauftemperatur, an der gegenüberliegenden Seite der Rücklauftemperatur. Daraus resultiert das erwähnte, starke Temperaturgefälle zwischen Vor- und Rücklaufseite. Hieraus würde ein ungleichmäßiger, langwelliger Strahlungsaustausch der Messabsorber mit dem Prüfling resultieren. Eine Mäanderverlegung, wie sie beispielsweise oft bei Fußbodenheizungen eingesetzt wird, löst das Problem der großen Temperaturspreizung im Absorber. Wegen der vielen benötigten Bogensegmente ist diese Verlegungsmethode mit starren Kupferrohren jedoch sehr aufwendig auszuführen. Als Lösung dieses Problems sind alle Absorber des Prüfstands nach einem doppelten Tichelmann-Prinzip aufgebaut um eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung über ihr Fläche zu gewährleisten. Mithilfe des doppelten Tichelmann-Prinzips werden quasi zwei Register-„Kämme“ ineinander geschoben und thermisch verbunden, wodurch eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Absorber bei der ausschließlichen Verwendung gerader Rohe gewährleistet ist. Rechts in Bild 19 ist das doppelte Tichelmann-Prinzip skizziert.

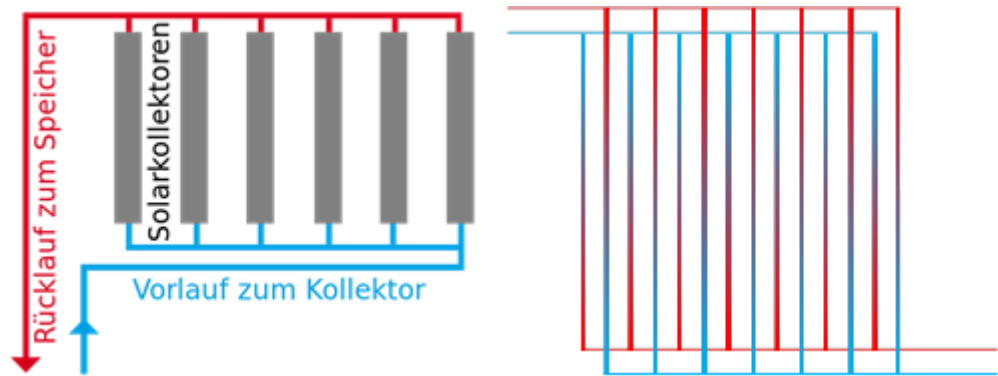


Bild 19:

Links: Schematische Zeichnung der normalen Tichelmann-Leitungsführung für einen Solarkollektor. [14]

Rechts: Schematische Zeichnung des doppelten Tichelmann-Prinzips.

Die zweite Temperatur in der Prüfkammer, die aktiv geregelt werden kann, ist die Lufttemperatur. Wie in Bild 20 erkannt werden kann, befinden sich hinter dem Rückwand-Messabsorber ein Wasser-Luft-Wärmetauscher mit Heiz- und Kühlfunktion und ein Querstromlüfter. Bei einem Querstromlüfter bzw. Querstromventilator handelt es sich um eine Ventilator-Bauweise, die sich durch einen flachen Aufbau und eine großes Luftvolumen bei einer kleinen elektrischen Leistungsaufnahme auszeichnet. Die Luft wird an der Vorderkante des Boden-Messabsorbers angesaugt, strömt hinter den Messabsorbern von Boden, Rückwand und Decke, bis sie an der Vorderkante des Decken-Messabsorbers wieder austritt. Der Motor des Querstromlüfters ist mit einer wasserführenden Kühlleitung umwickelt, die von demselben hydraulischen Kreis gespeist wird wie der Luft-Wärmetauscher. Die elektrische Leistungsaufnahme des Motors wird messtechnisch erfasst. Durch diese Kombination aus der Erfassung des Wärmeeintrags und der lokalen Wiederabführung muss die Abwärme des Lüfter-Motors nicht in die Prüfkammer mit ihrer thermischen Speicherfähigkeit eingebracht, sondern kann direkt mit der erfassten Leistung des hydraulischen Luft-Wärmetauscher-Kreises verrechnet werden. Die thermische Leistung der hydraulischen Kreise wird einzeln für jeden der fünf Messabsorber, den Luft-Wärmetauscher und alle Adiabatabsorber zusammen erfasst.

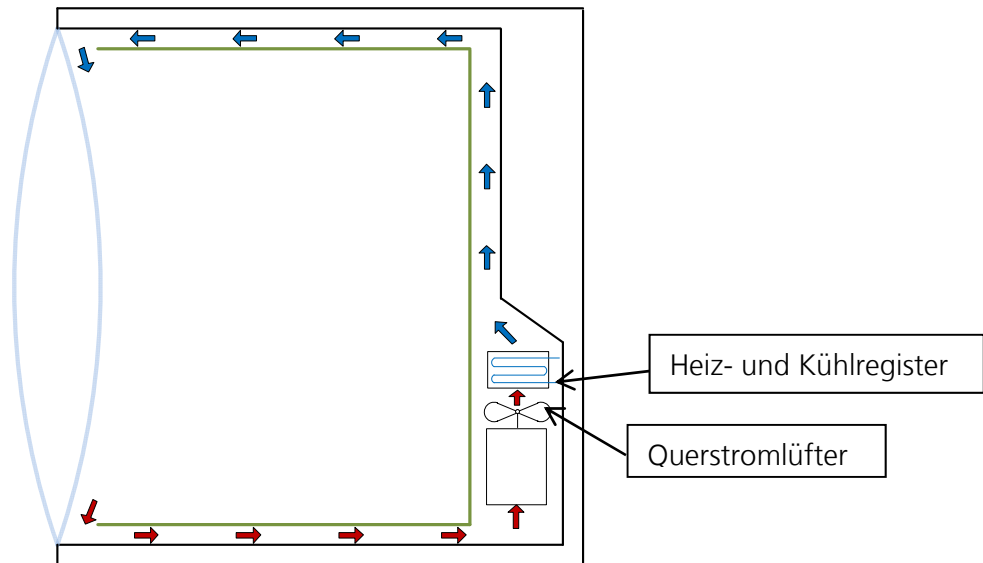


Bild 20:  
Schematische Darstellung der Komponenten der Prüfkammer-Lufttemperatur-Regelung bestehend aus den Kanälen zur Luftführung mit Ein- und Auslässen, dem Querstromlüfter und dem Heiz- und Kühlregister (Luftabsorber).

#### Hydraulische Versorgung der Messabsorber sowie des Adiabatabsorbers

Bild 21 zeigt das anlagentechnische Schema der Versorgungstechnik des Prüfstands. Die Adiabatabsorber bilden einen einzelnen Regelkreis, in dem ausschließlich die Vorlauftemperatur aller fünf Absorber zusammen mittels einer Rücklaufbeimischung eingestellt werden kann.

Parallel an die Medienversorgung ist der zweite Kreis für die Messabsorber (inklusive des Luftwärmetauschers) angeschlossen, deren gemeinsame Vorlauftemperatur ebenfalls über eine Rücklaufbeimischung eingestellt werden kann. Der Messabsorberkreis weist zwei zusätzliche Stellgliedgruppen auf. Die Leistung der einzelnen Messabsorber kann durch die Begrenzung der Durchflussmenge geregelt werden. Diese Einflussnahme auf die Leistung der einzelnen Absorber ist erforderlich, um die mit unterschiedlicher Solarstrahlungsintensität beaufschlagten Messabsorber auf eine identische Oberflächentemperatur regeln zu können.

Des Weiteren können die einzelnen Messabsorber zwischen dem Beginn des Absorbers und der Temperaturmessstelle automatisiert abgesperrt werden. In diesem Fall wird zwischen den Absperrungen und den Temperaturmessstellen ein Bypass-Ventil geöffnet, so dass der Wärmeträger nahezu direkt von der Vor- zur Rücklauftemperatur-Messstelle strömt, wie es in Bild 22 dargestellt ist. Tritt während dieser hydraulischen Konfiguration ein signifikanter Temperaturunterschied zwischen den beiden Messstellen auf, kann auf eine aufgetretene Drift in einem der beiden PT100-Tauchfühler geschlossen werden. In diesem

Fall wird der gemessene Fehler bei der anschließenden Versuchsdurchführung korrigiert. Der Luftwärmetauscher verfügt über die gleichen Regelmöglichkeiten wie die fünf Messabsorber. Direkt am Luftwärmetauscher ist zusätzlich ein Ultraschall-Verdunster eingebaut, der es ermöglicht, die Luft innerhalb der Prüfkammer zu befeuchten. Eine Entfeuchtung kann durch das Einblasen getrockneter Luft in die Prüfkammer erfolgen.

Je nach Heiz- oder Kühlbedarf, werden der Adiabat- und der Messkreis entweder dem Wärme- oder dem Kältespeicher zugeschaltet. Der Wärmespeicher verwendet als Wärmequelle einen integrierten elektrischen Heizstab mit einer Leistung von 6 kW. Die Leistung des Heizstabes wird mittels eines Phasenanschnittdimmers durch das MSR-System konstant auf die gewünschte Temperatur geregelt. Der Kältespeicher wird von einer Kompressionskältemaschine versorgt, die mittels integriertem Zweipunktregler eine Minimaltemperatur von 4 °C mit einer Genauigkeit von  $\pm 2$  K halten kann. Die Abwärme der Kältemaschine wird über Erdsonden abgeführt.

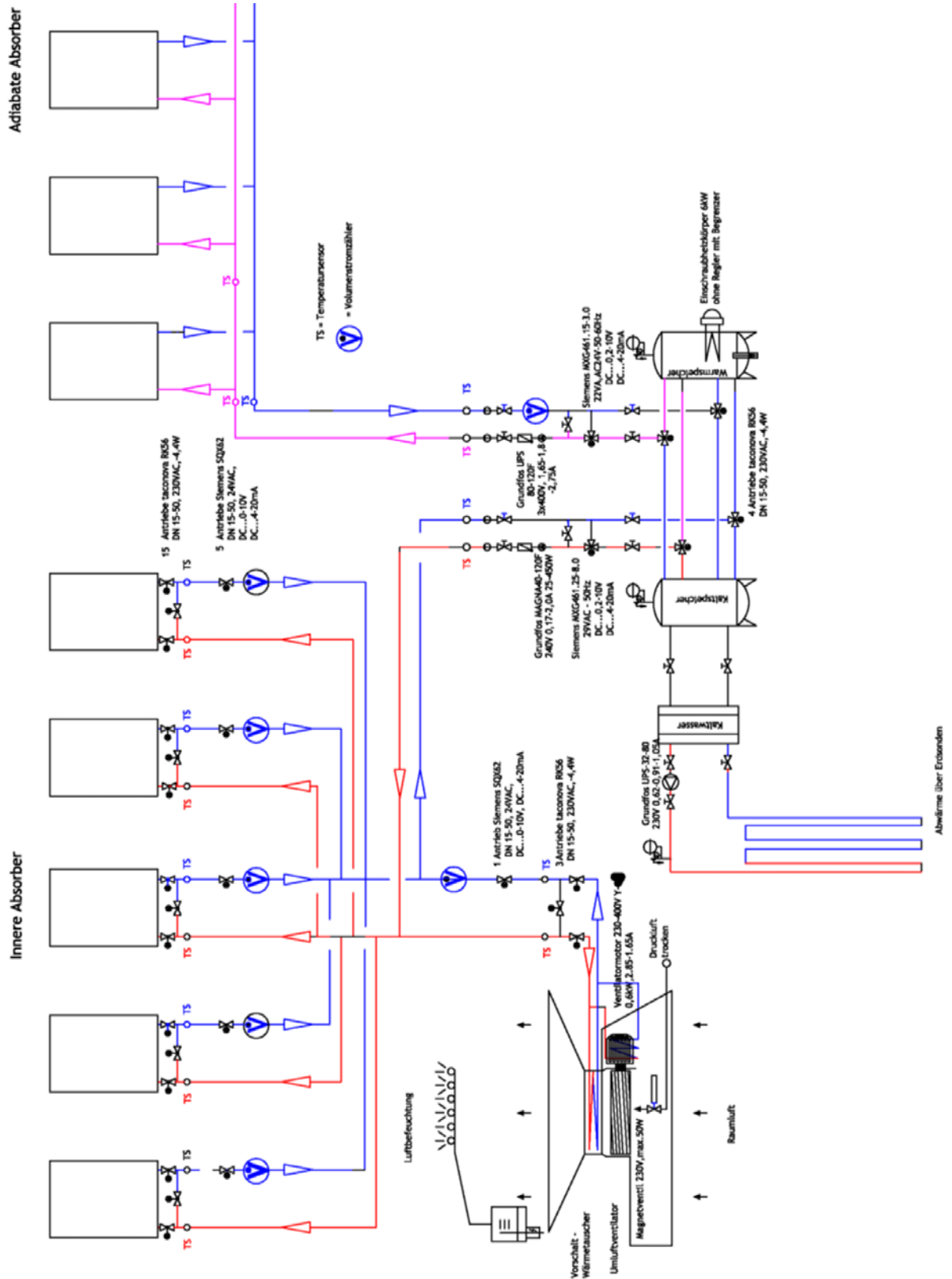


Bild 21:  
Hydraulisches Schema der Versorgungstechnik des kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstands.



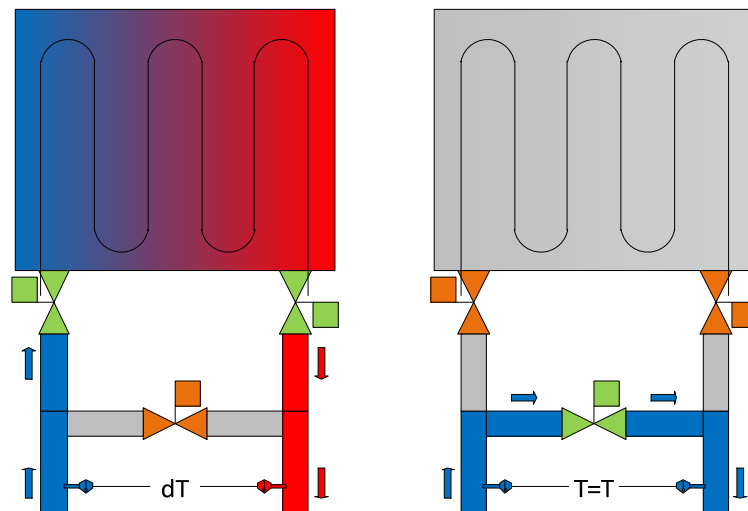


Bild 22:  
Schematische Darstellung der Kurzschlusskalibrierung der Messabsorber: Links: Messbetrieb. Rechts: Kalibrierbetrieb.

In Bild 23 können zwei Montagedetails von Prüflingen erkannt werden. Um die Luftdichtheit der Prüfkammer zu gewährleisten, muss schließlich noch die Fuge zwischen Adapterplatte und Frontrahmen abgedichtet werden. Die verhältnismäßig dünne Adapterplatte gehört nicht mehr zum Prüfling und hat im Vergleich zur restlichen Prüfkammer eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit. Um die unerwünschten Wärmeströme durch die Adapterplatte zu minimieren, wird diese innenseitig mit einem hochdämmenden und flexiblen Material wie z.B. Mineralwolle oder PU-Dämschaum hinterfüllt.

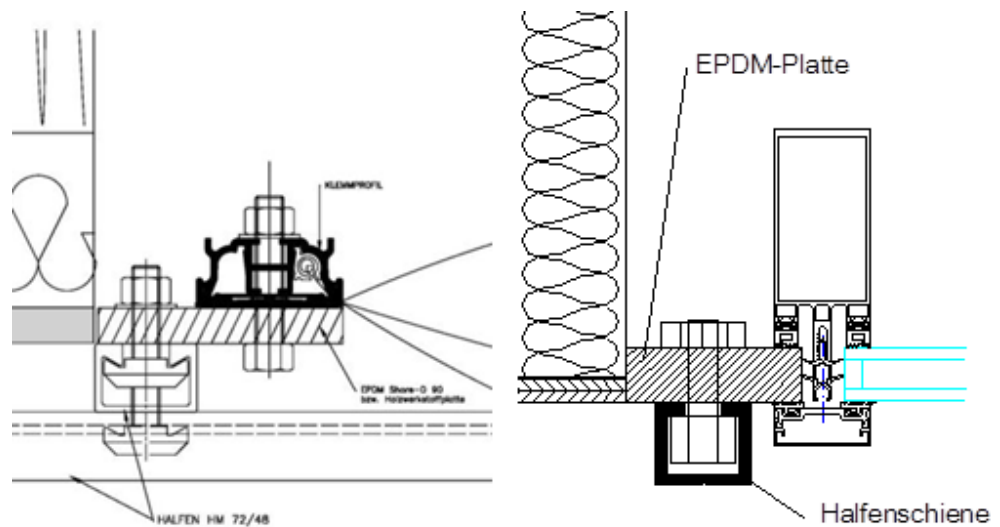


Bild 23:  
Montagedetails eines Membran-Prüflings (links) und einer Pfosten-Riegel-Fassade als Prüfling (rechts) in die Prüflingsaufnahme des Kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstands inklusive der Adapterteile und Verschraubungen.

#### Bewegungsmechanismus der Prüfbox

Die Prüfbox ist um 360 ° dreh- und von 0 ° - 90 ° neigbar. Zur Gewährleistung der Drehbarkeit ist die neigbare Prüfbox auf einer mit einem Zahnkranz ausgestatteten Plattform montiert, deren elektrischer Antrieb im darunterliegenden Keller angebracht ist. Über zwei Gelenke und zwei Hydraulikzylinder, welche die Kippbarkeit gewährleisten, ist die Prüfbox mit dieser Plattform verbunden. Bild 24 zeigt den Prüfstand in geneigtem Zustand.



Bild 24:  
Kalorimetrischer Fassaden- und Dachprüfstand in geneigtem Zustand.

Um die elektrischen, hydraulischen und pneumatischen Versorgungsleitungen aus der Technikzentrale im Keller in die bewegliche Prüfbox hinein zu führen, wurde eine kreisförmige Leitungsdurchführung entwickelt. Dieses System besteht aus einer Schablone (Bild 25, links) an der Rückwand der Prüfkammer, welche die hydraulischen Leitungen in einem inneren Ring fixiert und einem äußeren Kranz, der für die elektrischen Leitungen reserviert ist. Alle Leitungen sind ausschließlich an dieser Schablone befestigt. So können sie sich beim Zurückneigen der Prüfkammer in die Durchführung zum Keller hineinschieben und wieder herausziehen. Die runde Form des kompakten Leitungsbündels ermöglicht weiterhin die ungehinderte Drehbewegung. Im Keller hängen alle Leitungen aus der Deckendurchführung in einer großen Schlaufe durch bis zu ihren Anschlussstellen, die sich ebenfalls wieder an der Kellerdecke befinden (Bild 25, rechts).



Bild 25:

Links: Fixierungs-Schablone am Austritt der Leitungen aus der Prüfbox während der Montage. Rechts: Frei hängende Leitungs-Schleifen zwischen der Deckendurchführung und den Anschlussstellen an der Kellerdecke.

### Druckluftversorgung

Der kalorimetrische Fassaden- und Dachprüfstand ist an das Druckluftnetz des Freilandversuchsgeländes am Fraunhofer IBP angeschlossen. Die Druckluft am Prüfstand wird für die folgenden Anwendungsfälle benötigt:

- Am oberen Ende der Prüfbox befindet sich ein Pneumatik-Zylinder der beim Öffnen der Frontklappe den oberen Teil der Frontklappe nach außen drückt und dabei eine Seilwinde abwickelt, damit sich die Frontklappe öffnen kann.

- Das Innere der Prüfkammer kann mit Druckluft gespült werden, indem diese in den Querstromlüfter vor dem Luftwärmetauscher eingeblasen wird. Die eingeblasene Druckluft vermischt sich mit der Luft im Inneren der Prüfkammer und verdrängt einen Teil von ihr.
- Da Druckluft eine sehr niedrige Taupunkttemperatur besitzt, also sehr trocken ist, wird durch das Einblasen von Druckluft das Innere der Prüfkammer getrocknet. In Kombination mit dem vorhandenen Ultraschallbefeuchter kann somit eine vordefinierte Luftfeuchte in der Prüfbox eingestellt werden.

Die Untersuchung leichter Membrankonstruktionen ist eine zentrale Aufgabe dieses Prüfstands. Membran-Bauteile sind häufig Kissenkonstruktionen die durch einen im Inneren herrschenden Überdruck pneumatisch aufgeblasen werden. Um solche Membrankissen untersuchen zu können, ist es erforderlich, eine entsprechende Druckluftversorgung bereitzustellen. Der Prüfstand stellt an der rechten Seite der Prüfkammer zwei separat regelbare Druckluftversorgungen zur Verfügung, die in Bild 26 abgebildet sind.

Somit können 3-lagige Kissenkonstruktionen mit unterschiedlichen Positionen der Mittellage untersucht werden. Um Überdruckschäden vorzubeugen und durch einen geringeren Durchfluss die Regelung einfacher zu gestalten, sind auch diese Druckluftstränge mit Druckminderer ausgestattet. Für jede Kissenkammer kann über ein grafisches Interface der Minimal- und Maximaldruck separat eingestellt werden, der dann über einen Zweipunktregler gehalten wird. Der typische Überdruck innerhalb mehrlagiger Membrankissen liegt im Bereich zwischen 200 und 1800 Pa.



Bild 26:  
Druckluftversorgung für die Membrankissen. Aktuell ist ein zweilagiges Kissen installiert, das nur eine der beiden verfügbaren Druckluftversorgungen benötigt.

## 2.2.4 Thermographie der Membranprüflinge

Eine zentrale Besonderheit bestehender Berechnungsverfahren, die in den einschlägigen Normenwerken genutzt bzw. beschrieben werden, ist die Annahme eines eindimensionalen Wärmetransports durch das Bauteil, also einer homogenen Temperaturverteilung über die Fläche des Bauteils. Es wird also damit vereinfachend festgelegt, dass der Wärmestrom, bei entsprechender Temperaturdifferenz, linear vom Innenraum nach außen durch das Bauteil verläuft. Um beurteilen zu können, inwieweit diese Voraussetzungen erfüllt werden, wurden Oberflächentemperaturmessungen der Prüfkörper mittels Infrarot-Thermografie durchgeführt. Die Bild 27 und weitere Bilder bestätigen, eine nahezu homogene Temperaturverteilung über die Prüflingsoberfläche, und somit einen homogenen Wärmestrom durch das gesamte Bauteil.

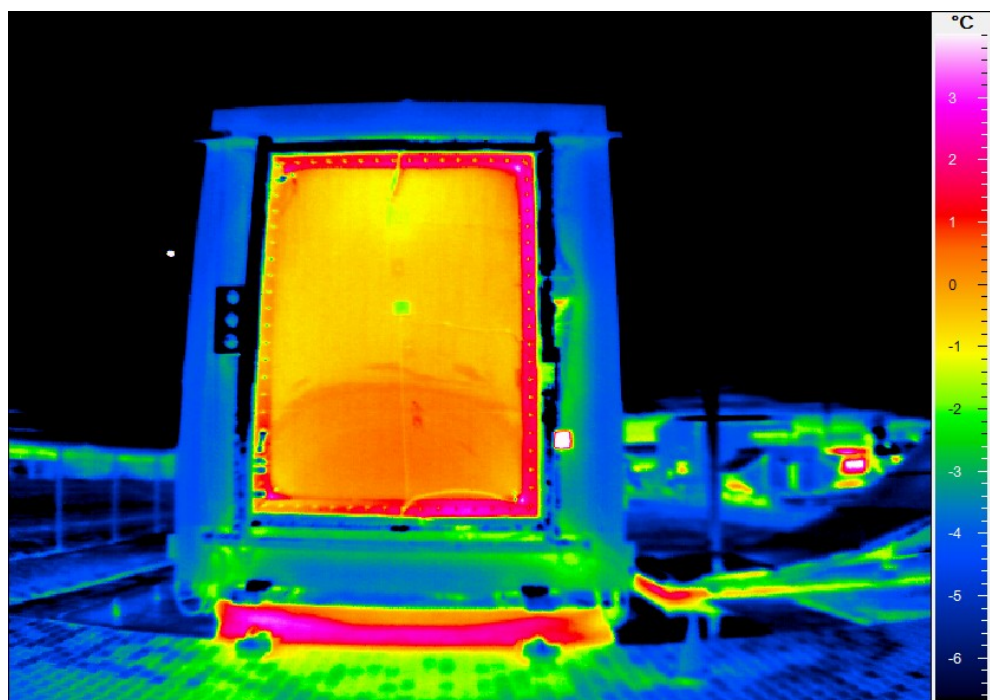


Bild 27:  
Thermographieaufnahme des 4-lagigen Membranprüflings vom 14.03.2017.

Die Auswertung von Bild 28 zeigt lediglich einen Temperaturanstieg der Oberfläche in den letzten 2-3 cm vor dem Keder und dem Randprofil. Diese Fläche stellt jedoch nur ca. 2 % der gesamten Bauteiloberfläche dar und hat somit einen vernachlässigbaren Einfluss auf den U-Wert.

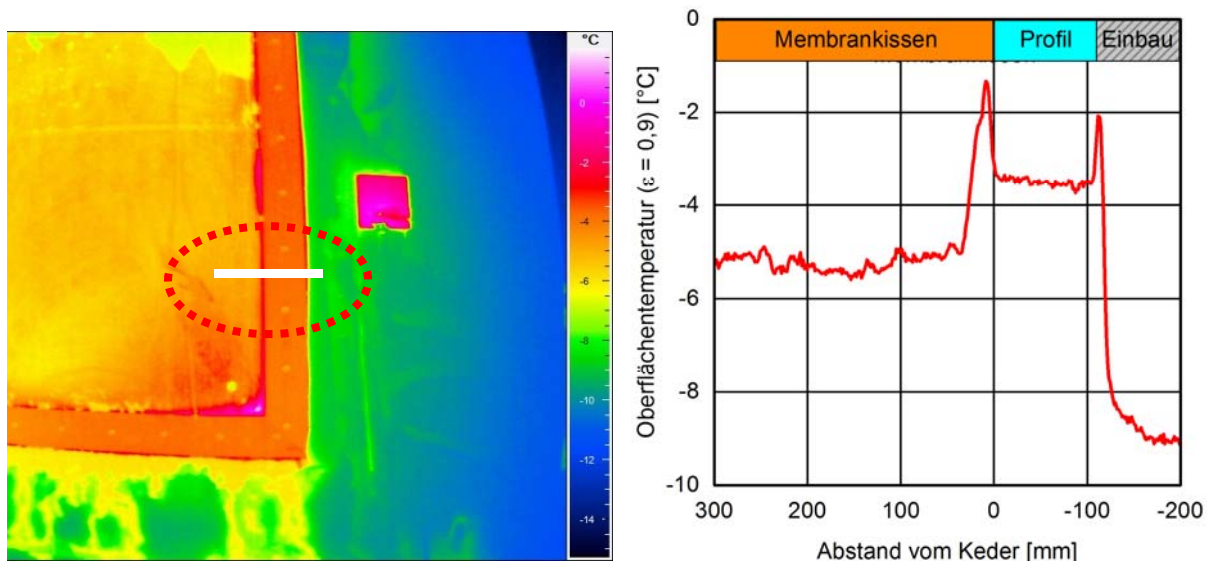


Bild 28:

Links: Quell-Thermographiaufnahme des 2. Membranprüfling vom 11.01.2017 mit der weiß markierten Schnittlinie für das Temperaturprofil. Rechts: Temperaturprofil des Randbereichs – Die Kurve zeigt den Verlauf der Oberflächentemperatur über das Membrankissen im Abstand vom Keder.

## 2.2.5 Messtechnische Untersuchung Randverbund

Da der g-Wert ohne Temperaturdifferenz zwischen innen und außen definiert ist, haben Wärmebrücken nur einen Einfluss auf den  $U_w$ -Wert. Diese Aussage schließt nicht aus, dass eine wärmebrückenreiche Konstruktion auf Grund der stärkeren Wärmeleitung von solar erwärmten Außenoberflächen nach innen ggf. einen höheren g-Wert aufweisen wird. Wie im Weiteren erläutert, begrenzt sich der Randeinfluss der zusammenlaufenden Kissenlagen auf wenige Zentimeter. Das in Kapitel 2.2.1 beschriebene makroskopische Versuchsdesign ist nicht dafür geeignet, derartig kleine, lokal begrenzte Effekte zu detaillieren. Aus diesem Grund wird in den folgenden Betrachtungen der Rahmeneinflüsse der Anteil dieser Randeinflüsse nicht weiter betrachtet. Dies erscheint im Rahmen der hier durchgeführten Messungen gerechtfertigt, da einerseits die Rahmenbreite etwa das 3-4 fache der Breite des beidseitigen Randeinflusses beträgt und zudem die höheren Oberflächentemperaturen auf dem Rahmendekel eine höhere Wärmestromdichte als an der Kissenoberfläche andeuten (siehe Bild 29). Somit verbleibt lediglich der Rahmen bzw. das Klemmprofil in der Betrachtung der Randeinflüsse.



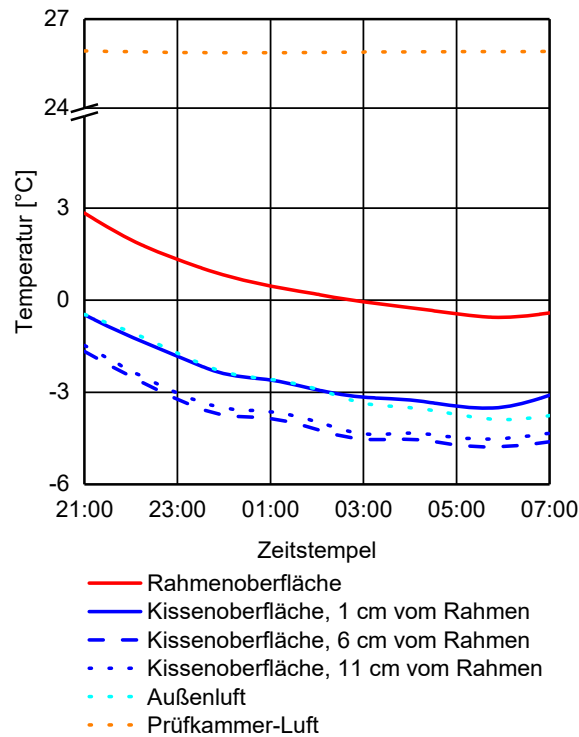


Bild 29:  
Verlauf der Oberflächentemperaturen im Randbereich des Kissens und der umgebenden Lufttemperaturen in einer beispielhaften Messnacht (10.-11.03.2017) am Beispiel des 4-lagigen Prüfkörpers MEM4.

Zur Analyse der Randeinflüsse wird zunächst mit Hilfe der Wärmebrückensoftware Flixo 7 eine zweidimensionale Wärmebrückenberechnung des Profils zur Ermittlung des  $U_f$ -Werts des Rahmens ( $U_f = U$ -Wert des Rahmens,  $U$  Frame) durchgeführt. Die Wärmebrückenberechnung zur Auswertung der Kalorimetrie (siehe Bild 30 und Bild 35) entspricht nicht einer realen Einbausituation wie sie an einem Objekt realisiert werden würde. Zur Abschätzung des realen Rahmen- und Randeinflusses wird dieses Modell dahingehend angepasst, dass eine symmetrische Situation entsteht. Zuerst wird der reine  $U_f$ -Wert des Rahmens in Bild 30 zu  $5,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  berechnet. Diese Berechnungen sind in Bild 30 dokumentiert.

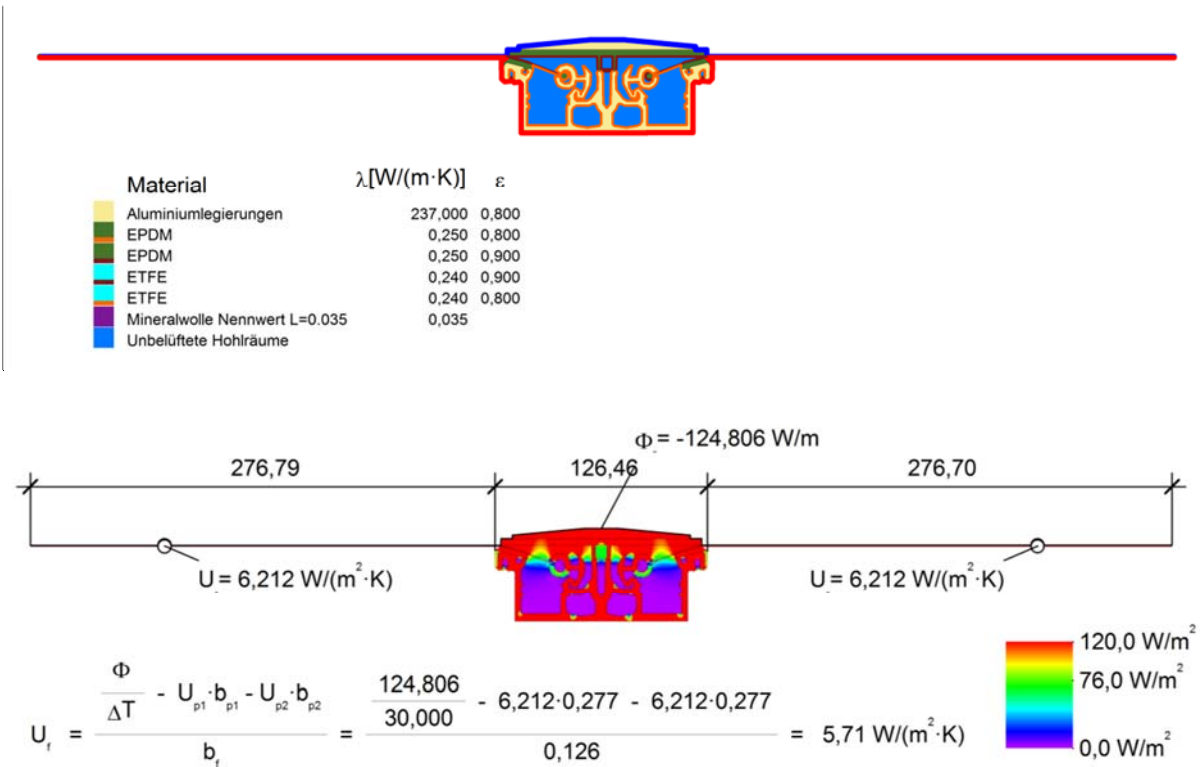


Bild 30:  
Eingabewerte der Wärmebrückenberechnung (oben) und  $U_f$ -Wert-Berechnung des Klemmprofils (unten).

Der resultierende Einfluss auf den  $U_w$ -Wert des Gesamtsystems lässt sich somit für unterschiedliche Lagenanzahlen bzw. dem  $U_g$ -Wert in Kissenmitte im Kissen und in Abhängigkeit vom Rahmenanteil darstellen (siehe Bild 31). Man kann erkennen, dass bei geringen Rahmenanteilen, wie sie im Membranbau typisch häufig realisiert werden, der Einfluss der Rahmeneffekte gering ist und mit zunehmendem Rahmenanteil steigt. Am Beispiel der im Rahmen dieses Forschungsprojekts untersuchten, nicht sehr großformatigen Membranprüflinge mit relativ hohem Rahmenanteil, ergibt sich eine Erhöhung des U-Werts eines 3-lagigen Kissens um  $0,34 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  und für ein 4-lagiges Kissen um  $0,39 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .



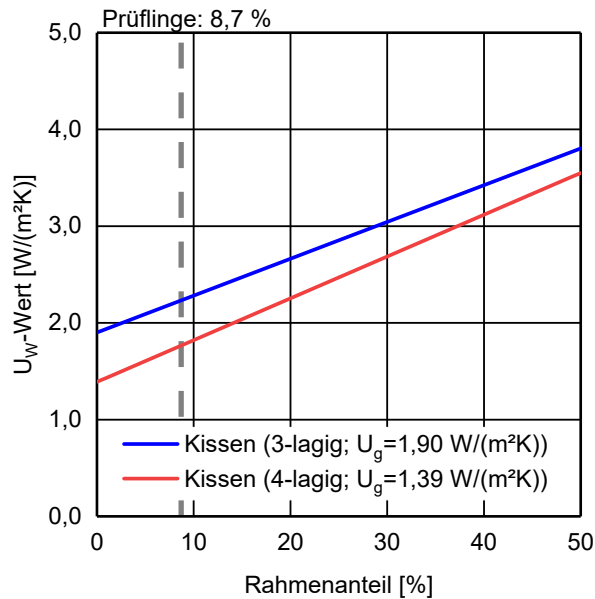


Bild 31: Darstellung des Einflusses des Rahmenanteils mit Klemmprofil und des  $U_f$ -Wert auf den  $U_w$ -Wert ein 3- und eines 4-lagigen Kissens. Die graue gestrichelte Linie markiert den Rahmenanteil der im Rahmen dieses Forschungsprojekts untersuchten Prüflinge von 8,7 %. Sehr hohe Rahmenanteile über 30% sind unüblich und nur zu Veranschaulichung mit aufgenommen.

## 2.2.6 Auswertung und Messergebnisse

### Kalibrier- und Auswertungsverfahren

Im Rahmen der am Kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand durchgeführten Messungen werden sowohl die Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ -Werte) der Prüflinge unter nächtlichen Bedingungen als auch tagsüber ihre Gesamtenergiedurchlassgrade ( $g$ -Werte) ermittelt.

Die  $U$ -Werte werden nach Gleichung (1) ermittelt. Um die  $U$ -Werte auf Standard-Randbedingungen zurückzuführen, werden die während der Messung vorliegenden Wärmeübergangskoeffizienten aus den gemessenen Randbedingungen ermittelt. Diese Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten erfolgt bei diesen Messungen in Anlehnung an ISO 9869 [15]. Bei diesem Verfahren wird die Differenz zwischen der Oberflächen- und der Ambienttemperatur durch den Wärmestrom dividiert, der an der entsprechenden Oberfläche mit Hilfe einer Wärmestromflussplatte erfasst wird. Dieses Vorgehen ist in Bild 32 schematisch dargestellt. Die durchgeführten und in Kapitel 2.2.4 beschriebenen Thermographien der Membranprüflinge zeigen, dass die Anwendung dieses Verfahrens, das von homogenen Oberflächentemperaturen ausgeht, gerechtfertigt ist.

Die räumlich stark begrenzten Randeffekte im Klemmbereich der Membranlagen bzw. der Profile können analog zur Bewertung der Rand- und Abstandshalter-Effekte bei Verglasungen bewertet werden. Die so ermittelten Wärmeübergänge werden genutzt, um die kalorimetrisch ermittelten U-Werte auf Norm-Randbedingungen zurückzuführen. Hierzu werden die modellierten Wärmeübergänge verwendet und entsprechend Gleichung (2) mit den einzelnen unkorrigierten 30-Minuten-U-Werten verrechnet [16].

Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) [W/(m²K)]:

$$U = \frac{\frac{Q}{A_p}}{(\Theta_{amb,i} - \Theta_{amb,e})} \quad (1)$$

$Q$	Wärmestrom aus Kalorimetrie	[W]
$A_p$	Prüflingsfläche	[m²]
$\Theta_{amb,i}$	Innere Ambienttemperatur	[°C]
$\Theta_{amb,e}$	Äußere Ambienttemperatur	[°C]

$$U = \frac{1}{\frac{1}{U_{raw}} - R_{s,i,mod} - R_{s,e,mod} + R_{s,i,norm} + R_{s,e,norm}} \quad (2)$$

$U$	Korrigierter, kalorimetrisch ermittelter U-Wert	[W/(m²K)]
$U_{raw}$	Kalorimetrisch ermittelter U-Wert ohne Korrektur der Wärmeübergänge	[W/(m²K)]
$R_{s,i,mod}$	Innerer Wärmeübergangswiderstand	[(m²K)/W]
$R_{s,e,mod}$	Äußerer Wärmeübergangswiderstand	[(m²K)/W]
$R_{s,i,norm}$	Normativer innerer Wärmeübergangswiderstand; $R_{s,i,norm} = 0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$	[(m²K)/W]
$R_{s,e,norm}$	Normativer äußerer Wärmeübergangswiderstand; $R_{s,e,norm} = 0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$	[(m²K)/W]

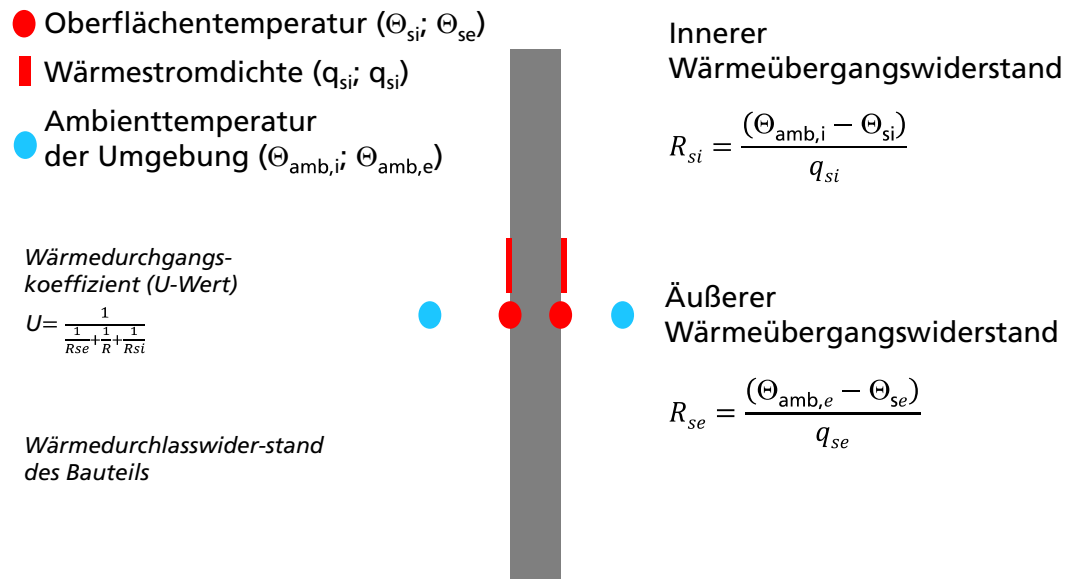


Bild 32:  
Schematische Darstellung des Vorgehens zur Ermittlung der inneren und äußeren Wärmeübergänge in Anlehnung an ISO 8969.

## Messergebnisse

Die Projektlaufzeit war nicht ausreichend lange, um jeden Kennwert jedes Prüflings mit allen Neigungen messtechnisch zu ermitteln. Aus diesem Grund wird eine Auswahl der zu messenden Prüflinge und deren Mess- und Einbausituationen getroffen, die sicherstellt, dass für die Validierung des neu entwickelten Bewertungsverfahrens die notwendigen Messpunkte zur Verfügung stehen. Diese Auswahl der zu erfassenden Messpunkte wird dynamisch während der laufenden Messungen, basierend auf den vorliegenden neuen Erkenntnissen angepasst. Aus diesem Grund wird der 1. Membranprüfling verglichen mit den anderen Prüflingen verhältnismäßig detailliert vermessen, um die hierfür notwendigen Erfahrungen zu sammeln.

Die anderen Membranprüflinge werden vor allem in Situationen vermessen, bei denen auf Grund ihrer Eigenschaften Unterschiede zum 1. Prüfling erwartet werden. Bei den drei weiteren 3-lagigen Prüflingen mit geänderter Bedruckung betrifft dies vor allem den g-Wert (veränderte Strahlungstransmission). Auf Grund der langwelligen Emissionseigenschaften der Bedruckung ist ebenfalls ein Einfluss auf den U-Wert möglich. Dieser Einfluss auf den U-Wert sollte allerdings nicht abhängig vom Einbauwinkel sein, weswegen der U-Wert der folgenden 3-lagigen Membranen nur mit einer Neigung gemessen wird. Bei dem 4-lagigen Prüfling Nr. 4 sind wiederum die Haupteinflüsse auf den U-Wert zu erwarten, weswegen bei diesem Prüfling dem U-Wert eine erhöhte Aufmerksamkeit zukommt und ein entsprechend detaillierteres Messkonzept aufgestellt wird. Die Ergebnisse der durchgeführten U-Wert-Messungen sind in Tabelle 11

dargestellt. Tabelle 12 enthält nach ISO 8969 ermittelte Vergleichswerte aus dem Mittelbereich des Kissens.

Tabelle 11:

U-Wert-Messergebnisse [ $W/(m^2K)$ ] der Membranprüflinge aus dem Kalorimeter in Abhängigkeit vom Neigungswinkel des Prüflings.

Prüflingsnummer (Nach Bild 7)	Mess- zeitraum	Neigungswinkel gegen die Horizontale [°]						
		90	75	60	45	30	15	0
1 (3-lagig; 50 %)	3.06. – 12.08.2016	1,83 $\pm 0,06$	1,53 $\pm 0,11$	1,61 $\pm 0,06$	-	1,60 $\pm 0,07$		
Vergleichswert nach ISO 6946 *		1,89 (2,03)					2,22 (2,36)	
1 - Mittellage nach Innen	26.10. – 18.12.2016	1,75 $\pm 0,05$			1,77 $\pm 0,05$	1,99 $\pm 0,05$		1,97 $\pm 0,10$
Vergleichswert nach ISO 6946 *		1,97 (2,11)					2,31 (2,45)	
2 (dicht bedruckt)	1.01. – 30.01.2017							1,88 $\pm 0,15$
Vergleichswert nach ISO 6946 *		1,81 (1,94)					2,13 (2,26)	
3 (transparent)	10.05. – 12.05.2017	1,48 $\pm 0,07$						
Vergleichswert nach ISO 6946 *		1,98 (2,11)					2,31 (2,46)	
4 (4-lagig)	04.03 - 09.04.2017		1,39 $\pm 0,06$			1,47 $\pm 0,13$		1,53 $\pm 0,11$
Vergleichswert nach ISO 6946 *		1,46 (1,54)					1,69 (1,76)	

\*: Innentemperatur 20 °C, Außentemperatur 0 °C, Windgeschwindigkeit 4 m/s  
Annahme: Folientemperatur = angrenzende Lufttemperatur

( ): Innentemperatur 30 °C, Außentemperatur 10 °C, Windgeschwindigkeit 4 m/s  
Annahme: Folientemperatur = angrenzende Lufttemperatur

Tabelle 12:

U-Wert-Messergebnisse [ $W/(m^2K)$ ] der Membranprüflinge aus der Messung der Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom Neigungswinkel des Prüflings. Messunsicherheit als einfacher Standardfehler.

Prüflingsnummer (Nach Bild 7)	Mess- zeitraum	Neigungswinkel gegen die Horizontale [°]						
		90	75	60	45	30	15	0
1 (3-lagig; 50 %)	3.06. – 12.08.2016	-	1,90 $\pm 0,10$	1,90 $\pm 0,10$	1,91 $\pm 0,10$	2,10 $\pm 0,10$		
Vergleichswert nach ISO 6946 *		1,89 (2,03)					2,22 (2,36)	
1 - Mittellage nach Innen	26.10. – 18.12.2016	1,71 $\pm 0,10$			1,80 $\pm 0,10$	2,01 $\pm 0,10$		2,03 $\pm 0,10$
Vergleichswert nach ISO 6946 *		1,97 (2,11)					2,31 (2,45)	
2 (dicht bedruckt)	1.01. – 30.01.2017							1,89 $\pm 0,1$
Vergleichswert nach ISO 6946 *		1,81 (1,94)					2,13 (2,26)	
3 (transparent)	10.05. – 12.05.2017	1,83 $\pm 0,10$						
Vergleichswert nach ISO 6946 *		1,98 (2,11)					2,31 (2,46)	
4 (4-lagig)	04.03 - 09.04.2017		1,39 $\pm 0,10$			1,51 $\pm 0,10$		1,53 $\pm 0,10$
Vergleichswert nach ISO 6946 *		1,46 (1,54)					1,69 (1,76)	

\*: Innentemperatur 20 °C, Außentemperatur 0 °C, Windgeschwindigkeit 4 m/s  
Annahme: Folientemperatur = angrenzende Lufttemperatur

( ): Innentemperatur 30 °C, Außentemperatur 10 °C, Windgeschwindigkeit 4 m/s  
Annahme: Folientemperatur = angrenzende Lufttemperatur

Die dokumentierte Unsicherheit des Messergebnisses ist als einfache Standardunsicherheit angegeben. Die grau hinterlegten Felder waren nicht Teil des Messprogramms.

Anzumerken ist hier, dass alle normativ berechneten Vergleichswerte mit einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s ermittelt sind, während bei einigen Messungen durchschnittlich nur eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s herrschte. Eine Verringerung der Windgeschwindigkeit auf die Hälfte hat eine Reduzierung des U-Werts zur Folge.

## Interpretation der U-Wert-Messungen

In Bild 33 können die nach ISO 6946 rechnerisch ermittelten U-Werte in Kissenmitte mit den messtechnisch ermittelten verglichen werden. Man kann erkennen, dass in der Regel eine gute Übereinstimmung zwischen ISO 6946 und den Messungen in Kissenmitte vorliegt, auch wenn die Ergebnisse nach der ISO leicht konservativ sind. Die Rechenwerte nach ISO sind durchschnittlich um  $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  höher als die Messwerte in Kissenmitte. Für die U-Wert-Berechnung des ungestörten Mittelbereichs pneumatisch gestützter Membrankissen (analog  $U_g$ ) kann diese Norm folglich herangezogen werden. Die Differenz zwischen den kalorimetrisch ermittelten Ergebnissen mit und ohne Berücksichtigung der Randeffekte zeigt die große Bedeutung der Berücksichtigung zum einen der Klemmp Profile (analog  $U_f$ ) und des Randbereichs des Kissens.

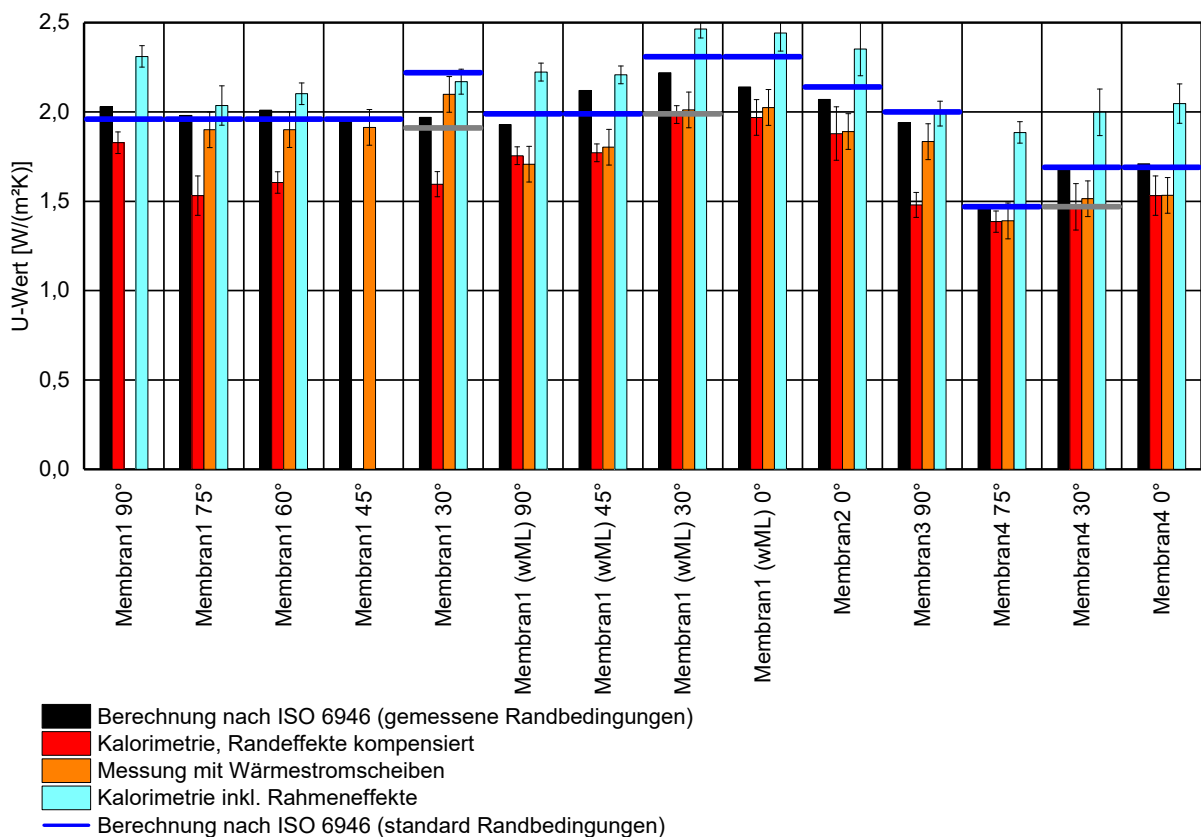


Bild 33:

Vergleich der errechneten (schwarz) mit den messtechnisch mit Hilfe der Kalorimetrie (rot) und mit Wärmestromscheiben (orange) ermittelten U-Werte in Kissenmitte. Die kalorimetrisch ermittelten U-Werte, die noch die Wärmebrücken des Kissenrands und der Klemmp Profile enthalten, sind zusätzlich in Cyan dargestellt. Der Zusatz „wML“ bei Membran 1 steht für eine nach innen umgeschlagene Mittellage beim Membranprüfling Nr. 1. Die Messunsicherheit ist als 1-facher Standardfehler angegeben.

Zur Abschätzung der Rahmen- und Randeﬀekte innerhalb der Auswertung der kalorimetrischen Messwerte wird ein 2D-Wärmebrückenmodell erstellt. Die direkt an das Klemmprofil angrenzenden, noch sehr dünnen Luftkammern des Kissens werden hierbei nicht berücksichtigt (siehe Bild 34). Dieses Wärmebrückenmodell liefert, wie in Bild 35 dargestellt, einen Wärmebrückenzuschlag für das Klemmprofil ( $\psi$ -Wert) von 0,395 W/(mK) zur Korrektur der kalorimetrisch ermittelten Energiemengen. Für die 3- und den 4-lagigen Prüfling ergibt sich ein identischer Zuschlag da lediglich das Klemmprofil, nicht aber der Randbereich der Kissen betrachtet wird. Dieser Zuschlag wird für die Korrektur der kalorimetrischen Wärmemengen mit der Temperaturdiﬀerenz zwischen innen und außen und der Länge des Klemmprofils multipliziert.

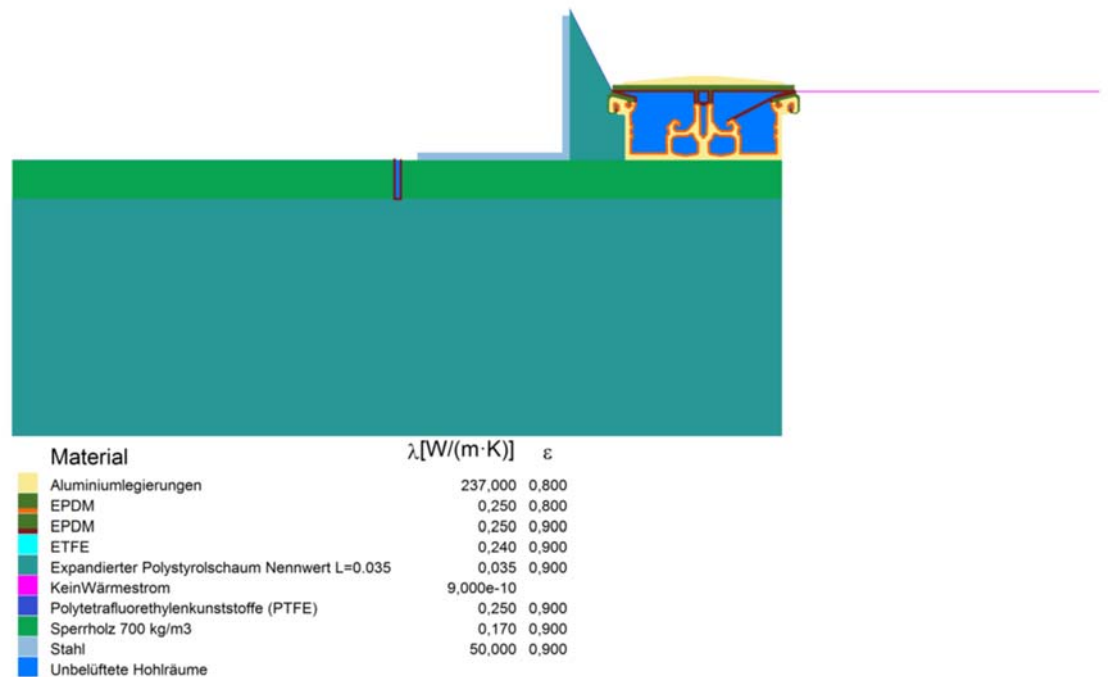
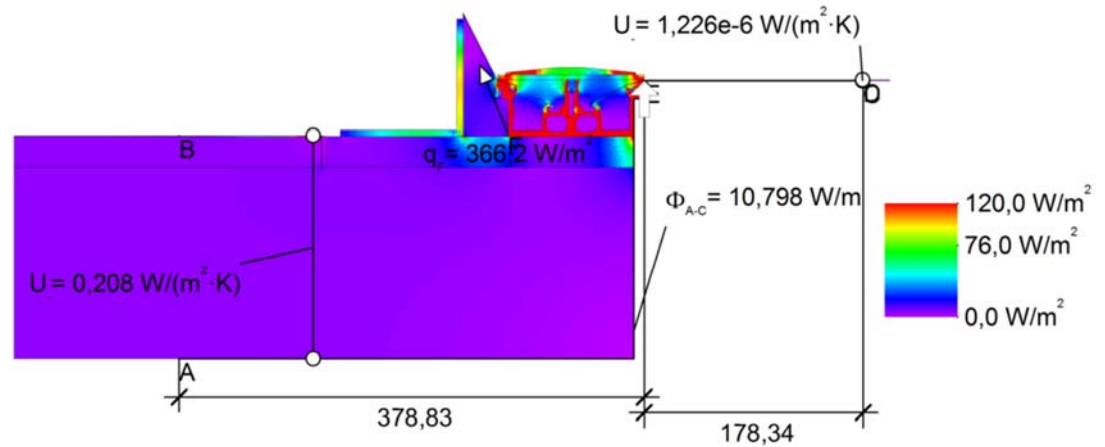


Bild 34:  
Thermisches 2D-Wärmebrückenmodell der Einbausituation der Membran-Prüflinge in den Kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand ohne Berücksichtigung des Randeﬀekts im Kissen.



$$\psi_{A-E-C} = \frac{\Phi}{\Delta T} - U_1 \cdot b_1 - U_2 \cdot b_2 = \frac{10,798}{22,800} - 0,208 \cdot 0,379 - 0,000 \cdot 0,178 = 0,395 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

Bild 35:  
Ergebnisse der Wärmebrückenberechnung der Einbausituation in den Kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand.

Die gemessenen g-Werte werden ähnlich dem U-Wert auf abweichende Randbedingungen hin kompensiert. Neben nicht-normativen Wärmeübergängen, die während der Messung vorliegen, werden beispielsweise auch verbleibende Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen und aus Temperaturschwankungen resultierende thermische Speichereffekte berücksichtigt. Hierfür kommt das in [16] bzw. [11] entwickelte In-situ-Analyseverfahren zum Einsatz. Die resultierenden Messergebnisse der g-Werte sind in Bild 36 und Tabelle 13 dargestellt.



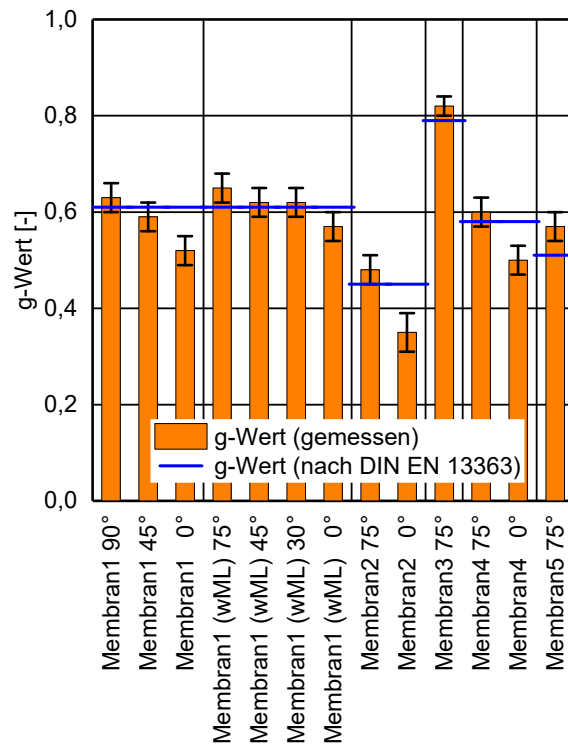


Bild 36:  
Darstellung der gemessenen (orange) und der Normativ ermittelten (blau) g-Werte. Angabe der Messunsicherheit als einfacher Standardfehler.

Tabelle 13:  
g-Wert-Messergebnisse [-] der Membranprüflinge in Abhängigkeit vom Neigungswinkel des Prüflings. Messunsicherheit als einfacher Standardfehler.

Prüflingsnummer (Nach Bild 7)	Mess- zeitraum	Neigungswinkel gegen die Horizontale [°]					
		90	75	45	30	0	nach DIN EN 13363
1 (3-lagig; 50 %)	3.06. – 12.08.2016	0,63 $\pm 0,03$		0,59 $\pm 0,03$		0,52 $\pm 0,03$	0,61
1 - Mittellage nach Innen	26.10. – 18.12.2016		0,65 $\pm 0,03$	0,62 $\pm 0,03$	0,62 $\pm 0,03$	0,57 $\pm 0,03$	0,61
2 (dicht bedruckt)	1.01. – 30.01.2017		0,48 $\pm 0,03$			0,35 $\pm 0,04$	0,45
3 (transparent)	10.05. – 12.05.2017		0,82 $\pm 0,02$				0,79
4 (4-lagig)	04.03 - 09.04.2017		0,60 $\pm 0,03$			0,50 $\pm 0,03$	0,58
5 (Intensives Silber)	11.02. – 16.02.2017		0,57 $\pm 0,03$				0,51
6 (klein)	-						0,61

Die Unsicherheit des Messergebnisses ist als einfache Standardunsicherheit angegeben. Die grau hinterlegten Felder sind nicht Teil des Messprogramms.

## 2.3 Stützluftanlagen

### 2.3.1 Prinzipieller Aufbau

Membrankissenkonstruktionen benötigen zur Erhaltung ihrer statischen Eigenschaften permanenten Überdruck von ca. 200 – 350 Pascal gegenüber dem Umgebungsluftdruck. Dieser Überdruck wird durch die Zuführung von mechanisch erzeugter Stützluft erreicht. Im Allgemeinen bilden Stützluftanlagen ein geschlossenes System, in welchem die Außenluft getrocknet und mit einem voreingestellten Überdruck der Membrankissenkonstruktion zugeführt wird. Die Art der Lufttrocknung sowie der Anteil der Luftfeuchte in der Stützluft unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller. Bild 37 und 38 zeigen exemplarisch den Aufbau und die Komponenten einer Stützluftanlage.

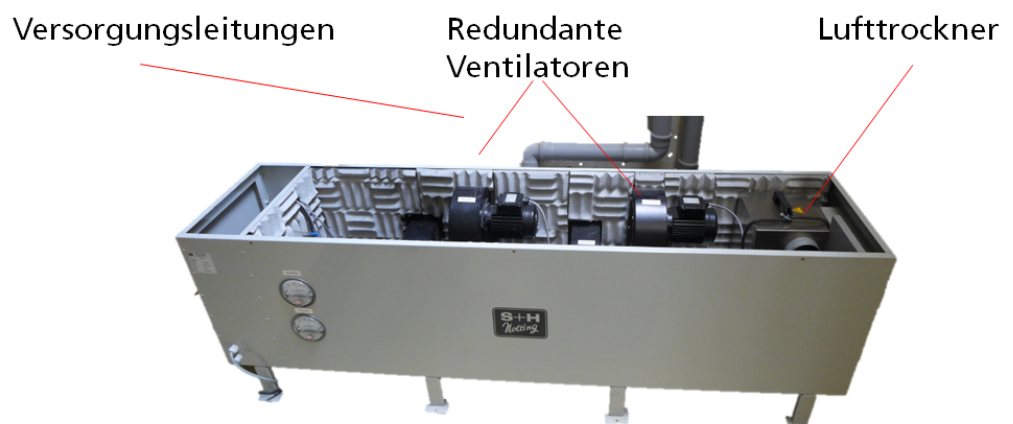


Bild 37:  
Exemplarischer Aufbau einer Stützluftanlage mit Benennung der Komponenten.



Bild 38:

Blick auf das Innenleben einer Stützluftanlage. Im oberen Teil der Anlage sind vier schwarze Druckgebläse jeweils an den Ausgängen der Verteilungsleitungen angebracht, sowie im unteren Teil des Bildes ein angeschlossener Trockner zu erkennen ist.

Grundsätzlich werden zwei Arten von Stützluftanlagen voneinander unterschieden.

### **Offenes System**

Bei einem offenen System entweicht die zugeführte Stützluft über speziell dimensionierte Auslassventile in die Umgebung (zumeist raumseitig). Hierbei muss permanent Umgebungsluft zugeführt und auf die vom Hersteller festgelegte Luftfeuchte getrocknet werden. Diese Bauweise stellt derzeit den technischen Stand der Technik dar.

### **Geschlossenes System**

Die Stützluft aus der Membrankissenkonstruktion wird zur Stützluftanlage zurückgeführt. Hierbei fällt die Senkung des Feuchteanteils deutlich geringer aus als bei einem offenen System. Dafür ist allerdings der technische Aufwand größer, weil die gesamte Stützluft im Kreislauf geführt wird. Druckänderungen im System sind dadurch schwieriger auszugleichen.

## **2.3.2 Untersuchung Stützluftanlagen**

Stützluftanlagen mit einer Stützluftvortrocknung zur Versorgung von offenen Systemen sind derzeit Stand der Technik. Der dafür erforderliche Energieauf-

wand wird bei der energetischen Bewertung von Membrankissen-Konstruktionen in der Regel bei der Planung nicht ausreichend berücksichtigt. Um die Größenordnung zu dokumentieren, in der übliche Energieaufwände von Stützluftanlagen liegt, wurden im Rahmen dieses Projektes verschiedene Systeme im Vergleich messtechnisch erfasst und flächenbezogen verglichen. Ziel dabei war es, einen Überblick über den erforderlichen energetischen Aufwand zur Bereitstellung der Stützluft zu erhalten. Zu diesem Zweck wurde die elektrische Leistungsaufnahme von fünf verschiedenen an realen Konstruktionen verbauten Stützluftanlagen gemessen.

### Überblick über die Messstationen

Für die Messungen der Leistungsaufnahmen von Stützluftanlagen mit Lufttrocknung wurden Anlagen gesucht, die in räumlicher Nähe des Fraunhofer IBP liegen und deren Betreiber mit der messtechnischen Erfassung einverstanden waren. Nach längerer Suche und einigen erfolglos angefragten Objekten, konnte schließlich der Tierpark Hellabrunn in München für die Untersuchungen gewonnen werden. Mit gleich drei Objekten (Bild 39-41) unterschiedlichen Alters war so eine vergleichende Untersuchung unterschiedlicher Systeme unter nahezu identischen Randbedingungen (Außen- und Innenklima) möglich.



Bild 39:  
Luftbild der Untersuchungsobjekte im Tierpark Hellabrunn (Schildkrötenhaus, Urwaldhaus und Giraffenhaus).





Bild 40:  
Dachkonstruktion des Schildkrötenhauses im Tierpark Hellabrunn [17].



Bild 41:  
Dachkonstruktion des Urwaldhauses (links) [18] und Giraffenhauses (rechts) [19] im Tierpark Hellabrunn.

Als zusätzliche Referenz wurde die Membran-Halle der Flight-Test-Facility (FTF) des Fraunhofer IBP (Bild 42) herangezogen. Diese ist allerdings als Versuchsdach mit unüblichem Aufbau konzipiert und deshalb weniger repräsentativ.



Bild 42:  
Flight-Test-Facility (FTF)-Halle des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP in Valley bei Holzkirchen.

Die nachfolgenden Tabellen 14-17 zeigen die grundlegenden Kenndaten der Messstationen, wie überspannte Fläche, Kissen Aufbau (Anzahl der Lagen), Hersteller der Stützluftanlage und Förderleistung. Zudem sind die gemittelten, erfassten Messwerte angegeben.

Tabelle 14:  
Kenndaten Stützluftanlage Fluglabor (FTF) in Holzkirchen.

<b>Grunddaten FTF</b>	
<b>Membran-Konstruktion</b>	
Fläche (überspannt) [m <sup>2</sup> ]	830
Lagen	3
<b>Stützluftanlage</b>	
Hersteller	Gustav Nolting GmbH
Typ	DG 65
Lufttrockner	Elektrovorheizung der Frischluft
Max. Anschlussleistung	230 V / 10 A
Max. Luftleistung [m <sup>3</sup> /h]	900
Kurzbeschreibung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Offenes System</li> <li>- 2 Redundante Gebläse pro Lage</li> </ul>
<b>Messkonzept FTF</b>	
<b>Messzeitraum: 10.06.2015 – 19.06.2016</b>	
Mittlere Leistungsaufnahme Lüfter [W]	328
Mittlere Leistungsaufnahme Trockner [W]	509
Mittlere Leistungsaufnahme gesamt [W]	755
Mittlere Leistungsaufnahme pro Fläche [W/m <sup>2</sup> ]	0,91

Tabelle 15:  
Kenndaten Stützluftanlage Urwaldhaus, Tierpark Hellabrunn.

<b>Grunddaten Urwaldhaus</b>	
<b>Membran-Konstruktion</b>	
Hersteller	Koch Membrane
Fläche (Mantel) [m <sup>2</sup> ]	1730
Lagen	3
<b>Stützluftanlage</b>	
Hersteller	elnic
Baujahr	1989
Lufttrockner	Kondensattrockner
Max. Anschlussleistung	400 V / 16 A
Max. Luftleistung [m <sup>3</sup> /h]	k. A.
Kurzbeschreibung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geschlossenes System</li> <li>- Redundante Gebläse</li> </ul>
<b>Messkonzept Urwaldhaus</b>	
<b>Messzeitraum: 10.06.2015 – 19.06.2016</b>	
Mittlere Leistungsaufnahme Lüfter [W]	266
Mittlere Leistungsaufnahme Trockner [W]	960
Mittlere Leistungsaufnahme gesamt [W]	1228
Mittlere Leistungsaufnahme pro Fläche [W/m <sup>2</sup> ]	0,71



Tabelle 16:  
 Kenndaten Stützluftanlage Schildkrötenhaus, Tierpark Hellabrunn.

<b>Grunddaten Schildkrötenhaus</b>	
<b>Membran-Konstruktion</b>	
Hersteller	Koch Membrane
Fläche (Mantel) [m <sup>2</sup> ]	310
Lagen	3
<b>Stützluftanlage</b>	
Hersteller	Gustav Nolting GmbH
Typ	DG 90
Baujahr	1996
Frischluftaufbereitung	Elektroheizung
Max. Anschlussleistung	400 V / 10 A
Max. Luftleistung [m <sup>3</sup> /h]	100
Lufttrockner	Sorptionsentfeuchter
Kurzbeschreibung	- Offenes System - Redundante Gebläse / Lage
<b>Messkonzept Schildkrötenhaus</b>	
<b>Messzeitraum: 10.06.2015 – 19.06.2016</b>	
Mittlere Leistungsaufnahme Lüfter [W]	269
Mittlere Leistungsaufnahme Trockner [W]	850
Mittlere Leistungsaufnahme gesamt [W]	1120
Mittlere Leistungsaufnahme pro Fläche [W/m <sup>2</sup> ]	3,61

Tabelle 17:  
 Kenndaten Stützluftanlage Giraffenhaus, Tierpark Hellabrunn.

<b>Grunddaten Giraffenhaus</b>	
<b>Membran-Konstruktion</b>	
Hersteller	Velabran GmbH
Fläche (Mantel) [m <sup>2</sup> ]	400
Lagen	3
<b>Stützluftanlage</b>	
Hersteller	elnic
Typ	Eluft 100
Baujahr	2012
Lufttrockner	Adsorptionstrockner
Max. Anschlussleistung	400 V / 16 A
Max. Luftleistung [m <sup>3</sup> /h]	800
Kurzbeschreibung	- Offenes System
<b>Messkonzept Giraffenhaus</b>	
<b>Messzeitraum: 10.06.2015 – 19.06.2016</b>	
Mittlere Leistungsaufnahme Lüfter [W]	67
Mittlere Leistungsaufnahme Trockner [W]	586
Mittlere Leistungsaufnahme gesamt [W]	667
Mittlere Leistungsaufnahme pro Fläche [W/m <sup>2</sup> ]	1,67

### 2.3.3 Messergebnisse

Nachfolgend in Bild 43 bis Bild 48 sind die gemessenen Daten der Stützluftanlagen grafisch dargestellt. Für jedes Messobjekt ist die Leistungsaufnahme für die Luftversorgung, für die Stützlufttrocknung und die Gesamt-Leistungsaufnahme in separaten Grafen aufgeführt.

Die deutlich erkennbare Schwankung der Leistungsaufnahme ist auf die Schaltzyklen zurückzuführen, die vom Kisseninnendruck abhängen. Erkennbar ist aber auch, dass die Leistungsaufnahme stets auf einem festen Niveau bleibt und nur um dieses oszilliert. Die Anlagen schalten also offenbar nicht vollständig ab.

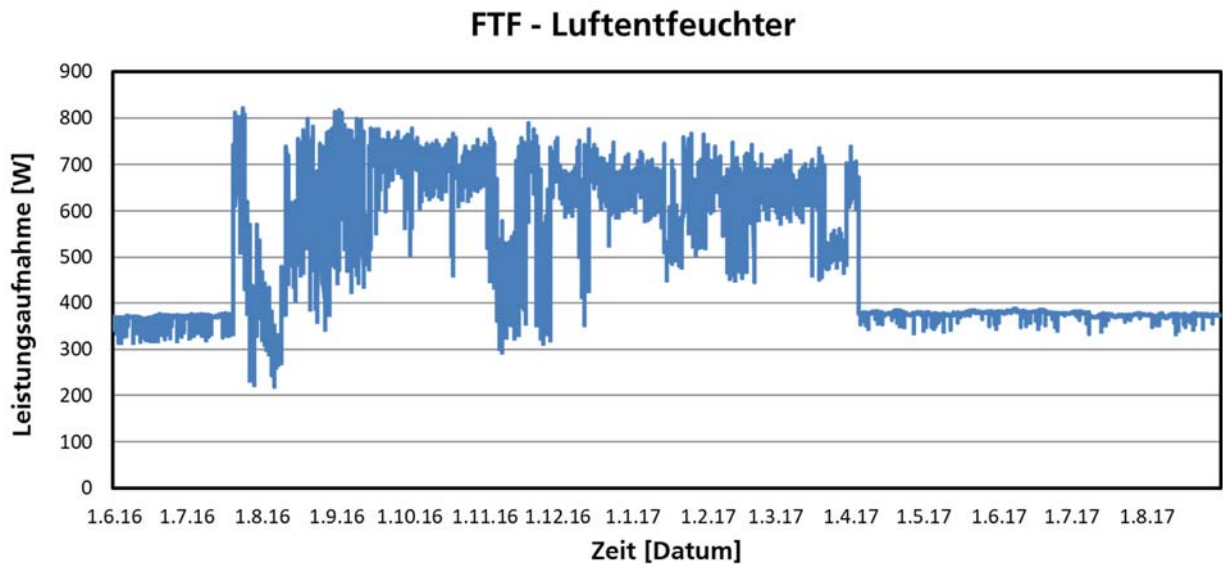
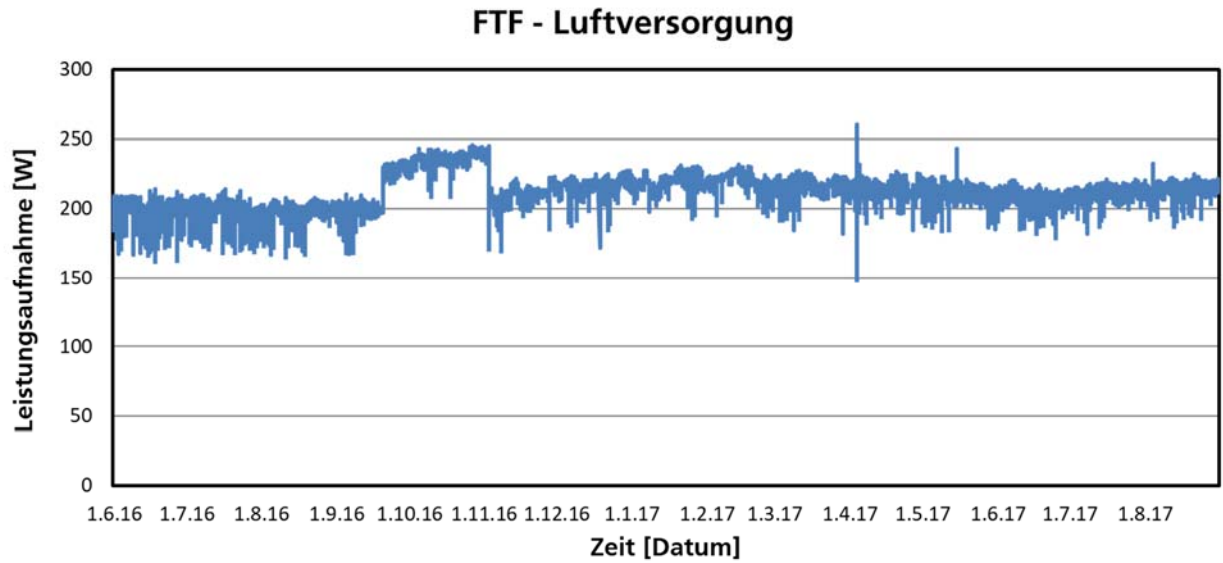
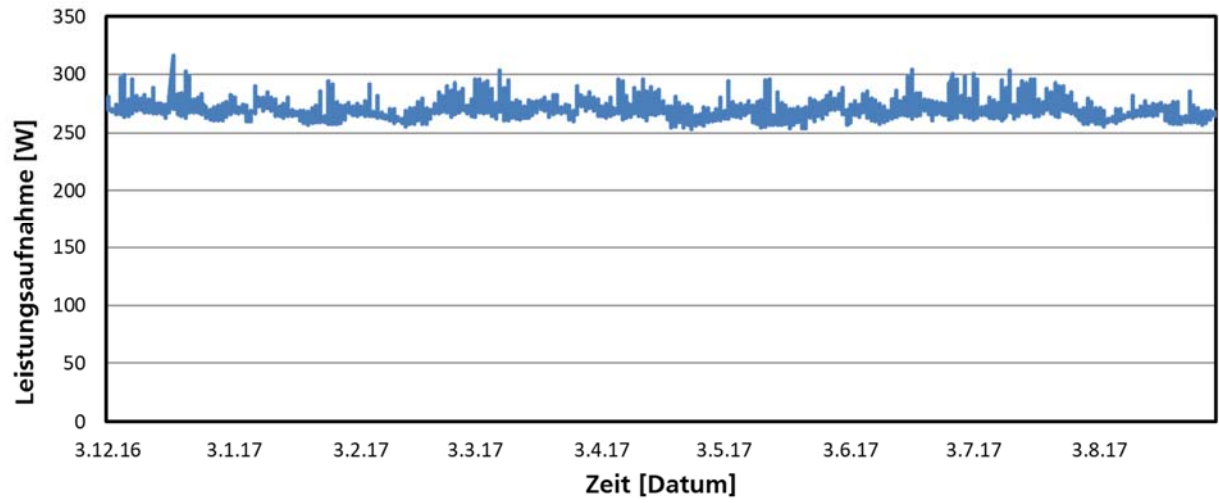


Bild 43:  
FTF: Vergleich Leistungsaufnahme Luftversorgung - Luftentfeuchter.

### Schildkrötenhaus - Luftversorgung



### Schildkrötenhaus - Luftentfeuchter

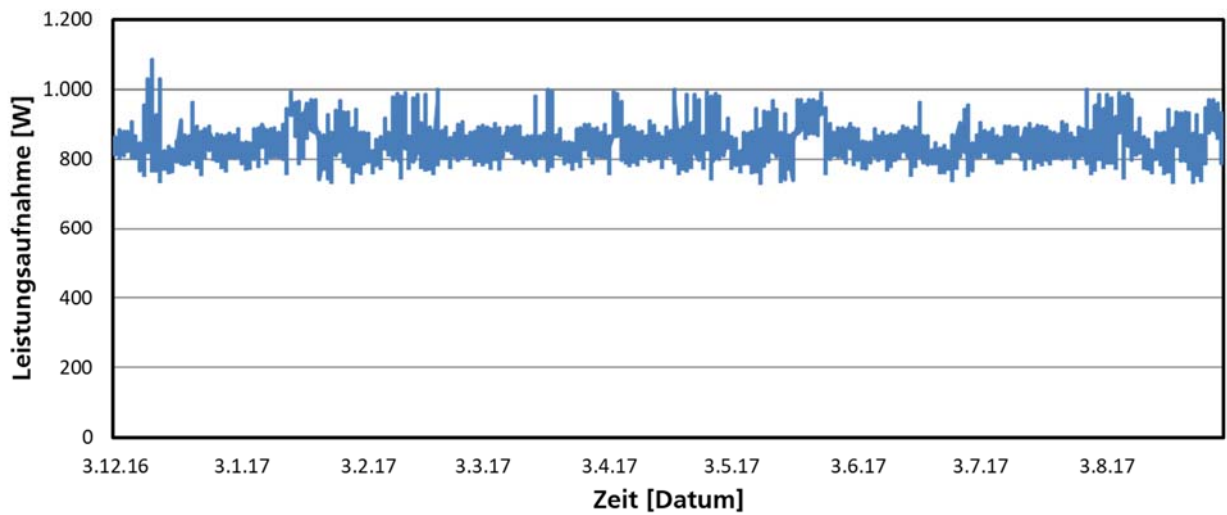
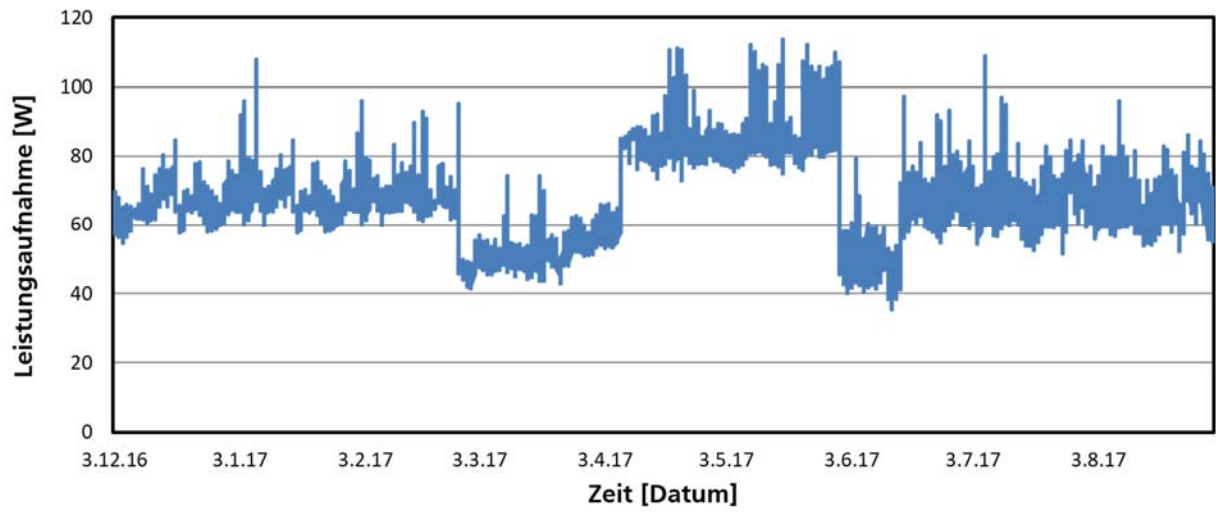


Bild 44:  
Schildkrötenhaus: Vergleich Leistungsaufnahme Luftversorgung - Luftentfeuchter.

### Giraffenhaus - Luftversorgung



### Giraffenhaus - Luftentfeuchter

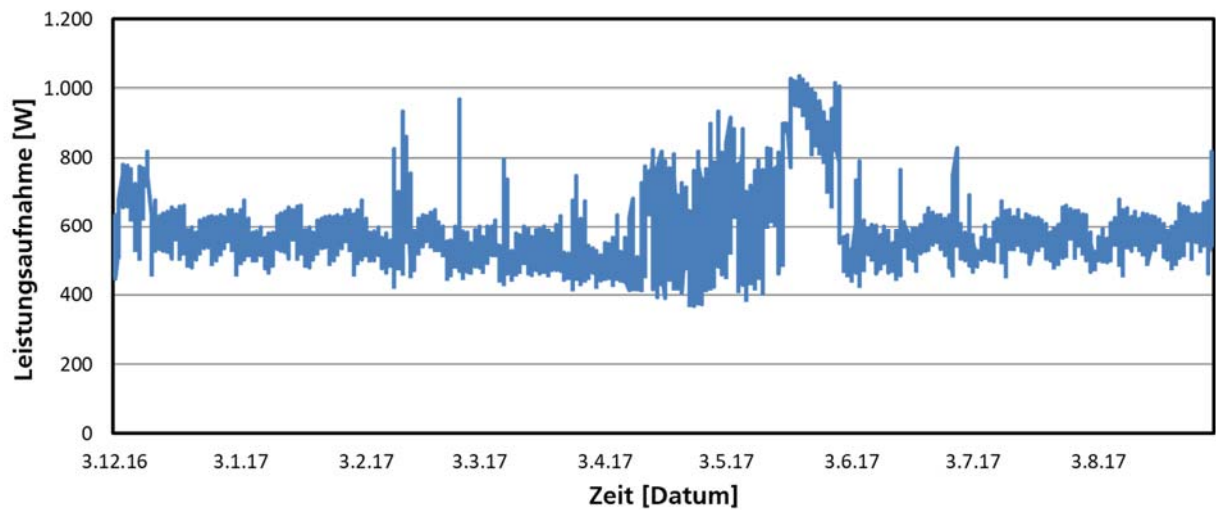


Bild 45:  
Giraffenhaus: Vergleich Leistungsaufnahme Luftversorgung - Luftentfeuchter.

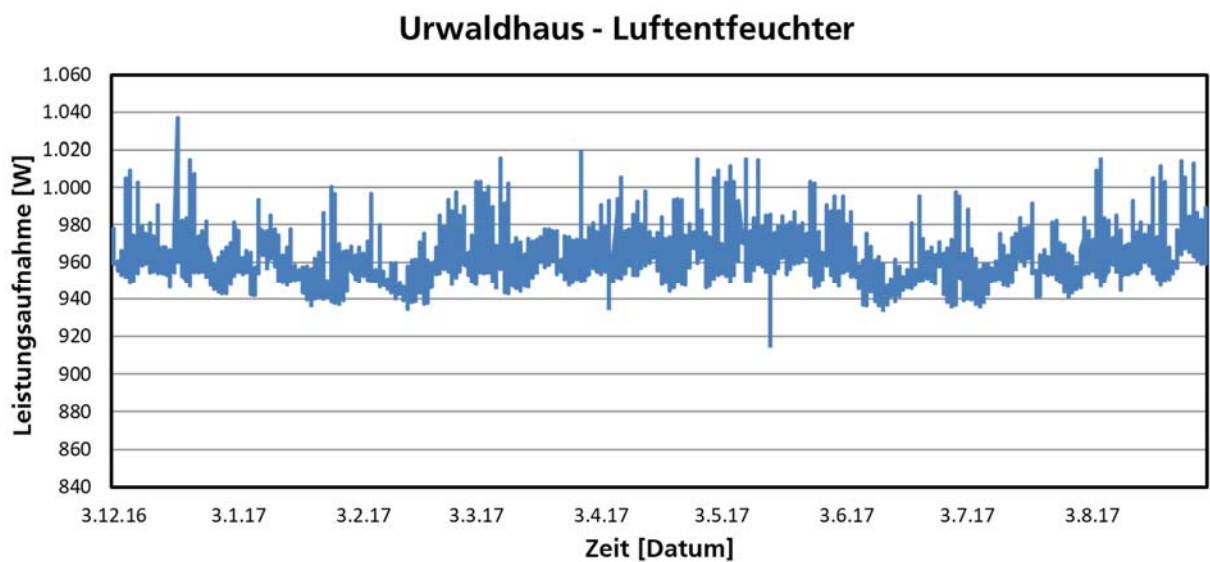
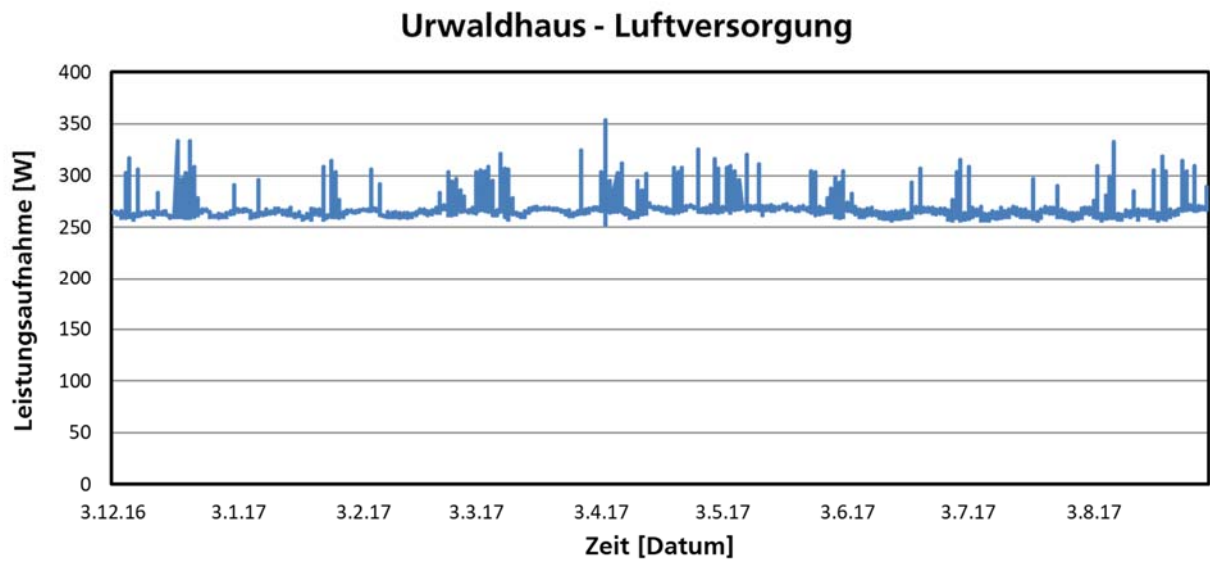


Bild 46:  
Urwaldhaus: Vergleich Leistungsaufnahme Luftversorgung - Luftentfeuchter.

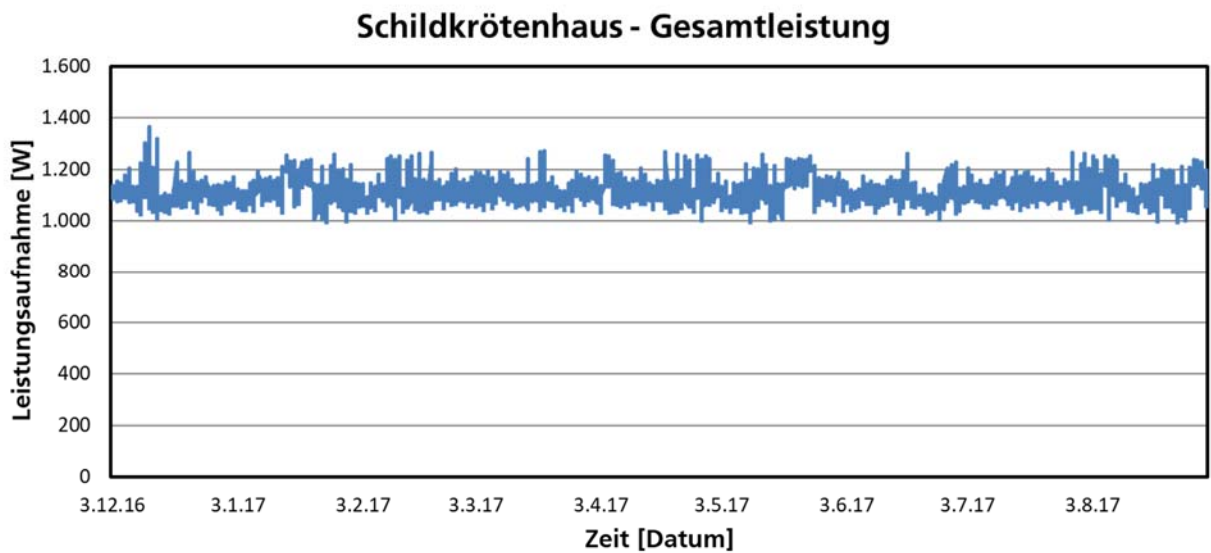
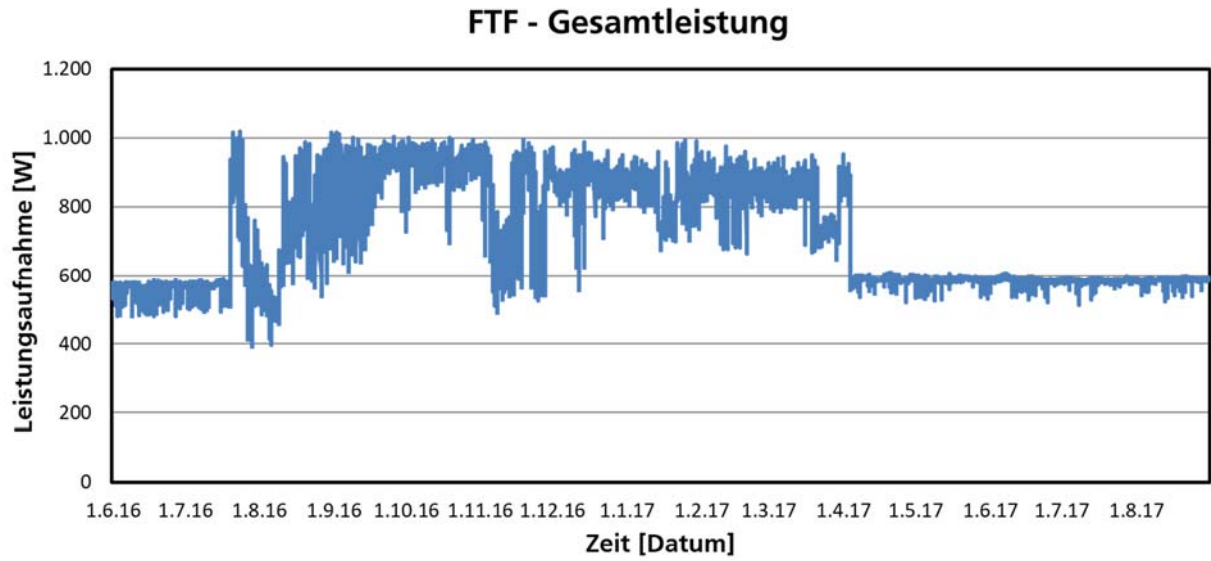


Bild 47:  
Vergleich gesamte Leistungsaufnahmen des FTF (oben) und Schildkrötenhauses (unten).

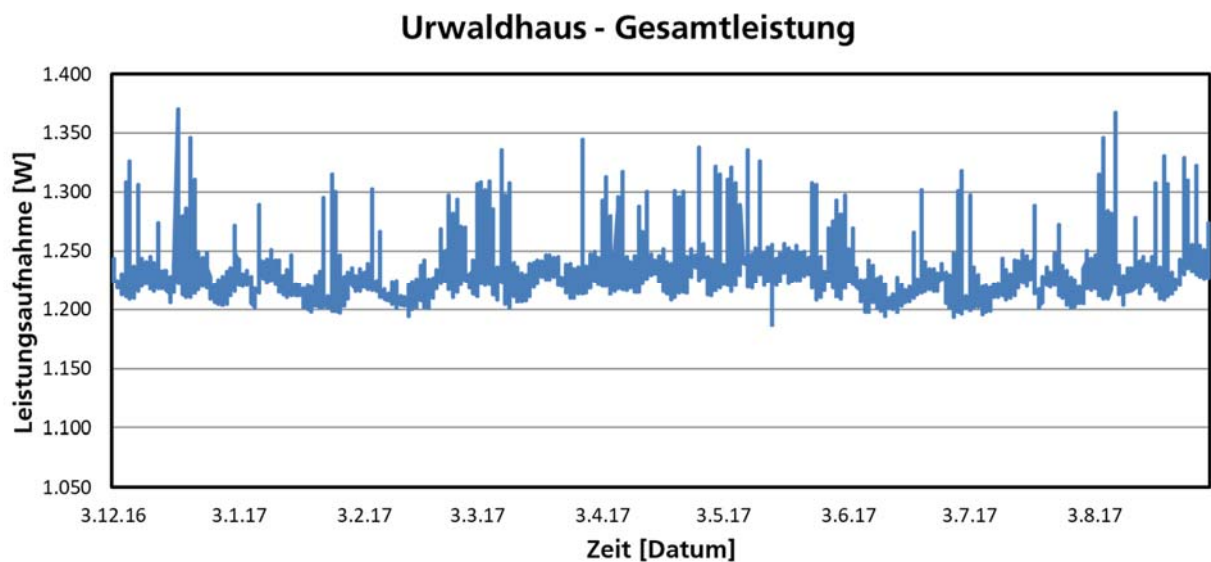
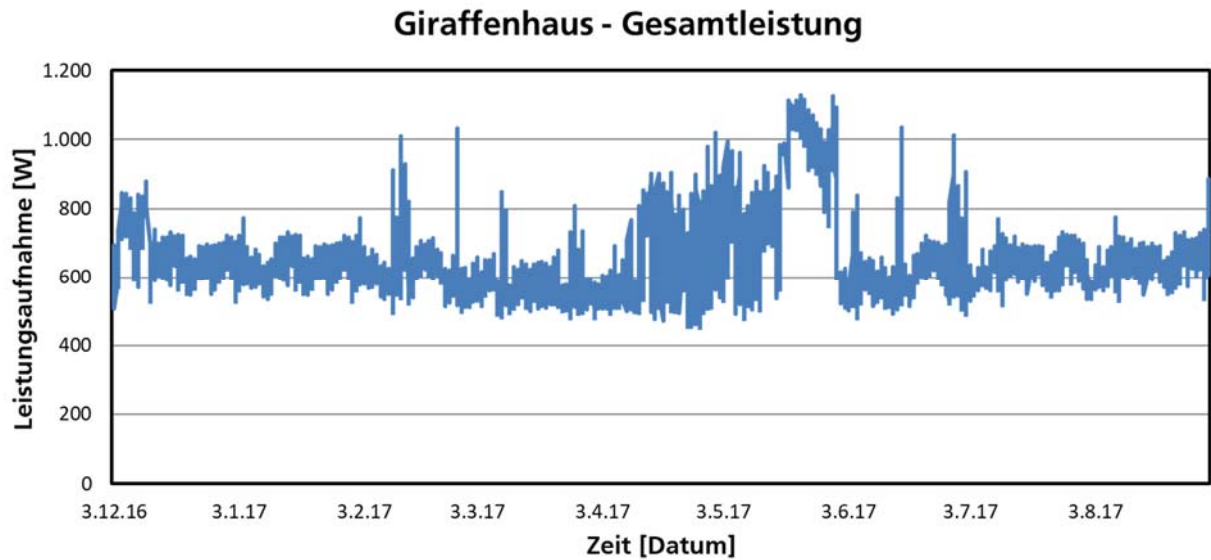


Bild 48:  
Vergleich gesamte Leistungsaufnahmen des Giraffenhaus (oben) und Urwald-  
hauses (unten).

### 2.3.4 Auswertung und Ergebnisse

Die gesammelten Messdaten wurden auf eine Korrelation mit den Witterungsverhältnissen hin ausgewertet, aber es konnte keine direkte Abhängigkeit von der Witterung belegt werden. In Bild 49 sind exemplarisch die klimatischen Messdaten und die Leistungsaufnahme der Stützluftanlage des Schildkrötenhauses dargestellt. In den Auswertungen sind keine direkten Abhängigkeiten



fest zustellen. Zwar schwankt der Kisseninnendruck abhängig vom sich verändernden äußeren Luftdruck, aber dieses Verhalten wird überlagert von der systemimmanenten Druckschwankung im Kissen aufgrund von Leckagen und undichten Luftleitungen. Aufgrund der unmittelbaren Messung der Leistungsaufnahme von Gebläse und Luftentfeuchter sind die Daten der einzelnen Stützluftanlagen direkt vergleichbar. Die Leistungsaufnahme der Regelungselektronik sowie weiterer elektrisch angeschlossener Komponenten der Stützluftanlage haben keinen Einfluss auf die Messergebnisse.

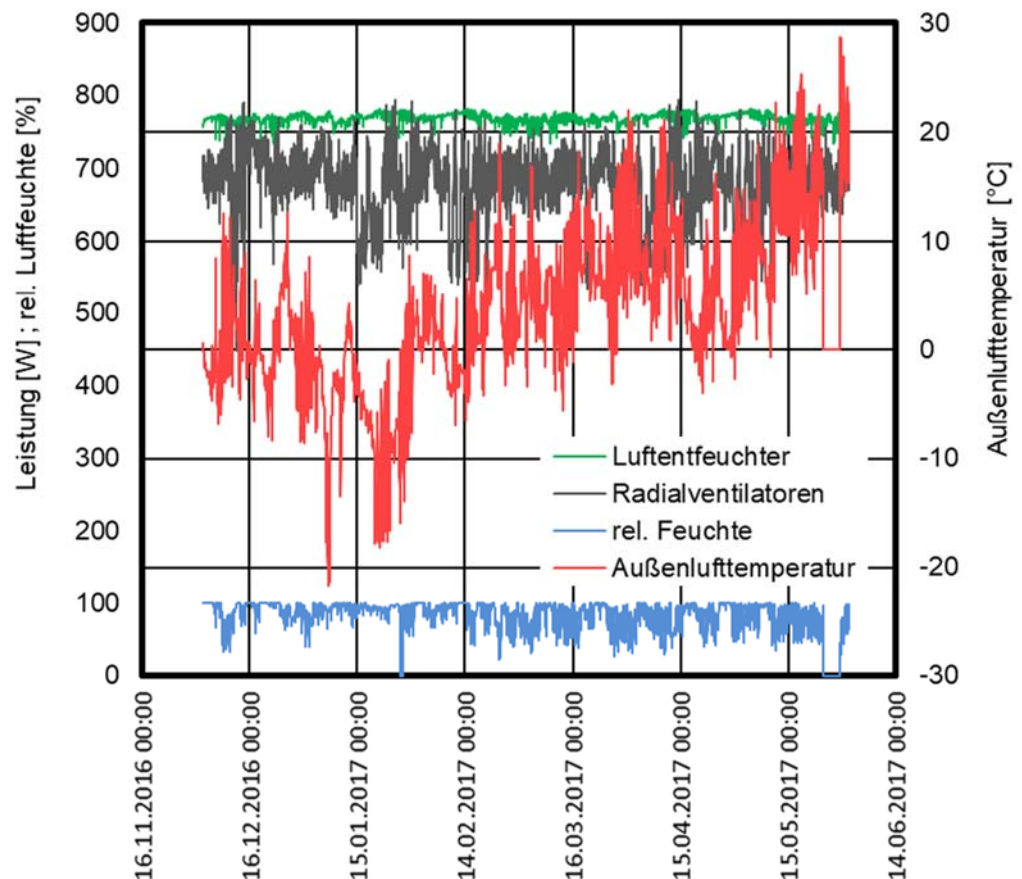


Bild 49:  
Klimatische Messdaten (Außenlufttemperatur und relative Feuchte) und Leistungsaufnahme der Stützluftanlage, exemplarisch dargestellt für das Schildkrötenhaus.

Da die Auslegung der Stützluftanlagen und deren Trockner vom zu versorgenden Kissen volumen abhängt, müssen je nach erforderlicher Leistung geeignete dimensionierte Anlagen eingesetzt werden. Allerdings stehen nicht beliebig fein

auf jeglichen Bedarf abgestimmte Anlagen zur Verfügung. Darauf zurückzuführen ist vermutlich auch die deutliche Schwankung zwischen der flächenbezogenen Leistungsaufnahme der verschiedenen Objekte zu verstehen.

Tabelle 18:  
Gegenüberstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Stützluftanlagen.

	<b>Urwaldhaus</b>	<b>Giraffenhaus</b>	<b>Schildkrötenhaus</b>	<b>FTF</b>
Fläche [m <sup>2</sup> ]	1730	400	310	830
Mittlere Leistungsaufnahme Lüfter [W]	266	67	269	328
Mittlere Leistungsaufnahme Trockner [W]	960	586	850	509
Mittlere Leistungsaufnahme gesamt [W]	1228	667	1120	755
Mittlere Leistungsaufnahme pro Fläche [W/m <sup>2</sup> ]	0,71	1,67	3,61	0,91

Vergleicht man die Leistungskenndaten direkt miteinander (Bild 50), ist gut zu erkennen, dass die Lufttrocknung am Gesamtenergieaufwand den überwiegenden Anteil hat. Ausnahme dabei ist das FTF des Fraunhofer IBP, bei dem aber die Lufttrocknung über einen längeren Zeitraum ausgeschaltet war (wie sich auch in den Messgrafiken zeigt).

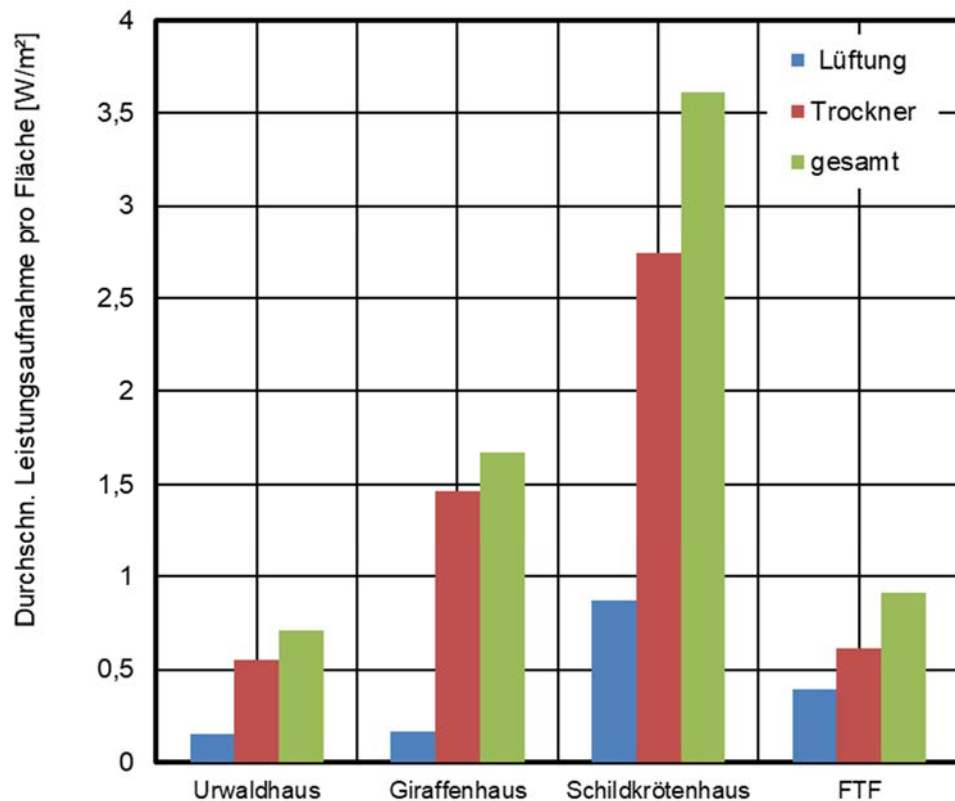


Bild 50:  
Vergleich Leistungsaufnahme verschiedener Stützluftanlagen.

Der energetische Aufwand für die Lufttrocknung liegt i.d.R. zwei bis drei Mal so hoch wie für die reine Luftversorgung. Am Beispiel des Schildkrötenhauses im Tierpark Hellabrunn sind das rund 10 MWh/Jahr alleine für die Lufttrocknung.

### 2.3.5 Schlussfolgerung Stützluft-Anlagen

Die Ergebnisse der Untersuchung lassen keine direkten Korrelationen der Leistungsaufnahmen, weder des Lüfters noch des Trockners, mit dem Außenklima erkennen. Die deutlich erkennbaren Schwankungen rühren offenbar eher her von den systembedingten Undichtigkeiten im Luftversorgungssystem. Allen untersuchten Anlagen ist aber ein vergleichsweise hoher Energieaufwand für die Luftversorgung mit Trocknung gemeinsam. Da die Stützluftanlagen bislang nicht feuchtegesteuert betrieben werden und oft nicht optimal ausgelegt sind, führt die Lufttrocknung zu einem erheblichen Energieverbrauch, da jeweils auf

ein technisch machbares Minimum getrocknet wird, um Tauwasserausfall in den Kissen vollständig auszuschließen.

Die Regelung der Zuluft ist allerdings durchaus bedarfsgesteuert. Sie schaltet sich ein, wenn ein als unteres Limit eingestellter Kisseninnendruck unterschritten wird und schaltet ab, wenn ein maximaler Wert erreicht ist. Je dichter das gesamte Rohrleitungsnetz und die Kissenkonstruktion ist, desto seltener müssen die Lüfter schalten. Allerdings verlangt das offene System mit definiertem Luftauslass das permanente Nachführen von Luft. Ungeklärt bleibt an dieser Stelle die Frage, ob ein derart hoher Luftdurchsatz, wie er für die meisten Anlagen dimensioniert wird (üblicherweise wird das Kissenvolumen bis zu dreimal am Tag ausgetauscht), überhaupt notwendig ist. In diesem Punkt scheinen weiterführende Untersuchungen mit dem Ziel einer energieoptimierten Lüftungssteuerung lohnenswert und sinnvoll.

Die Überwachung der Leistungsaufnahme des Lüfters, kann überdies als Indikator für auftretende Leckagen im System dienen. Zum Teil wird diese Art Monitoring bereits von Anbietern eingesetzt.

## 3 Entwicklung eines membranspezifischen Bemessungsverfahrens

### 3.1 Grundlagen

#### 3.1.1 Pneumatisch gespannte Membrankissen

Membrankonstruktionen aus Luftkissen sind auf ein Primärtragwerk angewiesen und bilden in der Regel die Ausfachung der Tragkonstruktion (Bild 51). Der Überdruck gegenüber Außenluft, der je nach Beanspruchung zwischen 200 und 1000 Pascal liegt, wird von einer Gebläse-Anlage erzeugt. Die einzelnen Kissen sind über ein Rohrsystem miteinander verbunden. Durch den Überdruck im Kissen wird die Membran vorgespannt und so stabilisiert. Deshalb ist eine permanente Luftversorgung erforderlich, um die äußeren Luftdruckschwankungen auszugleichen.



Bild 51:  
Pneumatisch vorgespannte Membrankonstruktion am Beispiel der Allianz-Arena in München [Quelle: Fraunhofer IBP]

Während sich textile Membranstrukturen wärmetechnisch sehr gut mit verfügbaren Normen bemessen lassen, bestehen einige Schwierigkeiten, diese Bemessungsverfahren auf transparente Kissen-Systeme anzuwenden. Membrankissen bestehen aus mindestens zwei dünnen Folien, die am Rand mit einem Keder verschweißt sind. Offene Dach- oder Wandsysteme dienen nur dem Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung oder Regen, während Systeme, die einen Raum abschließen auch wärmetechnisch relevant sind, weil damit Innenräume gegen den Außenraum abgeschlossen werden. Anders als bei massiven Bauteilen dominieren beim Wärmetransport durch das transparente Kissen konvektive

und strahlungstechnische Wärmetransportvorgänge. Während in unseren Breiten die Strahlung insbesondere für den Energie-Eintrag verantwortlich ist, sorgt überwiegend die Konvektion für den Energie-Austrag. Wärmeleitung spielt nur in den Randbereichen eine Rolle, wo das Kissen in ein Klemmprofil eingeklemmt ist.

### 3.1.2 Normative Bemessung

Im Vorfeld des Projekts wurden am IBP bereits bestehende Normen und energetische Bemessungsverfahren auf ihre Anwendbarkeit auf Membrankissen untersucht. Für die Betrachtung des wärmetechnischen Verhaltens kommen dabei drei Normen in Frage. Während die Berechnung des Energie-Eintrags in ein Gebäude durch seine Hülle (g-Wert) in der DIN EN 410 beschrieben ist, stehen für die Betrachtung des Energie-Austrags (U-Wert) zwei Normen zur Verfügung. Zum einen kann auf die DIN EN 673 zurückgegriffen werden, die im Wesentlichen für die Bemessung von Fenstern herangezogen wird. Zum anderen steht die DIN EN ISO 6946 zur Verfügung, mit der opake oder mehrschichtige Bauteile bemessen werden können. Während der Energie-Eintrag durch ein Membrankissen mit Einschränkung nach DIN EN 410 berechnet werden kann, ist eine Anwendbarkeit der beiden Normen für den Energie-Austrag auf Membrankissen-Konstruktionen grundsätzlich fraglich. Beide Vorschriften enthalten implizite Anforderungen oder Einschränkungen, die eine uneingeschränkte Verwendung zumindest infrage stellen. Membrankissen werden in beiden Normen nicht explizit berücksichtigt. Die Klärung der Frage, inwieweit diese vorhandenen Bemessungsvorschriften für Membrankissen-Konstruktionen geeignet und anwendbar sind, ist zentraler Gegenstand dieses Projekts.

#### **Berechnungsverfahren U-Wert**

Der U-Wert oder Wärmedurchgangskoeffizient ist eine physikalische Größe zur Beschreibung des Wärmedurchgangs durch eine oder mehrere Materialschichten. Er stellt in der Bauphysik einen wichtigen Kennwert für die Nachweise nach der Energieeinsparverordnung dar [2].

Das Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten und des Wärmedurchlasswiderstandes wird in Deutschland durch die Norm DIN EN ISO 6946:2018 für opake Bauteile und die DIN EN 673:2011 für Verglasungen [3] geregelt. Die Basis der in die Berechnung eingehenden Parameter bilden die Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe sowie die Wärmeübergangswiderstände der zu bemessenden Bauteilschichten. Zur Berechnung des U-Werts von Membrankissen-Konstruktionen kann das Verfahren der DIN EN ISO 6946:2008 sowie der DIN EN 673:2011 zugrunde gelegt werden, deren Bemessungsverfahren durch das gleiche Widerstandsmodell begründet werden.

Die ISO 6946:2008 „Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren“ ist für opake Bauteile, auch mit grö-

Beren Lufträumen, ausgelegt. Das Berechnungsverfahren beruht auf Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchlasswiderstände der Baustoffe. Explizit ausgeschlossen werden Türen, Fenster, verglaste Einheiten, Vorhangfassaden, Lüftungselemente und erdberührende Bauteile. In Anhang A finden sich detaillierte Verfahren für Oberflächen mit verschiedenen Emissionsgraden, verschiedenen Temperaturniveaus und besonderen Windgeschwindigkeiten. Anhang B bietet ein Verfahren zur Bestimmung des Wärmewiderstands von ausgedehnten Lufträumen. Die Berechnungsverfahren der Norm sind jedoch nur für opake Bauteile anwendbar, da hier keine Transmission stattfindet. Da ETFE-Folien jedoch auch im langwelligigen, thermischen Bereich eine gewisse Transparenz aufweisen, ist die Frage, wie der transmittierte Anteil der Strahlung bei Membrankissen-Konstruktionen im Berechnungsverfahren zusätzlich zu berücksichtigen ist.

Nach Projektende wurde eine Novellierung der DIN EN ISO 6946:2018 veröffentlicht, die jedoch nur feine Abwandlungen der vorherigen Fassung enthält. So werden Wärmeübergangskoeffizienten nicht mehr grob nach horizontaler Einbaulage von 0 - 30° und vertikaler Einbaulage von 30 - 90° berechnet, sondern je nach Neigungswinkel interpoliert.

Die DIN EN 673:2011 „Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) – Berechnungsverfahren“ für Verglasungen ist im Grunde ebenfalls anwendbar zur Bestimmung eines Vergleichswerts – bei Berücksichtigung der membranspezifischen Anpassungen analog der ISO 6946 –, da sich das zugrundeliegende physikalische Widerstandsmodell gleicht. Zur Validierung der Messungen wurde als Grundlage jedoch die ISO 6946 herangezogen, da die EN 673 auf kommerzielle Verglasungen beschränkt ist und somit ein spezifisches und für die Belange in diesem Projekt zu unflexibles Berechnungsverfahren hinsichtlich der Randbedingungen bietet.

Zur Berechnung des U-Wertes finden das detaillierte Berechnungsverfahren und das vereinfachte Berechnungsverfahren Anwendung. Das detaillierte Berechnungsverfahren stützt sich auf numerische Simulationen und wird nach ISO 10211 [5] durchgeführt. Bei Bauteilkomponenten, die aus thermisch homogenen oder inhomogenen Schichten bestehen und Luftschichten von nicht mehr als 30 cm beinhalten, darf das vereinfachte Verfahren angewandt werden, welches in der DIN EN ISO 6946 festgelegt und beschrieben wird.

Nachdem in dieser Norm bereits ein vereinfachtes kalkulatorisches Verfahren beschrieben ist, das auf einem Widerstandsmodell beruht und das zudem die Berücksichtigung großer Lufträume erlaubt, war es naheliegend, im Rahmen dieses Projekts auf diese Norm zurückzugreifen.

Auf diese Weise war es möglich, das rechnerische Verfahren unter Zugrundelegung der realen Randbedingungen mit den in den messtechnischen Untersuchungen gewonnenen Ergebnissen abzugleichen und so die prinzipielle An-

wendbarkeit zu untersuchen. Davon ausgehend konnte anschließend ein Verfahren zur Berücksichtigung der langwelligen Strahlungstransmission entwickelt und mit den Messwerten abgeglichen werden.

### **Berechnungsverfahren g-Wert**

Die DIN EN 410:2011 legt ein Verfahren zur Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von planparallelen Verglasungen fest. Sie beschränkt ihren Anwendungsbereich auf lichtdurchlässige Materialien und schließt Materialien aus, welche eine nennenswerte Transmission im Wellenlängenbereich von 5  $\mu\text{m}$  bis 50  $\mu\text{m}$  aufweisen, was bei ETFE durchaus der Fall ist. Jedoch bietet sie zur Bestimmung eines repräsentativen Vergleichswerts unterschiedlicher Membrankissen-Konstruktionen hinsichtlich ihres charakteristischen Gesamtenergiedurchlassgrads grundlegend ein geeignetes Bemessungsverfahren. Trotz des spezifischen Anwendungsbereichs von Mehrfachverglasungen, kann das Verfahren als Bemessungsgrundlage angewendet werden.

Der g-Wert oder Gesamtenergiedurchlassgrad ist ein Maß für die Energiedurchlässigkeit eines transparenten Bauteils und wird durch die für den Glasbau geltende DIN EN 410 geregelt. Weiter greifen für die Bemessung von Glas im Bauwesen die DIN EN 673, EN 674, EN 675 und EN 12898, die sich auf die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) und des Emissionsgrades beziehen. Die Energiedurchlässigkeit wird über die vom Bauteil direkt durchgelassene Sonnenstrahlung und die sekundäre Wärmeabgabe nach innen ermittelt [2].

## **3.2 Sensitivitätsanalyse der Berechnungsmodelle**

Die Sensitivitätsanalyse soll den Einfluss der Modellparameter auf das Modellergebnis zeigen und quantifizieren. Dazu wurde jeder eingehende Parameter mit variierenden Werten – bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen – in das Modell eingepflegt. Auf diese Weise kann eine mögliche Schwankung um den zu erwartenden Ergebniswert erfasst werden. Daraus lässt sich ableiten, auf welche Parameter der U-Wert besonders sensibel reagiert. Für die Bemessung von Membrankissen sind dann entsprechend genaue Eingangsinformationen erforderlich, um einen repräsentativen U-Wert zu erhalten.

### **U-Wert**

Die Analyse zeigt, dass das Modell sehr sensibel auf Windeinflüsse, Temperaturänderungen und verschiedene Emissivitäten der Folien reagiert. Diese Parameter sollten bei der Bestimmung des U-Werts bei Membrankissen besonders berücksichtigt werden.



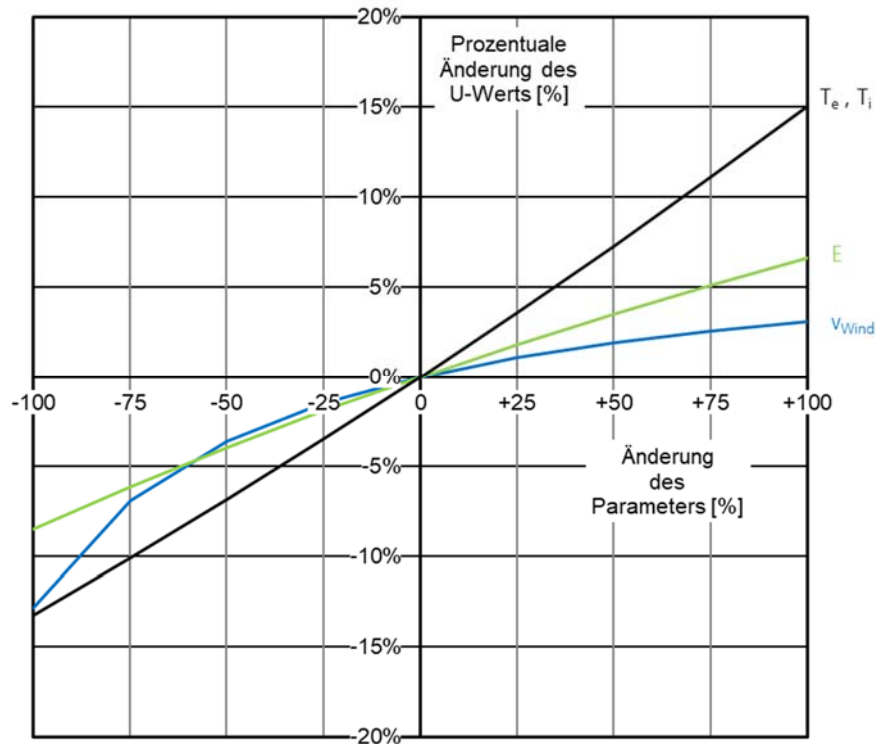


Bild 52:

Sensitivitätsdiagramm – Das Diagramm zeigt die prozentuale Änderung des U-Werts infolge von Änderungen eingehender Modellparameter. Die Definition der Parameter und die entsprechende Größenordnung ihrer Änderung ist in Tabelle 19 beschrieben.

Tabelle 19:

Definition der Parameter: Außentemperatur  $T_e$ , Innentemperatur  $T_i$ , Windgeschwindigkeit  $v_{Wind}$  und Strahlungsaustauschgrad  $E$  zweier gegenüberliegender Folien des äußeren Luftraums.

$T_e$ [°C]	$T_i$ [°C]	$v_{Wind}$ [m/s]	Strahlungsaustauschgrad $E$ [-]	entspricht Änderung [%]
-20	0	0	0,55 starke Bedruckung	-100
-15	5	1	0,60	-75
-10	10	2	0,65	-50
-5	15	3	0,70	-25
0	20	4	0,75 mittlere Bedruckung	±0
+5	25	5	0,80	+25
+10	30	6	0,85	+50
+15	35	7	0,90	+75
+20	40	8	0,95 keine Bedruckung	+100

Der Strahlungsaustauschgrad  $E$  (siehe 3.5.2) bezieht sich auf den äußeren Zwischenraum, der i.d.R. bedruckt ist, wobei der innere Luftraum als unbedruckt mit einem konstanten Strahlungsaustauschgrad von 0,9 angenommen wird. Grau hinterlegte Werte sind Standard-Randbedingungen, die die Bezugsgrößen (Nullpunkt) der Analyse darstellen. Der Nullpunkt der Analyse stützt sich auf einen mittleren Bedruckungsgrad der Außenlage (ca. 50%), vergleichbar mit dem 1. Prüfling, und den normativ vorgeschlagenen Randbedingungen mit einer mittleren thermodynamischen Außentemperatur von 0 °C, einer Innentemperatur von 20 °C und einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s. Ausgehend davon sind die prozentuale Änderung des U-Werts in Abhängigkeit der Änderung der Windgeschwindigkeit von 0 m/s bis 8 m/s sowie die Änderung für verschiedene Temperaturniveaus von  $T_e = -20$  °C,  $T_i = 0$  °C bis zu  $T_e = 20$  °C,  $T_i = 40$  °C und verschiedene Strahlungsaustauschgrade (Tabelle 19) zwischen den Folien, in Abhängigkeit ihrer Emissivität, dargestellt.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt neben der Emissivität der Folienoberflächen den großen Einfluss instationärer Parameter wie die Windgeschwindigkeit und die Temperaturrandbedingungen. Hier bestimmt die innere und äußere Lufttemperatur maßgebend die Wärmeübergangskoeffizienten an der Kissenoberfläche und in den Kissenlufträumen.

### **g-Wert**

Das folgende Diagramm zeigt die prozentuale g-Wert-Änderung aufgrund variierender Wärmeübergänge in Abhängigkeit der Einflussfaktoren Temperatur, Windgeschwindigkeit und thermischer Emissivität. Hier wird deutlich, dass die jeweilige Änderung der untersuchten Parameter zwar im Rahmen der U-Wert-Bemessung für das Ergebnis ausschlaggebend ist, jedoch auf das Berechnungsergebnis des g-Werts keinen nennenswerten Einfluss hat. Die maßgebliche Abhängigkeit des Bemessungsmodells von den strahlungstechnischen Kenngrößen ist im Folgenden nicht dargestellt, da diese feste Kennwerte darstellen.

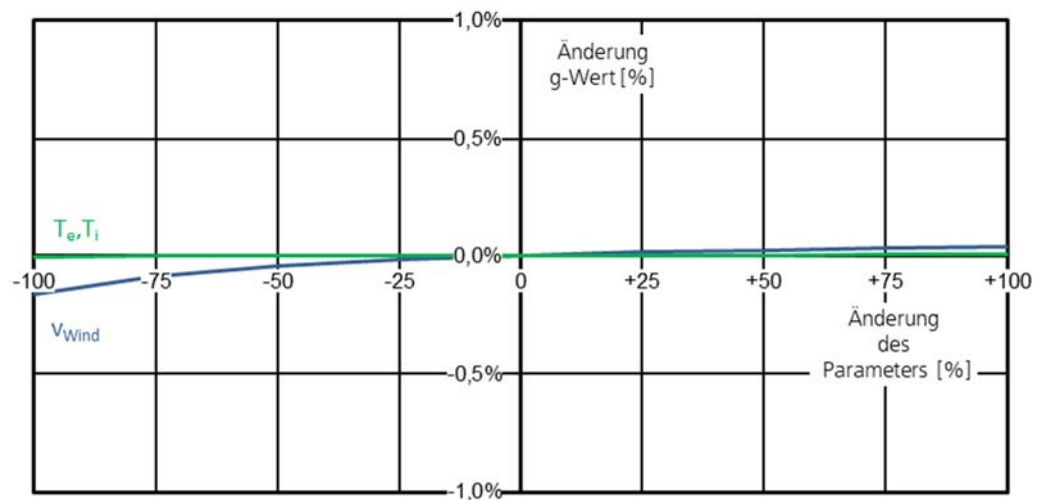


Bild 53:  
Sensitivitätsdiagramm g-Wert.

Da das Modellergebnis nicht nennenswert von instationären Parametern beeinflusst wird und das Verfahren nach EN 410 übereinstimmende Vergleichswerte mit den Messungen liefert, ist keine weitere Betrachtung erforderlich. Somit wurde gezeigt, dass das normative Verfahren auf Membrankissenkonstruktionen ohne Einschränkungen anwendbar ist.

### 3.3 Bestimmung der Temperaturdifferenz über den Luftraum

Durch den großen Einfluss der Randbedingungen wie Temperaturniveau und Windgeschwindigkeit auf den Wärmedurchlasswiderstand der Lufträume (siehe Kapitel 3.2), ist eine genaue Kalkulation der Temperaturdifferenz notwendig, da eine grobe Abschätzung analog zu Anhang B der Norm kein ausreichend repräsentatives Ergebnis für die Kissenlufträume erzielt.

#### Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse der mittleren Temperaturen aller Messreihen zeigt den linearen Zusammenhang zwischen der Gesamttemperaturdifferenz über das Kissen  $dT_{i-e}$  und den Temperaturdifferenzen über die einzelnen Lufträume  $dT_{gi}$ .

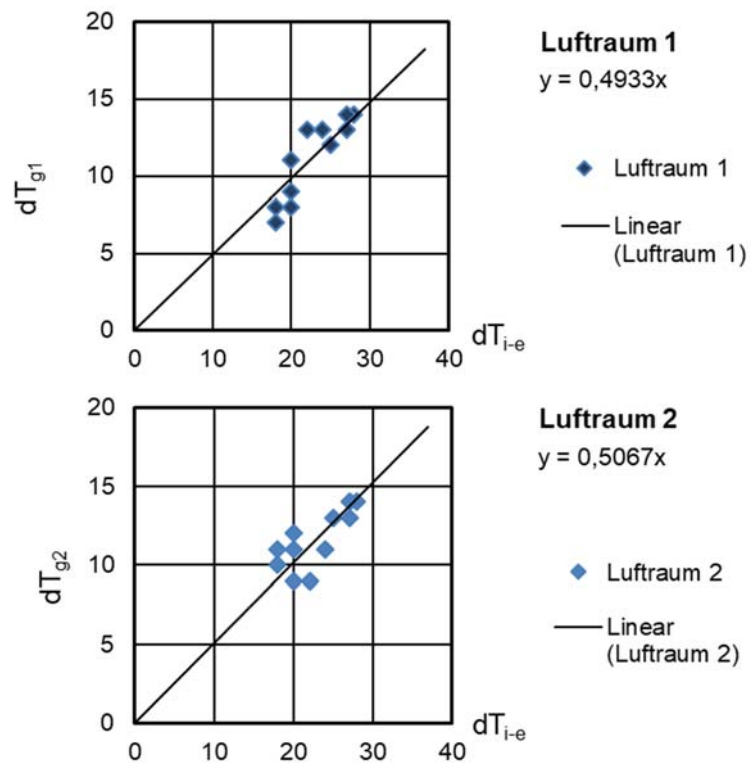


Bild 54:

Gemessener Anteil der luftraumumschließenden Oberflächen-Temperaturdifferenzen des ersten und zweiten Luftraums an der Oberflächen-Temperaturdifferenz über ein gesamtes 3-lagiges Kissen.

Erstaunlich ist hierbei die Erkenntnis, dass die Position der mittleren Lage, die entweder von der Mitte weg nach außen oder innen geschlagen sein kann, keinen erkennbaren Einfluss hat.

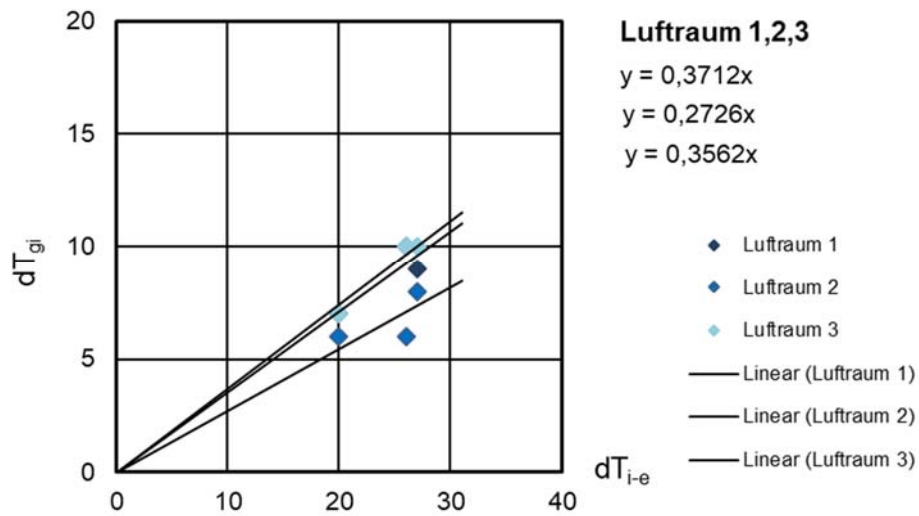


Bild 55:

Gemessener Anteil der luftraumumschließenden Oberflächen-Temperaturdifferenzen des ersten, zweiten und dritten Luftraums an der Oberflächen-Temperaturdifferenz über ein gesamtes 4-lagiges Kissen.

Auch das 4-lagige Kissen zeigt die klare Tendenz eines linearen Temperaturverlaufs über die Lufträume. Aufgrund der wenigen zur Verfügung stehenden Messdaten von 4-lagigen Kissen, ist eine hinreichende Validierung des Ergebnisses aber nicht möglich.

Die Analyse der Messdaten zeigt, dass sich die Temperaturdifferenzen über jeden Luftraum des Kissens – unabhängig von seiner Lage und Ausdehnung – im Verhältnis zur Gesamttemperaturdifferenz über die Konstruktion gleich verteilen. Somit ist nach Festlegung des Temperaturniveaus  $T_e$  und  $T_i$  die Temperaturdifferenz über die einzelnen Lufträume nach Gleichung (3) eindeutig bestimmbar.

### Kalkulationsverfahren für Lufträume

Zur Bemessung der Temperaturdifferenz über einen Luftraum von Membrankissen muss das Verfahren der ISO 6946 Anhang B mit folgender Gleichung ergänzt werden:

$$\Delta T_{g,i} = (T_i - T_e) \cdot f_{\Delta T g,i} \quad [\text{K}] \quad (3)$$

$\Delta T_{g,i}$  Temperaturdifferenz über den i-ten Luftraum

$f_{\Delta T g,i}$  Kalkulationsfaktor für den i-ten Luftraum

Tabelle 20:  
Kalkulationsfaktor  $f_{\Delta T g, i}$  zur Bestimmung der Temperaturdifferenz über einen Luftraum  $\Delta T_{g, i}$  für 3- und 4- lagige Kissenbauten.

Kissenaufbau \ K-Faktor	3-lagig	4-lagig
$f_{\Delta T g 1}$	0,50	0,33
$f_{\Delta T g 2}$	0,50	0,33
$f_{\Delta T g 3}$	-	0,33

Entsprechend gilt für ein n-lagiges Kissen für den i-ten Luftraum mit  $i = 1 \dots n$  :

$$f_{\Delta T g, i} = \frac{1}{n-1} \quad [-] \quad (4)$$

### 3.4 Instationäre Randbedingungen und Monatsbilanzverfahren

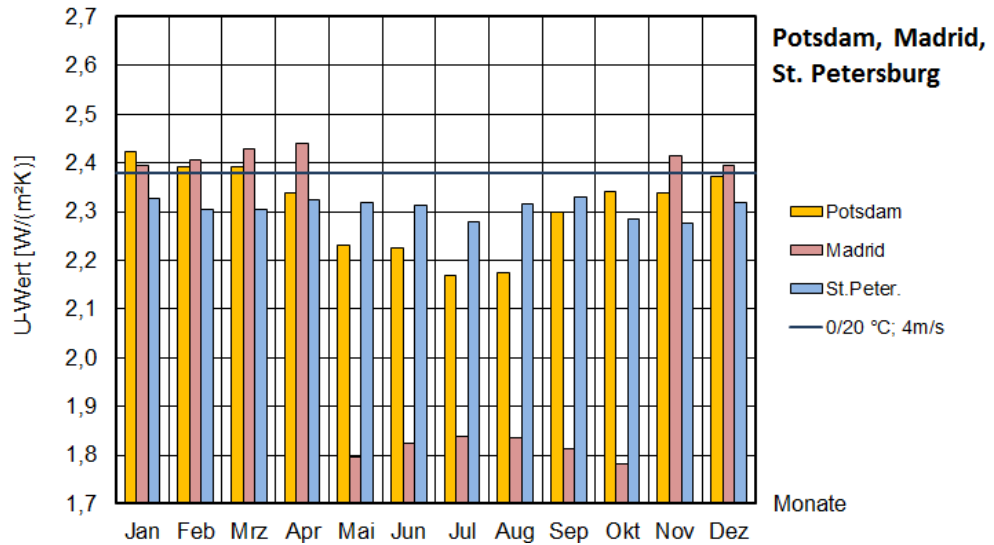
Die Sensitivitätsanalyse zeigt den großen Einfluss der über ein Jahr stark schwankenden Randbedingungen auf eine Membrankissenkonstruktion. Hinsichtlich der zu erwartenden Schwankungen des U-Werts wurde der Verlauf des Wärmedurchgangs genauer betrachtet, um eine Aussage zur energetischen Bewertung für weiterführende Berechnungen der TGA treffen zu können.

#### 3.4.1 Zeitlicher U-Wert-Verlauf über ein Jahr

Der Verlauf des berechneten U-Werts über ein Jahr, basierend auf den TRY-Wetterdaten von Potsdam – bzw. Madrid, Spanien und St. Petersburg, Russland – zeigt große Schwankungen um den jahresdurchschnittlichen U-Wert. Auch je nach Standortbedingungen sind sehr unterschiedliche Werte und Verläufe zu erwarten.

Bild 56 zeigt den jährlichen U-Wert-Verlauf eines 3-lagigen, transparenten Membrankissens in horizontaler und vertikaler Einbaulage an den drei Standorten. Hier wurden eine konstante Innenraumtemperatur von 20 °C festgelegt und mithilfe der standortbezogenen Wetterdaten (Stündlich gemessene Außentemperatur und Windgeschwindigkeit) die monatlichen U-Werte berechnet.

### Horizontale Einbaulage, $T_i=20^\circ\text{C}$



### Vertikale Einbaulage, $T_i=20^\circ\text{C}$

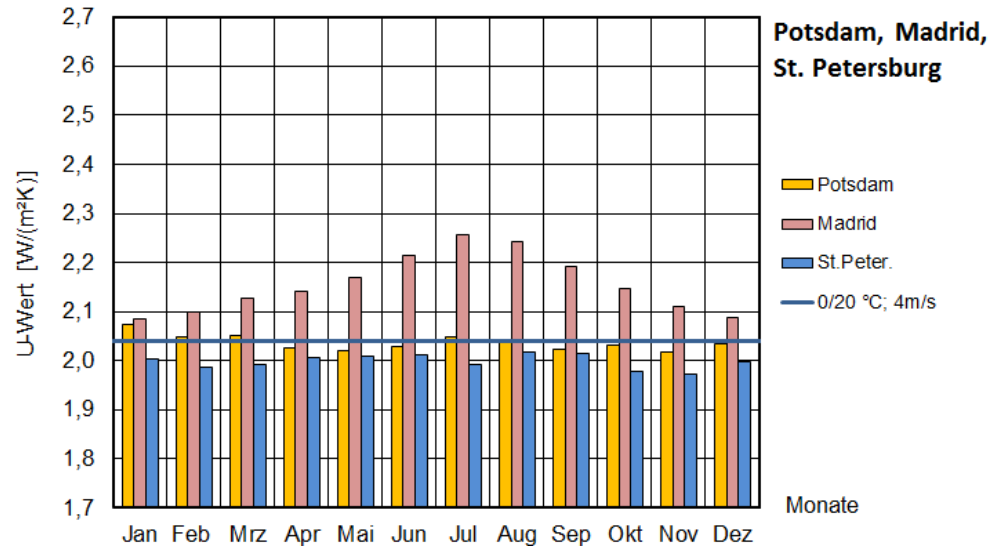


Bild 56:

Monatsbilanz U-Wert im Vergleich der Standorte Potsdam, Madrid, St. Petersburg.

Als Vergleichswert wurde der zu erwartende U-Wert bei normativen Standardwerten  $T_e = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_i = 20^\circ\text{C}$  und  $v_{\text{Wind}} = 4\text{ m/s}$  berechnet.

#### Potsdam

Für die vertikale Einbaulage zeigt sich ein relativ konstanter U-Wert über das Jahr, der sich im Mittel dem Standardwert annähert. Die leicht erhöhten U-Werte über die Wintermonate sind auf die verstärkte Windsituation und der größeren Temperaturdifferenz über die Kissenkonstruktion zurückzuführen.

Für eine horizontale Einbaulage ergeben sich Schwankungen um den Jahresmittelwert von  $\pm 6\%$ . Hier können im Sommer verbesserte U-Werte erwartet werden aufgrund eines umgekehrten Wärmestroms durch das Bauteil nach innen. Liegen hohe Außentemperaturen vor und ist folglich  $T_e > T_i$ , reduziert sich die konvektive Wärmeübertragung über das Kissen sehr stark und der Wärmeeintrag nach innen verringert sich.

Die Analyse zeigt, dass der stationär bestimmte U-Wert basierend auf normativen Standardwerten annähernd dem Jahresmittel entspricht. Hier ist das richtige Temperaturniveau entsprechend dem Standort zu wählen. Für den Standort Potsdam lässt sich so ein repräsentativer U-Wert mit  $T_e = 0\text{ °C}$  und  $T_i = 20\text{ °C}$  bestimmen.

#### Madrid

In vertikaler Einbaulage zeichnen sich hier im Sommer wesentlich höhere U-Werte als in Potsdam ab, da durch das heiße Außenklima die Temperaturdifferenz über das Bauteil zunimmt. Die minimale Temperaturdifferenz in den milden Wintermonaten bedingt jedoch verbesserte U-Werte.

In horizontaler Einbaulage stellen sich im jährlichen Verlauf massive Schwankungen ein. Im Winter verhält sich der U-Wert vergleichbar dem Standort Potsdam, jedoch kehrt sich hier der Wärmestrom durch die Konstruktion schon im Mai um und es findet ein reduzierter Wärmeeintrag in den Innenraum über die heißen Sommermonate statt.

#### St. Petersburg

Das kühle Klima in der russischen Stadt führt trotz der im Vergleich zu Potsdam größeren Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außentemperatur v.a. im Winter durch niedrige Oberflächentemperaturen zu reduzierten Wärmeübergangskoeffizienten an der Kissenkonstruktion. Auch die Schwankungen im Jahresverlauf fallen geringer aus, da der Wärmestrom ganzjährig immer nach außen gerichtet ist.

### **3.4.2 Monatsbilanzverfahren und Schlussfolgerungen**

Nachdem sich im Lauf des Projekts herausgestellt hat, dass das in der DIN EN ISO 6946 zugrunde gelegte Widerstandsmodell für die wärmetechnische Bemessung von Membrankissen-Konstruktionen grundsätzlich geeignet ist, wurde die Entwicklung eines eigenen Monatsbilanzverfahrens obsolet. Mit der besagten Norm ist es möglich, den U-Wert auch in zeitlicher Auflösung zu berechnen, indem die jeweils anliegenden oder gemittelten Randbedingungen der Berechnung zugrunde gelegt werden. Wie aus der Sensitivitätsanalyse hervor geht, reagieren Membrankissen sensibel auf die veränderlichen Faktoren Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, Temperaturniveau und Windgeschwindigkeit. Auf Basis dieser Faktoren lassen sich die U-Werte an Membran-



kissen demnach sowohl im jahreszeitlichen Mittel als auch bezogen auf beliebige Zeiträume abbilden. Neben einer Monatsbilanz wäre so auch eine instationäre Betrachtung in stündlicher Auflösung möglich. Die Ermittlung des mittleren U-Werts je Monat ist deshalb mit dem zur Verfügung stehenden Verfahren bereits möglich (siehe Kapitel 3.4.1). Ein Monatsbilanzverfahren kann aus der bestehenden Norm abgeleitet werden.

### **Vergleichswert für Bauteile**

Um einen bauteilspezifischen Vergleichswert für verschiedene Membrankissenkonstruktionen zu erhalten, müssen festgelegte klimatische Randbedingungen im Bewertungsverfahren zugrunde gelegt werden. Durch eine standardisierte, fest vorgegebene Innen- und Außentemperatur sowie Windanströmung können einheitliche Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt und ein repräsentativer U-Wert berechnet werden, der verschiedene Konstruktionen untereinander vergleichbar macht. Hier sind die bisher verwendeten normativen Standardwerte mit einer Außentemperatur von 0 °C, einer Innentemperatur von 20 °C und einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s sinnvoll.

### **Bemessungswert für TGA**

Wird der U-Wert jedoch als Bemessungswert für weiterführende energetische Berechnungen benötigt, sollten die Randbedingungen denen der entsprechenden Einbausituation angeglichen werden. Hier sind folgende Eingangsparameter besonders zu berücksichtigen:

- Einbaulage (Neigung)
- Zu erwartende Windgeschwindigkeiten (geographische Lage)
- Geplante Nutzung (Temperaturniveau)

Für ein optimiertes Berechnungsverfahren wäre hier die Entwicklung eines softwarebasierten Planungs-Tools sinnvoll, das auf Basis von TRY und entsprechenden Randbedingungen einen U-Wert und dessen Variation ermitteln kann.

## **3.5 Berücksichtigung der IR Transmission**

Da sich der Anwendungsbereich der DIN EN ISO 6946 auf opake Bauteile ohne Transmission im Infrarotbereich beschränkt, ist die thermische Transmission der ETFE-Folien zusätzlich zu berücksichtigen.

Die in Anhang B zu verwendende Emissivität (Absorption) der Bauteiloberflächen wird nach den Kirchhoffschen Strahlungsgesetz für opake Bauteile mit  $\alpha = 1 - \rho$  bestimmt.

Zur Berücksichtigung des transmittierten Strahlungsanteils bei Membrankissen gilt hier analog  $\alpha = 1 - \rho - \tau$  für transparente ETFE-Folien.

### 3.5.1 Korrigierter Emissionsgrad

Der Emissionsgrad  $\varepsilon'_i$  einer Folienoberfläche  $i$  kann entsprechend ihrer Transmission  $\tau_i$  mit folgender Gleichung vereinfacht korrigiert werden:

$$\varepsilon_i'^* = \varepsilon'_i + \varepsilon_{i-1}' \cdot \tau_i \quad [-] \quad (5)$$

$\varepsilon'_i$  Emissionsgrad der Folie  $i$  gegen die Richtung der auftretenden Strahlung

$\varepsilon_i'^*$  korrigierter Emissionsgrad mit Berücksichtigung des Transmissionsgrades

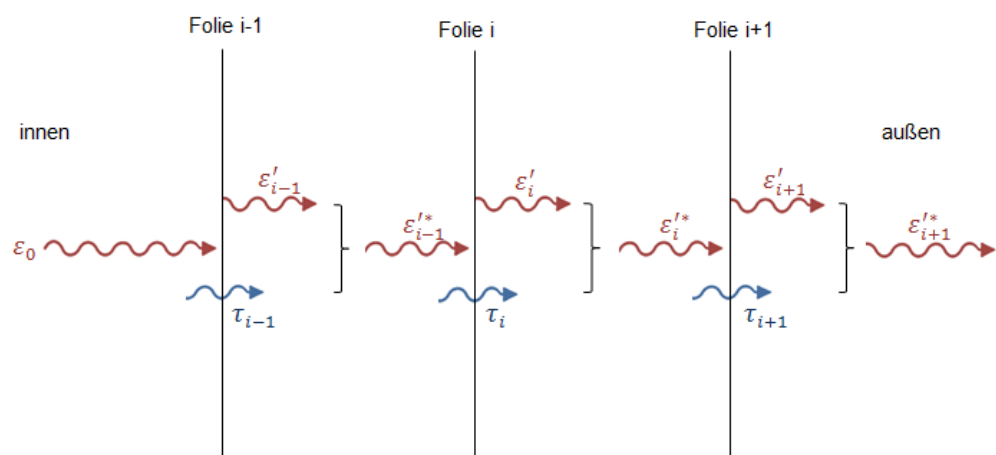


Bild 57:  
Korrigierter Emissionsgrad der  $i$ -ten Lage

### 3-lagiger Aufbau

Für eine 3-lagige Membrankissenkonstruktion lässt sich der korrigierte Emissionsgrad unter Berücksichtigung der transmittierten Strahlung somit folgendermaßen bestimmen:

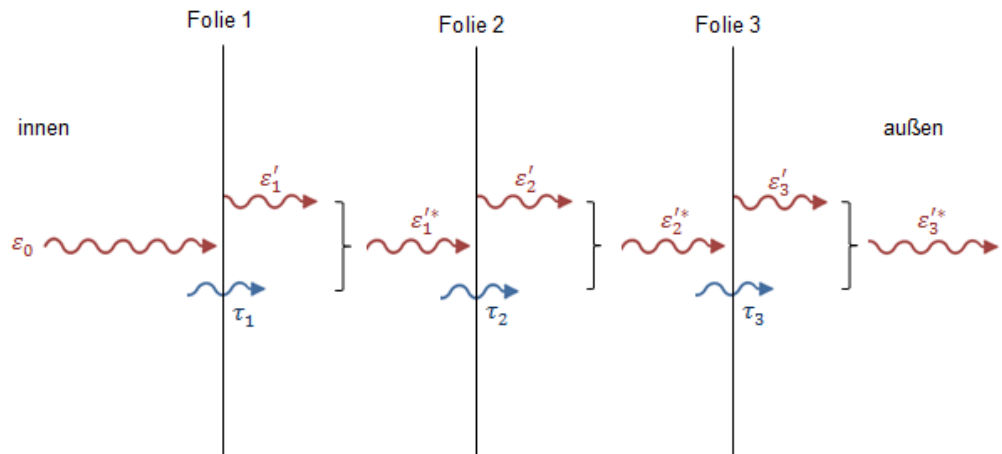


Bild 58:  
Schematische Skizze des korrigierten Emissionsgrads bei Berücksichtigung der Transmission eines 3-lagigen Kissens.

$$\text{Folie 3} \quad \varepsilon_3'^* = \varepsilon_3' + \varepsilon_2'^* \cdot \tau_3 \quad [-] \quad (6)$$

$$\text{Folie 2} \quad \varepsilon_2'^* = \varepsilon_2' + \varepsilon_1'^* \cdot \tau_2 \quad [-] \quad (7)$$

$$\text{Folie 1} \quad \varepsilon_1'^* = \varepsilon_1' + \varepsilon_0 \cdot \tau_1 \quad [-] \quad (8)$$

Somit erhält man nach Einsetzen von Gleichung (7), (8) und (9) für die äußerste Folie:

$$\text{Folie 3} \quad \varepsilon_3'^* = \varepsilon_3' + (\varepsilon_2' + (\varepsilon_1' + \varepsilon_0 \cdot \tau_1) \cdot \tau_2) \cdot \tau_3$$

$$\text{oder} \quad \varepsilon_3'^* = \varepsilon_3' + \varepsilon_2' \cdot \tau_3 + \varepsilon_1' \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 + \varepsilon_0 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \quad [-] \quad (9)$$

Der korrigierte Emissionsgrad gegen die Richtung der auftreffenden Strahlung:

Für 4-lagige Kissenbauten gilt analog:

$$\text{Folie 4} \quad \varepsilon_4'^* = \varepsilon_4' + (\varepsilon_3' + (\varepsilon_2' + (\varepsilon_1' + \varepsilon_0 \cdot \tau_1) \cdot \tau_2) \cdot \tau_3) \cdot \tau_4 \quad [-] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{oder} \quad \varepsilon_4'^* &= \varepsilon_4' + \\ &\quad \varepsilon_3' \cdot \tau_4 + \\ &\quad \varepsilon_2' \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 + \\ &\quad \varepsilon_1' \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 + \\ &\quad \varepsilon_0 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 \end{aligned}$$

### n-lagiger Aufbau

Allgemein gilt für den korrigierten Emissionsgrad der n-ten Lage: [-] (11)

$$\varepsilon_n'^* = \varepsilon_n' + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{n-i}' \cdot \prod_{j=1}^i \tau_{n+1-j}$$

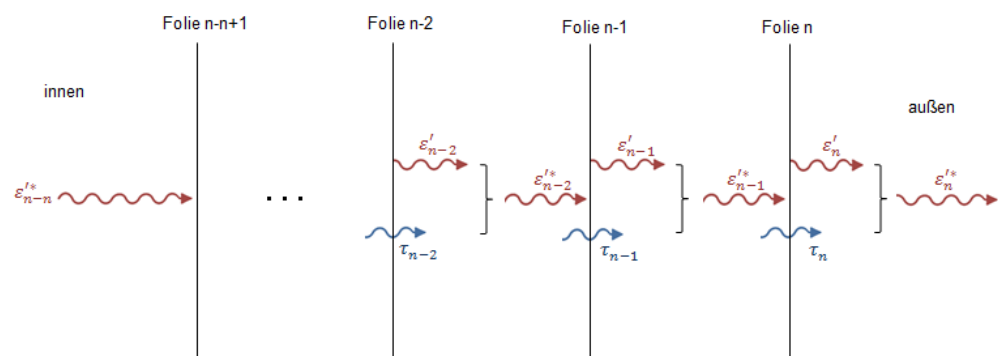


Bild 59:

Schematische Skizze des korrigierten Emissionsgrads bei Berücksichtigung der Transmission eines n-lagigen Kissens.

Dabei ist  $\varepsilon_{n-n}'^* = \varepsilon_0$ , wobei  $\varepsilon_0$  der Emissionsgrad der Umgebung des Innenraums ist. In der Regel kann hier eine Emission zwischen 0,9 - 1,0 angesetzt werden. Für den Emissionsgrad in Richtung der auftreffenden Strahlung  $\varepsilon_i'^*$  gelten analog Gleichungen (6). Hier kann vereinfachend für  $\varepsilon_0$  der Außenumgebung (Himmel) ein Emissionsgrad von 1,0 angesetzt werden.

Für die verschiedenen Folien der Prüfkörper ist der korrigierte Emissionsgrad in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 21:  
Korrigierte Emissivität  $\epsilon^*$  der Membranfolien.

Kissen	Aufbau	Folienseite	$\epsilon$	$\tau$	$\epsilon^*$	
MEM1	Nowofol 250 $\mu\text{m}$	Standard Silber 01249	unbedruckt	0,90	0,05	0,95
		50% Dekor 9212 16 mm Punkte	bedruckt	0,75		0,80
	AGC 150 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,83	0,12	0,94
				0,83		0,93
	AGC 250 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,88	0,07	0,94
			0,88		0,94	
MEM2	Nowofol 250 $\mu\text{m}$	Standard Silber 01249	unbedruckt	0,90	0,04	0,94
		89% Dekor 9229 Hexagonal 9:89	bedruckt	0,64		0,68
	AGC 150 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,83	0,12	0,94
				0,83		0,91
	AGC 250 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,88	0,07	0,94
			0,88		0,94	
MEM3	Nowofol 250 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,88	0,07	0,95
				0,88		0,95
	AGC 150 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,83	0,12	0,94
				0,83		0,94
	AGC 250 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,88	0,07	0,94
			0,88		0,95	
MEM4	Nowofol 250 $\mu\text{m}$	Standard Silber 01249	unbedruckt	0,9	0,05	0,95
		50% Dekor 9212 16 mm Punkte	bedruckt	0,75		0,80
	AGC 150 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,83	0,12	0,94
				0,83		0,93
	AGC 250 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,88	0,07	0,95
				0,88		0,94
AGC 250 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,88	0,07	0,94	
			0,88		0,95	
MEM5	Nowofol 250 $\mu\text{m}$	Intensiv Silber 78100	unbedruckt	0,91	0,04	0,95
		49% Dekor 928481 8 mm Punkte	bedruckt	0,73		0,77
	AGC 150 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,83	0,12	0,94
				0,83		0,92
	AGC 250 $\mu\text{m}$	transparent	beidseitig	0,88	0,07	0,94
			0,88		0,94	

### 3.5.2 Korrigierter Strahlungsaustauschgrad

Der Strahlungsaustauschgrad  $E$  zur Bestimmung des radiativen Wärmeübergangskoeffizienten wird für opake Bauteile nach ISO 6946 Anhang B berechnet mit:

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad [-] \quad (12)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  Emissionsgrade der den Luftraum begrenzenden Oberflächen der Folien 1 und 2

Analog kann diese Gleichung für Membrankissen verwendet werden, wobei hier der korrigierte Emissionsgrad  $\varepsilon^*$  eingesetzt werden muss.

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1^*} + \frac{1}{\varepsilon_2^*} - 1} \quad [-] \quad (13)$$

$\varepsilon_i^*$  korrigierter Emissionsgrad mit Berücksichtigung der Transmission der Folie  $i$  (siehe Kapitel 3.5.1)

$\varepsilon_i^{(r)}$  Emissionsgrad in (gegen) die Richtung der auftreffenden Strahlung der Folie  $i$

### 3.5.3 Einfluss der transmittierten Strahlung auf den U-Wert

Die messtechnischen Untersuchungen bestätigen, dass die im Sinne eines einfachen Modells definierte Korrektur der Emissivität zur Berücksichtigung zweckmäßig ist. Bild 60 zeigt den Einfluss der transmittierten Strahlung auf das Endergebnis. Hier wurden die ausgewerteten U-Werte aus der Kalorimetrie mit den jeweils gemessenen Randbedingungen nachgerechnet. Dabei wurde die Transmission der Folien nach Gleichung (11) berücksichtigt. Als Orientierungswert dient der zu erwartende U-Wert nach Standard-Randbedingungen  $T_e = 0 \text{ °C}$ ,  $T_i = 20 \text{ °C}$  und  $v_{Wind} = 4 \text{ m/s}$ .

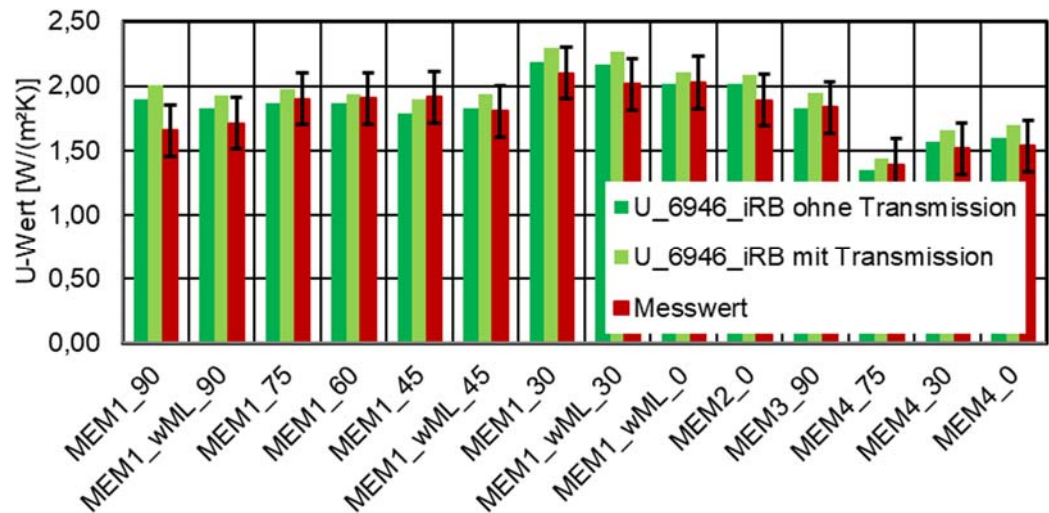


Bild 60:  
U-Werte nach gemessenen Randbedingungen ohne und mit Transmission im Vergleich zu Messwerten.

### 3.5.4 Validierung der Transmissionskorrektur

Der definierte vereinfachte Ansatz zur Berücksichtigung der langwelligen Strahlungstransmission wurde anhand eines komplexen physikalischen Modells unter Berücksichtigung der Mehrfachreflexionen und der sich ergebenden Wärmestrombilanz validiert (Bild 61). Diese genaue Wärmestrombilanzierung zeigt, dass sich bei Berücksichtigung der transmittierten Strahlung der U-Wert im Mittel um 8 % erhöht. Durch die vereinfachte Korrektur des Emissionsgrades nach Kapitel 3.5.1 ergibt sich ein ebenso großer Aufschlag auf einen standardmäßig berechneten U-Wert nach Norm ohne Berücksichtigung der Transmission. Wie sich zeigen ließ, ist eine hinreichend genaue Berechnung des U-Werts von Membrankissen aus ETFE mit der DIN EN ISO 6946 möglich, wenn zudem die langwellige Strahlungstransmission nach dem in Kapitel 3.5 beschriebenen Verfahren in der Berechnung berücksichtigt wird (Bild 62).

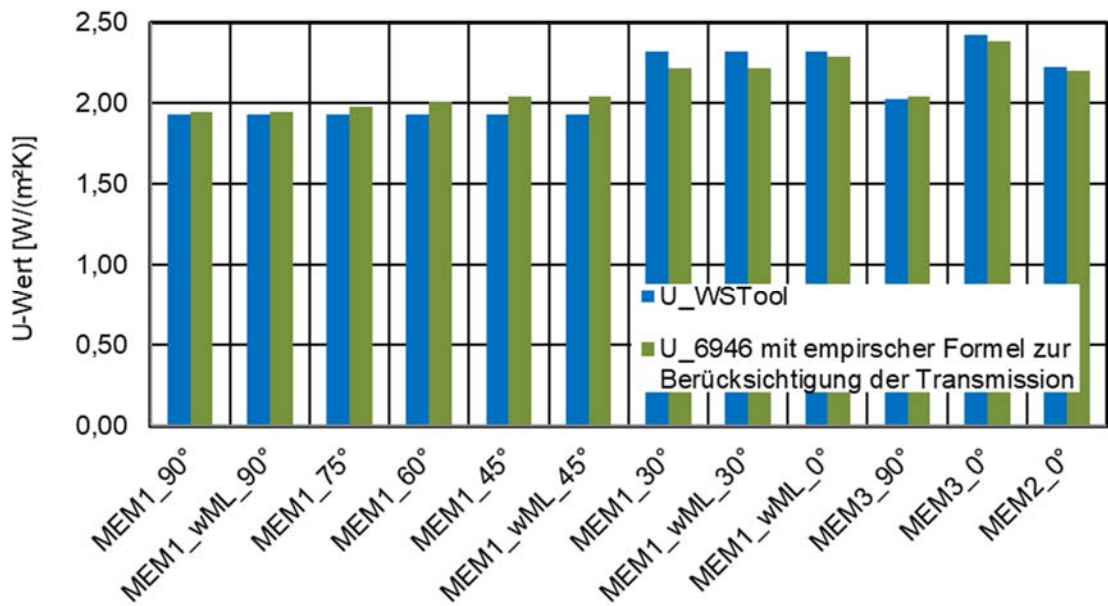


Bild 61:  
U-Werte nach Wärmestrombilanzierungs-Tool im Vergleich zu Berechnung nach Norm und Korrektur der Emissivität.

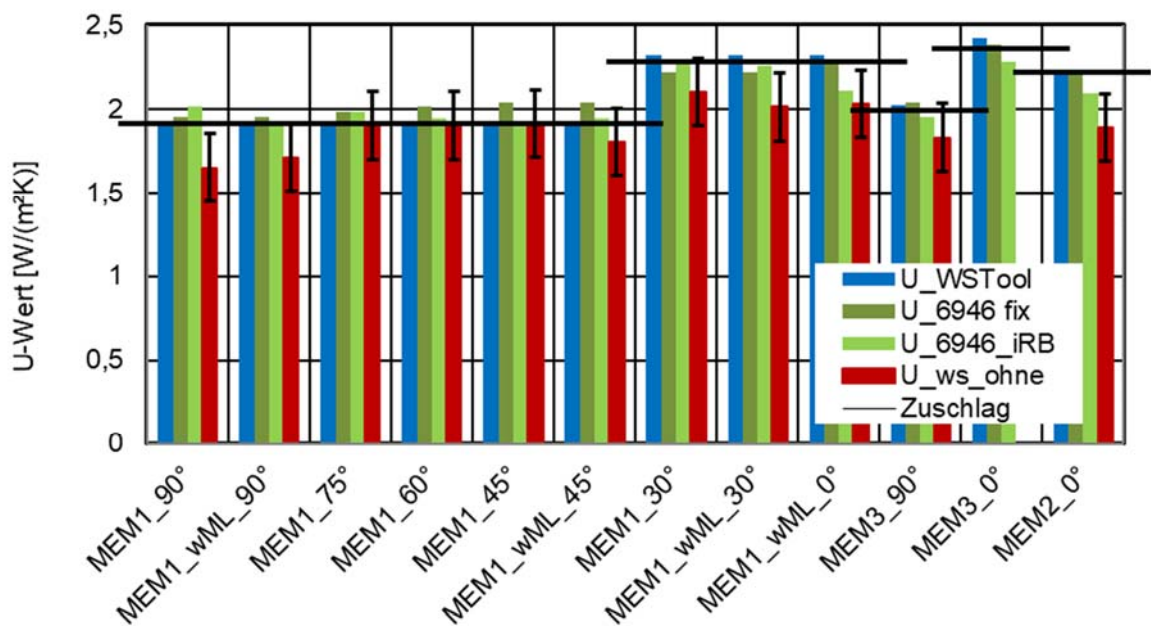


Bild 62:  
Vergleich U-Werte nach Wärmestrombilanzierungs-Tool (U\_WSTool), Messwerten (U\_ws\_ohne), Normbedingungen (U\_6946 fix) und gemessenen Randbedingungen (U\_6946\_iRB).



## 4 Ergebnisse und Validierung des Berechnungsverfahrens

### 4.1 Validierung der g-Wert Berechnung

Für die Berechnung des g-Werts stehen prinzipiell zwei Normen zur Verfügung, die für die Anwendung auf Membrankissen infrage kommen. Zum einen kann auf die DIN EN ISO 52022 (früher DIN EN 13363 Teil 2) zurückgegriffen werden. Zum anderen steht die DIN EN 410 zur Verfügung. Das vereinfachte Berechnungsverfahren der DIN EN 410 zeigt in Rahmen einer Sensitivitätsanalyse kaum Einfluss des g-Wert-Ergebnisses auf veränderliche Eingangsparameter. Da im Rahmen des Projekts alle wesentlichen Randbedingungen sowie die spektralen Kennwerte der Folien erfasst worden sind, konnte das vereinfachte Berechnungsverfahren der EN 410 als Validierungsgrundlage für 3-lagige Kissen verwendet werden. Für mehrlagige Kissenbauten wurde stattdessen auf die EN 13363 zurück gegriffen. Beide Normen liefern allerdings dieselben Ergebnisse. Im Zuge der Validierung wurden die berechneten Ergebnisse mit den im multifunktionalen Dachprüfstand unter realen Bedingungen gemessenen Werten verglichen. Dabei zeigen die Messergebnisse im Rahmen der Messgenauigkeit eine große und hinreichend gute Übereinstimmung mit den normativ berechneten Werten (siehe Bild 63).

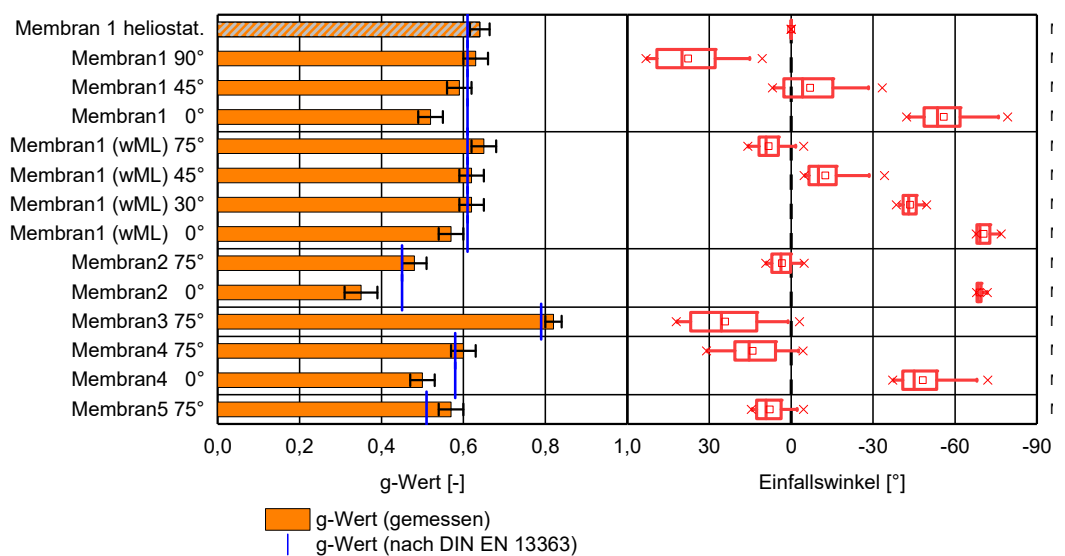


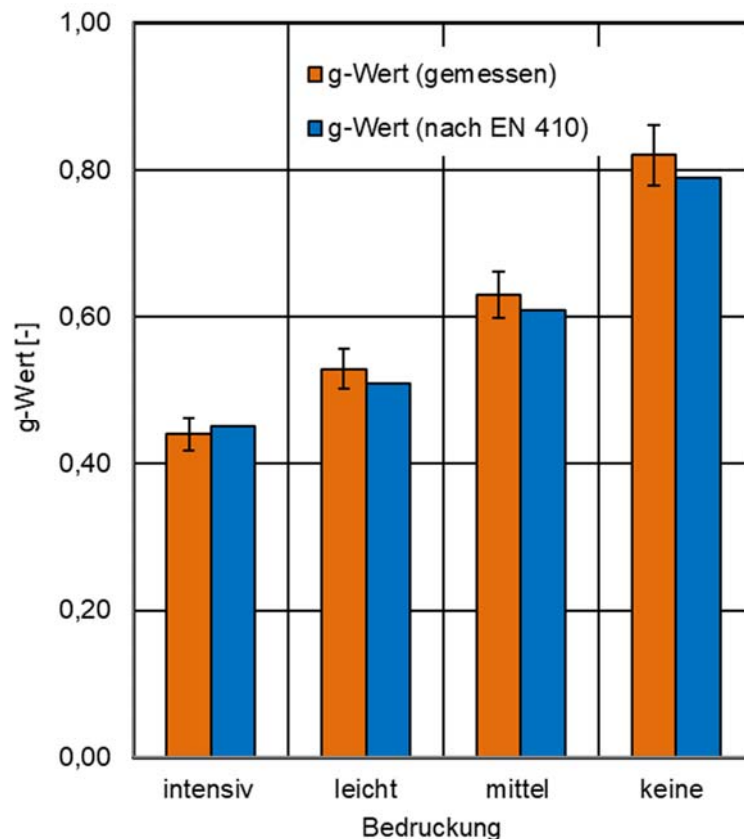
Bild 63:

G-Wert Messergebnisse aller untersuchten Prüflinge in verschiedenen Neigungen im Vergleich zum normativ bestimmten g-Wert.

Bild 63 zeigt die Messergebnisse aller Prüfaufbauten in verschiedenen Neigungen der Kissen. Die Unsicherheit des Messergebnisses ist als einfache Standardunsicherheit angegeben. Dazu sind die jeweils normativ bestimmten g-Werte nach DIN EN 13363 als Vergleichswerte angegeben. Zudem ist der Einfallswinkel der Einstrahlung der jeweiligen Messung angegeben. Hier zeigt sich eine

leicht abweichende Tendenz vom Normwert bei flacheren Einfallswinkeln, also horizontale Flächen in unseren Breiten in den Wintermonaten.

In Abhängigkeit der spektralen Eigenschaften der Folien, reduziert sich der g-Wert bei zunehmender Bedruckungsdichte. Bild 64 zeigt die Messergebnisse im Vergleich zu den berechneten g-Werten nach DIN EN 410. Auch hier stimmen die Ergebnisse im Rahmen der einfachen Standardabweichung sehr gut überein.



Bedruckung	DIN EN 410	Messwert
1 intensiv	0,45	0,44 ±0,02
2 leicht	0,51	0,53 ±0,02
3 mittel	0,61	0,63 ±0,01
4 keine	0,79	0,82 ±0,02

Bild 64: Messergebnisse des g-Werts bei 3-lagigen Kissenbauten mit unterschiedlich starker Bedruckung im Vergleich mit Rechenergebnissen nach DIN EN 410.

Für 3-lagige Membranaufbauten ist die DIN EN 410 uneingeschränkt anwendbar und bildet den g-Wert hinreichend genau ab. Werden Kissen mit mehr als drei Lagen oder Kissen mit Verschattungsmöglichkeiten berechnet, sollte die

DIN EN ISO 52022 heran gezogen werden. Trotz der vereinfachenden Annahme planparalleler Schichten und einem nahezu lotrechten Strahlungseinfall, können beide Norme ohne Einschränkungen oder zusätzliche Berücksichtigung membranspezifischer Eigenschaften angewendet werden, um einen repräsentativen und als Vergleichswert nutzbaren g-Wert für Membrankissenkonstruktionen zu bestimmen.

## 4.2 Validierung der U-Wert Berechnung

Zur Validierung des U-Werts wurde das vereinfachte Berechnungsverfahren der DIN EN ISO 6946 zugrunde gelegt, weil es für die Berücksichtigung der gemessenen Randbedingungen besser geeignet erschien als die ebenfalls verfügbare DIN EN 673. So konnten die Eingangsparameter der Berechnung neben den normativen Standard-Werten von  $T_e = 0^\circ$ ,  $T_i = 20^\circ$  und  $v_{Wind} = 4 \text{ m/s}$  auch durch die verschiedenen, gemessenen Randbedingungen ersetzt werden. Bild 65 zeigt die Auswertung der U-Wert Ergebnisse aus den ausgewerteten Messwerten der Wärmestrom-Mess-Scheiben im Vergleich zu den nach Norm errechneten U-Werten mit Standardrandbedingungen sowie auf Basis der gemessenen Randbedingungen jeweils mit und ohne Berücksichtigung der langwelligigen Transmission.

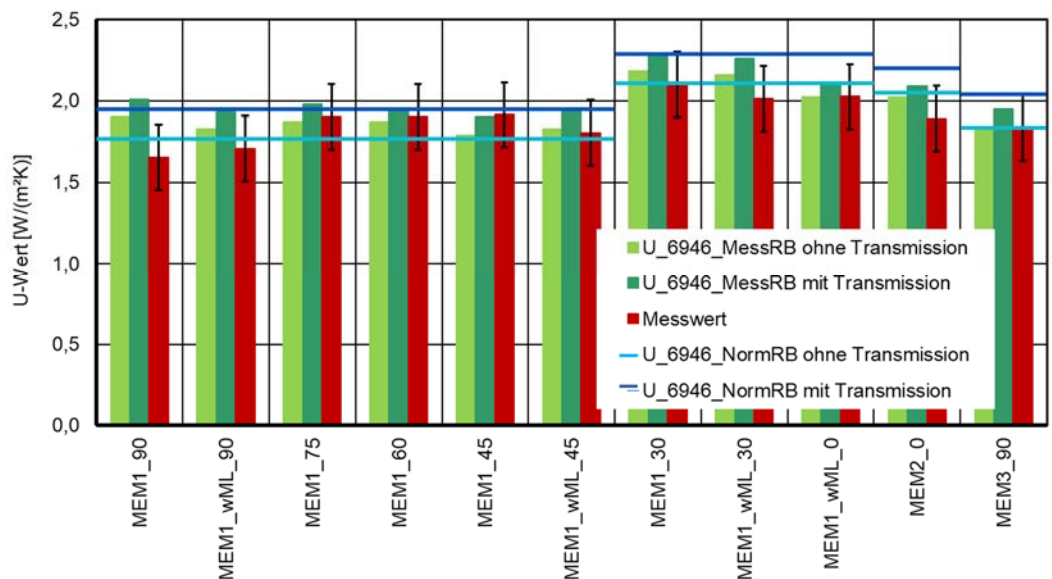


Bild 65:  
U-Wert Messergebnisse aller gemessenen Kissenbauten in unterschiedlichen Neigungen.

Wie in Bild 65 zu sehen und unter Kapitel 3.5 beschrieben, ist der Unterschied der U-Werte mit und ohne Berücksichtigung der langwelligigen Transmission nicht sehr groß. Er liegt, im Wesentlichen abhängig vom Bedruckungsgrad, bei

bis zu 10 %. Damit ist dieser Unterschied deutlich geringer als die Unsicherheit der gemessenen Werte (siehe Bild 65).

Bei der messtechnischen Untersuchung der Membrankissen-Elemente im kalorimetrischen Prüfstand hatte sich leider herausgestellt, dass das verfügbare kalorimetrische Messverfahren, obwohl es prinzipiell hoch genau messen kann, für die sensibel auf äußere Bedingungen reagierenden Membrankissen einerseits zu träge reagiert und sich andererseits bereits kleine Randeinflüsse merklich auf die Messwerte auswirken. Für die weitere messtechnische Validierung der Ergebnisse wurde deshalb auf die Messwerte der Wärmefluss-Messscheibe zurückgegriffen. Allerdings bedürfen auch diese Werte einer Interpretation, um die erkennbare Abweichung von den rechnerisch ermittelten Werten zu erklären. Zum einen sind diese Messfühler nicht durchlässig für langwellige Strahlung, weshalb sie also eher mit den Werten korrelieren, die ohne Berücksichtigung der langwelligen Transmission ermittelt wurden. Zum anderen beeinflussen die Wärmefluss-Messscheiben durch ihre eigene Masse und ihren, wenn auch geringen, thermischen Widerstand den Wärmedurchgang durch die dünnen Membranen. Zudem ist auch nicht klar, ob und wie sich die Kissenneigung und infolge dessen das konvektive Verhalten des Luftraums im Kissen auf das Messergebnis auswirkt. Erkennbar ist allerdings, dass die gemessenen Werte größtenteils unter den errechneten Werten liegen. Bezieht man die doch erhebliche Messunsicherheit mit in die Betrachtung ein, kann man allerdings von einer guten Übereinstimmung von Messung und Rechnung ausgehen.

Die Berücksichtigung der langwelligen Strahlungstransmission ist in jedem Fall erforderlich, weil sie physikalisch vorhanden ist. Die Berücksichtigung realer Witterungsbedingungen hingegen ist eine Option, die vermutlich selten in Anspruch genommen wird, aber für die Validierung in diesem Projekt erforderlich war. Die Berechnung nach Norm unter Berücksichtigung der langwelligen Strahlungstransmission ist aber in jedem Fall möglich und sinnvoll, wie Bild 65 zeigt.

### **4.3 Vergleich ISO 6946 und EN 673**

Zur Validierung des vereinfachten Berechnungsverfahrens wurde die ISO 6946 herangezogen, da die Norm flexiblere Verfahren bei abweichenden Randbedingungen bietet als die EN 673. Beiden Normen liegt aber das selbe physikalische Widerstandsmodell zugrunde. Die ISO 6946 berücksichtigt jedoch im Gegensatz zur Verglasungsnorm auch ausgedehntere Lufträume mit Konvektionsbewegungen, was dazu führt, dass die Ergebnisse der ISO 6946 meist etwas höhere Werte zeigen. Da der transmittierte Anteil jedoch einen wesentlichen Einfluss auf den U-Wert hat und bisher nur grob erfasst werden kann, liegt die ISO 6946 auf der sicheren Seite zur Bestimmung eines energetisch weiterverwendbaren Kennwerts.

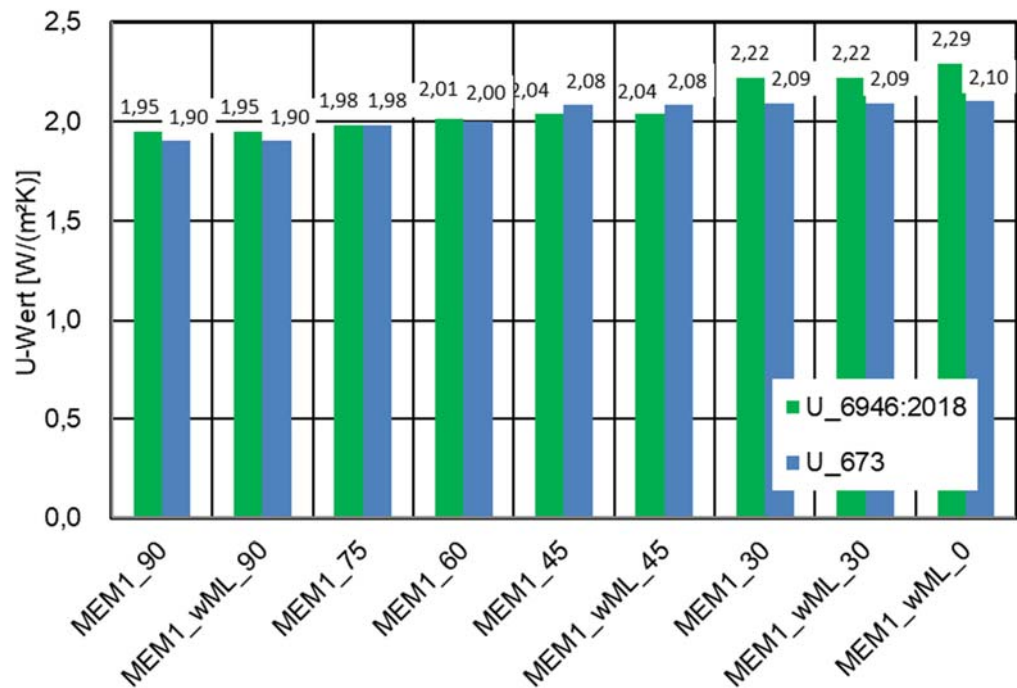


Bild 66:  
Vergleich ISO 6946 und EN 673 unter Standardrandbedingungen 0/20 °C;  
4 m/s.

Bild 66 zeigt, dass die Anwendung der EN 673 generell auch möglich ist und einen ausreichend guten Vergleichswert für Membrankissenkonstruktionen wieder gibt. Nur bei flachen Neigungen von 0° bis 30° ist eine deutliche Abweichung in den U-Werten zur ISO 6946 zu sehen. Hier ist anzunehmen, dass das veränderte Konvektionsverhalten bei horizontaler Einbaulage nicht ausreichend abgebildet wird. Beide Bemessungsverfahren sind aber grundsätzlich für die U-Wert-Berechnung geeignet.

## 5 Diskussion der Ergebnisse

### Hintergrund

Zielsetzung dieses Projekt-Teils war es, ein vereinfachtes, kalkulatorisches Bemessungsverfahren für Membrankissen-Konstruktionen zu entwickeln, um es der betroffenen Branche als gültiges Verfahren zur Verfügung zu stellen. Bislang gab es kein für diese Komponenten zugelassenes Berechnungsverfahren, da die gängigen Normen implizite Einschränkungen enthalten, die eine Anwendung zumindest infrage stellt. In Ermangelung anderer Bemessungsmöglichkeiten wurden dennoch in gängiger Praxis die beiden verfügbaren Normen DIN EN ISO 6946 oder DIN EN 673 für die Berechnungen zugrunde gelegt ohne zu wissen, wie belastbar die so erzielten Ergebnisse sind.

Dieses Projekt ist mit dem Ansatz gestartet, ein allgemeingültiges Bemessungsverfahren auf Basis eines Widerstandsmodells zu entwickeln. Nach Prüfung und Abwägung vorhandener Möglichkeiten und Anforderungen im Rahmen des Projekts fiel schließlich die Wahl auf die bereits bestehende Norm DIN EN ISO 6964, die ein passendes Widerstandsmodell beschreibt und zudem ausreichend flexibel ist, um im Berechnungsverfahren auch gemessene Randbedingungen zu berücksichtigen.

Leider hat sich im Lauf des Projekts herausgestellt, dass die kalorimetrische Messbox auf dem Freilandgelände des Fraunhofer IBP in Holzkirchen, bei der U-Wert-Messung der filigranen und extrem massearmen Membrankissen an Grenzen stößt. Es hat sich gezeigt, dass einerseits schwer lokalisierbare Randeffekte die Messergebnisse beeinträchtigen und andererseits die Messanlage dem sensiblen wärmetechnischen Verhalten der Kissen nicht ausreichend schnell folgen kann. Auch die redundant eingesetzte Messung des Wärmestroms durch das Membrankissen ist nur mäßig genau, kann aber für die Validierung des Berechnungsverfahrens herangezogen werden.

### Ergebnisse

Die vorhandenen Verfahren für die wärmetechnische Bemessung sind uneingeschränkt anwendbar auf Stegplatten-Systeme. Sowohl die Berechnungsverfahren für den Energieaustrag (U-Wert) also auch für die Energie-Gewinne (g-Wert) lassen sich ohne Anpassung und ohne Einschränkung anwenden.

Die für die Aufrechterhaltung der Kissen-Geometrie erforderliche Stützluft wird bislang in der Regel nicht in das energetische Verhalten der Membrankissen-Konstruktionen eingerechnet. Allerdings hat die messtechnische Untersuchung mehrerer technischer Anlagen im Tierpark Hellabrunn gezeigt, dass für die Stützluftversorgung, insbesondere aber für die damit erforderliche Lufttrocknung ein nicht unerheblicher Energieaufwand erforderlich ist. Dabei entfallen etwa zwei Drittel bis drei Viertel des Energieaufwands auf die Trocknungsanlage. Bedarfsgesteuerte oder energetisch optimierte Trocknersysteme sind bislang mit einer Ausnahme nicht auf dem Markt.

Im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz wurde untersucht, ob und wie der g-Wert für Membrankissen berechenbar ist. Aufgrund der konvexen Geometrie ist in wissenschaftlichen Kreisen lange davon ausgegangen worden, dass der Energie-Eintrag komplex zu berechnen wäre. Im Rahmen der Untersuchungen und im Abgleich mit den Messdaten hat sich aber gezeigt, dass die Norm DIN EN 410 ohne Einschränkungen anwendbar ist und sehr genaue Ergebnisse liefert. Voraussetzung dabei ist allerdings der lotrechte Lichteinfall, wobei ein leicht schräger Lichteinfall, wie er auf Kissenrandbereiche zu erwarten ist, nicht ins Gewicht fällt. Für Kissenkonstruktionen bis zu drei Lagen kann die DIN EN 410 eingesetzt werden, ab vier Lagen empfiehlt sich die DIN EN ISO 52022.

Kernstück der Untersuchungen und überwiegender Projektinhalt war allerdings die Betrachtung des winterlichen Wärmeschutzes und der Berechenbarkeit des U-Werts. Die Anwendbarkeit der beiden grundsätzlich dafür verfügbaren Normen (DIN EN ISO 6946 und DIN EN 673) galt lange Zeit als fraglich, weil die physikalischen Abläufe in und an den Kissen nicht einfach zu fassen sind. Es stand sogar zur Diskussion, ob der U-Wert als Bemessungswert für Kissenkonstruktionen überhaupt geeignet wäre. Mit diesem Projekt konnte nun Klarheit geschaffen werden. Der U-Wert für Membrankissen-Konstruktionen lässt sich auf Basis der verfügbaren o.g. Normen berechnen. Allerdings muss dem Umstand Rechnung getragen werden, dass ETFE, aus dem Membrankissen üblicher Weise bestehen, im langwelligen Bereich transparent ist. Wird diese Transparenz bei der Berechnung mittels des in diesem Projekt definierten vereinfachten Verfahrens berücksichtigt, sind beide Normen anwendbar! Es obliegt jetzt der einschlägigen Branche, sich für eines der beiden Bemessungsverfahren zu entscheiden und dieses als gemeinsame Bemessungsvorschrift festzulegen.

## 6 Bilderverzeichnis

Bild 1: Platten mit symmetrischem Querschnitt nach DIN EN 16153.	11
Bild 2: Platte mit symmetrischer Spiegelachse nach DIN EN 16153.	11
Bild 3: Platten mit unsymmetrischer Geometrie nach DIN EN 16153.	11
Bild 4: Foto des verwendeten schwenkbaren Plattengeräts (Fraunhofer IBP, Standort Stuttgart, Gruppe Wärmekennwerte und Klimasimulation).	16
Bild 5: Skizze des Verfahrens zur U-Wert-Bestimmung.	16
Bild 6: Schnitt durch PC-Kunststoffstegplatte.	17
Bild 7: Übersicht über die festgelegten Membranprüflinge und ihrer variierenden Parameter.	19
Bild 8: Planzeichnung der 3-lagigen Membranprüflinge. OL: Oberlage; ML: Mittellage; IL: Innenlage.	19
Bild 9: Planzeichnung des 4-lagigen Membranprüflings. OL: Oberlage; ML: Mittellage; IL: Innenlage.	20
Bild 10: Skizze der Sensorausstattung der 3-lagigen Membranprüflinge.	21
Bild 11: Nachdrehen des Prüflings mit der Sonne (Blick von oben).	22
Bild 12: Schematische Darstellung der Sensorpositionen im Klemmprofil.	23
Bild 13: Membran-Prüflinge.	25
Bild 14: Spektrale Transmission der einzelnen Folien.	28
Bild 15: Spektrale Reflexion der einzelnen Folien.	28
Bild 16: Referenz- und sommerliche Bedingungen nach DIN EN 13363 Teil 2.	29
Bild 17: Messbox des kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstands mit einem pneumatisch gestützten, zweilagigen ETFE-Membrankissen in der Prüflingsöffnung.	32
Bild 18: Schematischer Aufbau der Umschließungsflächen der Prüfbox bestehend aus der Hüll- und Tragkonstruktion, den Dämmebenen und den Adiat- und Messabsorbern.	33
Bild 19: Links: Schematische Zeichnung der normalen Tichelmann-Leitungsführung für einen Solarkollektor. [14] Rechts: Schematische Zeichnung des doppelten Tichelmann-Prinzips.	35
Bild 20: Schematische Darstellung der Komponenten der Prüfkammer-Lufttemperatur-Regelung bestehend aus den Kanälen zur Luftführung mit Ein- und Auslässen, dem Querstromlüfter und dem Heiz- und Kühlregister (Luftabsorber).	36
Bild 21: Hydraulisches Schema der Versorgungstechnik des kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstands.	38
Bild 22: Schematische Darstellung der Kurzschlusskalibrierung der Messabsorber: Links: Messbetrieb. Rechts: Kalibrierbetrieb.	39



Bild 23: Montagedetails eines Membran-Prüflings (links) und einer Pfosten-Riegel-Fassade als Prüfling (rechts) in die Prüflingsaufnahme des Kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstands inklusive der Adapterteile und Verschraubungen.	40
Bild 24: Kalorimetrischer Fassaden- und Dachprüfstand in geneigtem Zustand.	40
Bild 25: Links: Fixierungs-Schablone am Austritt der Leitungen aus der Prüfbox während der Montage. Rechts: Frei hängende Leitungs-Schlaufen zwischen der Deckendurchführung und den Anschlussstellen an der Kellerdecke.	41
Bild 26: Druckluftversorgung für die Membrankissen. Aktuell ist ein zweilagiges Kissen installiert, das nur eine der beiden verfügbaren Druckluftversorgungen benötigt.	42
Bild 27: Thermographieaufnahme des 4-lagigen Membranprüflings vom 14.03.2017.	43
Bild 28: Links: Quell-Thermographieaufnahme des 2. Membranprüfling vom 11.01.2017 mit der weiß markierten Schnittlinie für das Temperaturprofil. Rechts: Temperaturprofil des Randbereichs – Die Kurve zeigt den Verlauf der Oberflächentemperatur über das Membrankissen im Abstand vom Keder.	44
Bild 29: Verlauf der Oberflächentemperaturen im Randbereich des Kissens und der umgebenden Lufttemperaturen in einer beispielhaften Messnacht (10.-11.03.2017) am Beispiel des 4-lagigen Prüfkörpers MEM4.	45
Bild 30: Eingabewerte der Wärmebrückenberechnung (oben) und $U_f$ -Wert-Berechnung des Klemmprofils (unten).	46
Bild 31: Darstellung des Einflusses des Rahmenanteils mit Klemmprofil und des $U_f$ -Wert auf den $U_w$ -Wert ein 3- und eines 4-lagigen Kissens. Die graue gestrichelte Linie markiert den Rahmenanteil der im Rahmen dieses Forschungsprojekts untersuchten Prüflinge von 8,7 %. Sehr hohe Rahmenanteile über 30% sind unüblich und nur zu Veranschaulichung mit aufgenommen.	47
Bild 32: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Ermittlung der inneren und äußeren Wärmeübergänge in Anlehnung an ISO 8969.	49
Bild 33: Vergleich der errechneten (schwarz) mit den messtechnisch mit Hilfe der Kalorimetrie (rot) und mit Wärmestromscheiben (orange) ermittelten U-Werte in Kissenmitte. Die kalorimetrisch ermittelten U-Werte, die noch die Wärmebrücken des Kissenrands und der Klemmprofile enthalten, sind zusätzlich in Cyan dargestellt. Der Zusatz „wML“ bei Membran 1 steht für eine nach innen umgeschlagene Mittellage beim Membranprüfling Nr. 1. Die Messunsicherheit ist als 1-facher Standardfehler angegeben.	52
Bild 34: Thermisches 2D-Wärmebrückenmodell der Einbausituation der Membran-Prüflinge in den Kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand ohne Berücksichtigung des Randeffects im Kissen.	53
Bild 35: Ergebnisse der Wärmebrückenberechnung der Einbausituation in den Kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand.	54
Bild 36: Darstellung der gemessenen (orange) und der Normativ ermittelten (blau) g-Werte. Angabe der Messunsicherheit als einfacher Standardfehler.	55

Bild 37: Exemplarischer Aufbau einer Stützluftanlage mit Benennung der Komponenten.	57
Bild 38: Blick auf das Innenleben einer Stützluftanlage. Im oberen Teil der der Anlage sind vier schwarze Druckgebläse jeweils an den Ausgängen der Verteilungsleitungen angebracht, sowie im unteren Teil des Bildes ein angeschlossener Trockner zu erkennen ist.	58
Bild 39: Luftbild der Untersuchungsobjekte im Tierpark Hellabrunn (Schildkrötenhaus, Urwaldhaus und Giraffenhaus).	59
Bild 40: Dachkonstruktion des Schildkrötenhauses im Tierpark Hellabrunn [17].	60
Bild 41: Dachkonstruktion des Urwaldhauses (links) [18] und Giraffenhauses (rechts) [19] im Tierpark Hellabrunn.	60
Bild 42: Flight-Test-Facility (FTF)-Halle des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP in Valley bei Holzkirchen.	61
Bild 43: FTF: Vergleich Leistungsaufnahme Luftversorgung - Luftentfeuchter.	65
Bild 44: Schildkrötenhaus: Vergleich Leistungsaufnahme Luftversorgung - Luftentfeuchter.	66
Bild 45: Giraffenhaushaus: Vergleich Leistungsaufnahme Luftversorgung - Luftentfeuchter.	67
Bild 46: Urwaldhaus: Vergleich Leistungsaufnahme Luftversorgung - Luftentfeuchter.	68
Bild 47: Vergleich gesamte Leistungsaufnahmen des FTF (oben) und Schildkrötenhauses (unten).	69
Bild 48: Vergleich gesamte Leistungsaufnahmen des Giraffenhaus (oben) und Urwaldhauses (unten).	70
Bild 49: Klimatische Messdaten (Außenlufttemperatur und relative Feuchte) und Leistungsaufnahme der Stützluftanlage, exemplarisch dargestellt für das Schildkrötenhaus.	71
Bild 50: Vergleich Leistungsaufnahme verschiedener Stützluftanlagen.	73
Bild 51: Pneumatisch vorgespannte Membrankonstruktion am Beispiel der Allianz-Arena in München [Quelle: Fraunhofer IBP]	75
Bild 52: Sensitivitätsdiagramm – Das Diagramm zeigt die prozentuale Änderung des U-Werts infolge von Änderungen eingehender Modellparameter. Die Definition der Parameter und die entsprechende Größenordnung ihrer Änderung ist in Tabelle 19 beschrieben.	79
Bild 53: Sensitivitätsdiagramm g-Wert.	81
Bild 54: Gemessener Anteil der luftraumumschließenden Oberflächen-Temperaturdifferenzen des ersten und zweiten Luftraums an der Oberflächen-Temperaturdifferenz über ein gesamtes 3-lagiges Kissen.	82
Bild 55: Gemessener Anteil der luftraumumschließenden Oberflächen-Temperaturdifferenzen des ersten, zweiten und dritten Luftraums an der Oberflächen-Temperaturdifferenz über ein gesamtes 4-lagiges Kissen.	83

Bild 56: Monatsbilanz U-Wert im Vergleich der Standorte Potsdam, Madrid, St. Petersburg.	85
Bild 57: Korrigierter Emissionsgrad der i-ten Lage	88
Bild 58: Schematische Skizze des korrigierten Emissionsgrads bei Berücksichtigung der Transmission eines 3-lagigen Kissens.	89
Bild 59: Schematische Skizze des korrigierten Emissionsgrads bei Berücksichtigung der Transmission eines n-lagiges Kissens.	90
Bild 60: U-Werte nach gemessenen Randbedingungen ohne und mit Transmission im Vergleich zu Messwerten.	93
Bild 61: U-Werte nach Wärmestrombilanzierungs-Tool im Vergleich zu Berechnung nach Norm und Korrektur der Emissivität.	94
Bild 62: Vergleich U-Werte nach Wärmestrombilanzierungs-Tool (U_WSTool), Messwerten (U_ws_ohne), Normbedingungen (U_6946 fix) und gemessenen Randbedingungen (U_6946_iRB).	94
Bild 63: G-Wert Messergebnisse aller untersuchten Prüflinge in verschiedenen Neigungen im Vergleich zum normativ bestimmten g-Wert.	95
Bild 64: Messergebnisse des g-Werts bei 3-lagigen Kissenaufbauten mit unterschiedlich starker Bedruckung im Vergleich mit Rechenergebnissen nach DIN EN 410.	96
Bild 65: U-Wert Messergebnisse aller gemessenen Kissenaufbauten in unterschiedlichen Neigungen.	97
Bild 66: Vergleich ISO 6946 und EN 673 unter Standardrandbedingungen 0/20 °C; 4 m/s.	99

## 7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Arbeitspakete des IBP.	4
Tabelle 2: Vergleich PMMA- und PC-Stegplatten.	6
Tabelle 3: Eigenschaften von PMMA (Acrylglas) und PC (Polycarbonat) nach [3].	7
Tabelle 4: Normative Anforderungen für Stegmehrfachplatten zur Bestimmung von U-Wert, g-Wert, sowie der direkten Strahlungs- und Lichttransmission.	9
Tabelle 5: Grenzen der Normen und ggf. in Anlehnung an die Norm.	12
Tabelle 6: U-Werte von Stegplatten aus Polycarbonat	13
Tabelle 7: Messmöglichkeiten des Plattengeräts (Fraunhofer IBP, Standort Stuttgart, Gruppe Wärmekennwerte und Klimasimulation).	17
Tabelle 8: Aufbau der Prüflinge.	26
Tabelle 9: Gemessene strahlungsphysikalische Kenndaten der einzelnen Folien.	27
Tabelle 10: Ergebnisse nach DIN EN 13363 Teil 2.	30
Tabelle 11: U-Wert-Messergebnisse [ $W/(m^2K)$ ] der Membranprüflinge aus dem Kalorimeter in Abhängigkeit vom Neigungswinkel des Prüflings.	50
Tabelle 12: U-Wert-Messergebnisse [ $W/(m^2K)$ ] der Membranprüflinge aus der Messung der Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom Neigungswinkel des Prüflings. Messunsicherheit als einfacher Standardfehler.	51
Tabelle 13: g-Wert-Messergebnisse [-] der Membranprüflinge in Abhängigkeit vom Neigungswinkel des Prüflings. Messunsicherheit als einfacher Standardfehler.	56
Tabelle 14: Kenndaten Stützluftanlage Fluglabor (FTF) in Holzkirchen.	62
Tabelle 15: Kenndaten Stützluftanlage Urwaldhaus, Tierpark Hellabrunn.	62
Tabelle 16: Kenndaten Stützluftanlage Schildkrötenhaus, Tierpark Hellabrunn.	63
Tabelle 17: Kenndaten Stützluftanlage Giraffenhaus, Tierpark Hellabrunn.	64
Tabelle 18: Gegenüberstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Stützluftanlagen.	72
Tabelle 19: Definition der Parameter: Außentemperatur $T_e$ , Innentemperatur $T_i$ , Windgeschwindigkeit $v_{Wind}$ und Strahlungsaustauschgrad $E$ zweier gegenüberliegender Folien des äußeren Luftraums	79
Tabelle 20: Kalkulationsfaktor $f_{\Delta T g, i}$ zur Bestimmung der Temperaturdifferenz über einen Luftraum $\Delta T g, i$ für 3- und 4- lagige Kissenbauten.	84
Tabelle 21: Korrigierte Emissivität $\epsilon^*$ der Membranfolien	91

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] F. Mähl, „Untersuchungen zur tragkonstruktiven Eignung transluzenter Sandwichstrukturen mit polymerer Kernschicht,“ Kaiserslautern, 2008.
- [2] F. Thumm, A. Dalibard, D. Kristic, M. Bossert und U. Dr. Prof. Eicker, „Stegplatten aus Polycarbonat - Potentiale und Anwendungen,“ *Sonderheft Innovative Fassadentechnik*, September 2011.
- [3] <http://www.baunetzwissen.de>, 2016 Mai 22. [Online].
- [4] *DIN EN 16153 lichtdurchlässige, flache Stegmehrfachplatten aus Polycarbonat (PC) für Innen- und Außenanwendungen an Dächern, Wänden und Decken - Anforderungen und Prüfverfahren*, 2015.
- [5] *DIN EN ISO 12017 Poly(methylmethacrylat) Stegdoppel- und Stegdreifachplatten - Prüfverfahren*, 1996.
- [6] *DIN EN 14963 Dachdeckungen - Dachlichtbänder aus Kunststoff mit oder ohne Aufsetzkränzen - Klassifizierung, Anforderungen und Prüfverfahren*, 2006.
- [7] *DIN EN 1875 Vorgefertigte Zubehörteile für Dachdeckungen – Lichtkuppeln aus Kunststoff – Produktspezifikation und Prüfverfahren*, 2014.
- [8] *CIE 130 "Practical methods for the measurement of reflectance and transmittance"*, 1998.
- [9] *DIN EN 14500 Abschlüsse - Thermischer und visueller Komfort- Prüf- und Berechnungsverfahren; Deutsche Fassung EN 14500:2008*.
- [10] *DIN EN 410 Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen; Deutsche Fassung EN 410:2011*.
- [11] M. Kersken und H. Sinnesbichler, „Messtechnik in der Bauphysik: Kalorimetrieverfahren zur in-situ-Messung des solaren Gesamtenergiedurchlassgrads,“ 2016.
- [12] „DIN EN 13363-2 Sonnenschutzeinrichtungen in Kombination mit Verglasungen - Berechnung der Solarstrahlung und des Lichttransmissionsgrades - Teil 2: Detailliertes Berechnungsverfahren,“ 7/2005.
- [13] E.-R. Schramek, „Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik,“ Oldenburg Industrieverlag, München, 2005.
- [14] J. Arnds, „Wikipedia - Tichelmann-System,“ 2008. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Tichelmann-System>. [Zugriff am 14 Juni 2016].
- [15] *ISO 9869:2014: Thermal Insulation - Building Elements - In situ measurement of thermal resistance and transmittance..*

- [16] M. Kersken, „Erarbeitung eines Verfahrens zur klimaunabhängigen Ermittlung der energetischen Kennwerte von transparenten Fassaden- und Membrankonstruktionen aus in Situ Messungen,“ 2018.
- [17] V. GmbH. [Online]. Available: <https://velabran.com/project/tierpark-hellabrunn-muenchen/>. [Zugriff am 11 06 2019].
- [18] M. T. H. AG, „Hellabrunn - der Münchner Tierpark,“ [Online]. Available: <https://www.hellabrunn.de/tierparkhistorie/ueber-hellabrunn/>. [Zugriff am 11 06 2019].
- [19] Bauverlag BV GmbH, [Online]. Available: [https://www.dach-holzbau.de/artikel/bhw\\_Wohlfuehlfassade\\_fuer\\_Giraffen\\_1957039.html](https://www.dach-holzbau.de/artikel/bhw_Wohlfuehlfassade_fuer_Giraffen_1957039.html). [Zugriff am 11 06 2019].

Anlage zum IBP-Abschlussbericht IL-001/000/2019

Berichtsteil ILEK

## **Bewertungsverfahren Leichtbau**

Entwicklung eines vereinfachten Bewertungsverfahrens zur Bestimmung der wärmetechnischen Eigenschaften (U-Wert, g-Wert) von Membranhüllen-Konstruktionen

Dieser Abschlussbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-15.04). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Der Bericht umfasst

135	Seiten Text
28	Tabellen
134	Abbildungen

Walter Haase, Clemens Freitag,  
Bearbeitungsstelle ILEK  
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren  
Direktor:  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h.c. Werner Sobek  
Pfaffenwaldring 7 + 14  
70569 Stuttgart  
Telefon 0711 / 685 63599  
Telefax 0711 / 685 66968

Projektbearbeitung: Dipl.-Ing. Clemens Freitag  
Projektunterstützung: B.Sc. Theo Baur,  
B.Sc. Christoph Pfeil,  
B.Sc. Jan Bolay  
Projektleitung: Dr.-Ing. Walter Haase  
Berichterstellung: Dr.-Ing. Walter Haase,  
Dipl.-Ing. Clemens Freitag,  
B.Sc. Jan Bolay

Stuttgart, 22. Juli 2019



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Übersicht der ILEK-Arbeitspakete</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Bauphysikalische und normative Grundlagen</b> .....	<b>8</b>
3.1	U-Wert-Berechnung nach Norm.....	8
3.2	Begriffe.....	9
3.3	Berechnungsverfahren.....	9
3.4	Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten nach DIN EN ISO 6946:2018.....	10
3.4.1	Wärmeübergangswiderstände.....	11
3.4.2	Wärmedurchlasswiderstand von Luftschichten.....	11
3.5	Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten nach DIN EN ISO 6946:2018 Anhang D.....	12
3.6	U-Wert-Berechnung basierend auf der Messdatenauswertung.....	16
3.7	U-Wert-Berechnung mit dem Layer Tool.....	17
3.7.1	„Full Analysis“ (Komplettanalyse) Modus.....	18
3.8	Gesamtenergiedurchlassgrad.....	21
3.9	Begriffe.....	21
3.10	Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrades.....	22
<b>4</b>	<b>Messtechnische Infrastruktur am ILEK</b> .....	<b>23</b>
4.1	Hotbox.....	23
4.1.1	Aufbau der ILEK-Hotbox.....	24
4.1.2	Referenzmessungen an einem Probekörper aus 100 mm dickem Polystyrol.....	27
4.1.3	Exemplarische Probenkonfektionierung für die Hotbox.....	33
4.2	Dachprüfstand.....	35
4.2.1	Messtechnik.....	36
4.2.2	Vorbereitende Messungen.....	41
4.2.3	Einrichten des Dachprüfstands.....	45
4.3	Aktivhaus B10.....	46
4.3.1	Messtechnische Infrastruktur im Forschungsgebäude.....	47
4.3.2	Testfassade aus Sky-Frame-Profilen und Vakuumisolierverglasung.....	49
4.3.3	Installation, Anschluss und Inbetriebnahme der Sensoren.....	49
4.4	Fassadenprüfstand.....	53

4.4.1	Allgemeine Informationen und Konstruktion .....	54
4.5	Spektralphotometer .....	56
<b>5</b>	<b>Messungen im geregelten Heizkasten (Hotbox).....</b>	<b>58</b>
5.1	Zweilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien .....	58
5.2	Dreilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien .....	59
5.2.1	Dreilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B1915.....	61
5.2.2	Dreilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B4915.....	63
5.2.3	Dreilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B18059.....	64
5.2.4	Dreilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B18089.....	65
5.2.5	Dreilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B28050.....	66
5.3	Zweilagiger textiler Aufbau mit Funktionsmaterialien .....	67
5.3.1	Zweilagiger textiler Aufbau mit Funktionsmaterialien: Wabenaufbau 1 Wacotech Wavecore PET150-18/S.....	68
5.3.2	Zweilagiger textiler Aufbau mit Funktionsmaterialien: Wabenaufbau 2 Wacotech Timax CA 40-FR.....	70
5.3.3	Zweilagiger textiler Aufbau mit Funktionsmaterialien: Glasfasergespinst Wacotech TIMax GL-PlusF .....	72
5.3.4	Zweilagiger textiler Aufbau mit Funktionsmaterialien: PES-Akustikvlies ARAKO .....	74
5.4	Dreilagiges pneumatisches Kissen aus ETFE-Folien.....	76
5.5	Interpretation und Zusammenfassung der Ergebnisse .....	78
<b>6</b>	<b>Versuchsdurchführung im Dachprüfstand.....</b>	<b>80</b>
6.1	Dreilagiger textiler Aufbau mit Luftzwischenräumen.....	83
6.1.1	Darstellung der Messergebnisse .....	84
6.2	Zweilagiger textiler Aufbau mit Funktionsmaterialien .....	88
6.2.1	Darstellung der Messergebnisse .....	89
<b>7</b>	<b>Versuchsdurchführung im Aktivhaus B10 .....</b>	<b>94</b>
7.1	Winter-Intervall 1.....	94
7.2	Winter-Intervall 2.....	98
7.3	Winter-Intervall 3.....	102
7.4	Sommer-Intervall .....	106
7.5	Interpretation und Zusammenfassung der Ergebnisse.....	109
<b>8</b>	<b>Versuchsdurchführung im Fassadenprüfstand .....</b>	<b>110</b>
8.1	Elektrochrome Verglasungen.....	110

8.2	Eigenschaften der elektrochrome Verglasung:.....	112
8.3	Referenzverglasung mit invarianten Eigenschaften .....	112
8.4	Eigenschaften der Referenzverglasung .....	113
8.5	Versuchsaufbau.....	113
8.6	Darstellung der Messergebnisse.....	115
8.6.1	Nachtintervall .....	117
8.6.2	Tagesintervall.....	119
8.7	Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer elektrochromen Verglasung .....	121
8.8	Interpretation und Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen.....	123
<b>9</b>	<b>U-Wert-Bestimmung mit dem greenTEG-System gSKIN KIT-2615C.....</b>	<b>124</b>
9.1	U-Wert-Messverfahren des greenTEG-Systems.....	124
9.2	Exemplarische U-Wert-Messungen mit dem greenTEG-System an einem zweilagigen textilen Aufbau mit Funktionslage in der ILEK-Hotbox .....	125
9.3	Exemplarische U-Wert-Messungen mit dem greenTEG-System an einer schaltbaren Flüssigkristall-Verglasung im ILEK-Fassadenprüfstand .....	130
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen an Membranhüllen und an adaptiven Verglasungen.....</b>	<b>136</b>
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>138</b>
<b>12</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>144</b>
<b>13</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>146</b>

# 1 Einführung

Membrankonstruktionen gelten als innovativ und zukunftsweisend. Der deutsche Markt ist hier führend, dennoch gibt es Hemmschwellen, diese Konstruktionsweisen einzusetzen. Unter anderem fehlt es an geeigneten Bemessungsgrundlagen, welche die Leistungsfähigkeit dieser Bauweisen, insbesondere im Bereich der Wärmedämmung, plan- und bewertbar machen.

Es gibt bisher noch keine geeigneten Bemessungs- und Prüfverfahren für die Bestimmung der U- und g-Werte, die für eine energetische Bewertung im Sinne der EnEV bzw. der DIN V 18599 benötigt werden. Ziel der Antragsteller war es daher, ein praxistaugliches Verfahren zur Bestimmung der wärmetechnischen Kennwerte von Membrankonstruktionen unterschiedlicher Aufbauten zu entwickeln. Das Verfahren sollte in den einschlägigen Nachweisverfahren eingesetzt werden können.

Die wesentlichen Arbeitsschritte hierzu umfassten eine intensive Literaturrecherche, die Planung geeigneter Versuche, die Herstellung der Probekörper und die Durchführung entsprechender Messungen sowie deren Auswertung. Auf der Basis der energetischen Bewertung der Versuchsergebnisse wurden die verwendeten Rechenverfahren zur analytischen Ermittlung der Kennwerte überprüft und angepasst. Abschließend erfolgte die Ausarbeitung eines Bewertungsverfahrens für die verschiedenen Systeme.

## 2 Übersicht der ILEK-Arbeitspakete

In der folgenden Übersicht sind die projektspezifischen Arbeitspakete des ILEK aufgeführt, die in den weiteren Kapiteln dieses Abschlussberichts detailliert beschrieben werden:

Tabelle 2-1: Übersicht der Arbeitspakete des ILEK

Nr.	Arbeitspaket
<b>AP 1</b>	<b>Literaturrecherche</b>
1.1	Anwendungsgrenzen bestehender Normung
1.2	Physikalische Grundlagen von Ultraleichtbaukonstruktionen
1.3	Mehrlagige textile Gebäudehüllen
1.4	Adaptive Verglasungen
1.5	Prüfung existierender Lösungsansätze
<b>AP 2</b>	<b>Generierung von Messdatensätzen zur energetischen Bewertung in den Laborprüfständen und im Fassadenprüfstand des ILEK (M 1:1 und kleinere Proben)</b>
2.1	
2.1.1	Klassifizieren typischer UL-Konstruktionen
2.1.2	Erstellung von 4 Prüfkörpern unterschiedlicher Konstruktionsklassen
2.1.3	Ermittlung U-/g-Werte der Prüfkörper in den Laborprüfständen
2.1.4	Ermittlung der spektralen Kenndaten der Transmission und Reflexion im sichtbaren, im solaren sowie im IR-Strahlungsspektrum
2.1.5	Ermittlung der gewichteten fotometrischen und radiometrischen Mittelwerte der Transmission, Reflexion, Absorption sowie der Emissivität
2.1.6	Erfassung weiterer Messgrößen (Oberflächen-/Lufttemperaturen, Luftgeschwindigkeiten, licht- und strahlungstechnische Kenndaten) zur Validierung der zu entwickelnden Bewertungsverfahren
<b>2.2</b>	<b>Energetische Analyse von Randverbund/Klemmprofilen</b>
2.2.1	Rechnerische Analyse der wärmetechnischen Eigenschaften
<b>AP 3</b>	<b>Messdatenanalyse/Data-Mining</b>
3.1	Herausfiltern der wesentlichen Einflussfaktoren auf die energetischen Kennwerte
3.2	Überprüfung bekannter energetischer Kennwerte (U- und g-Wert) auf ihre Anwendbarkeit auf Ultraleichtbauhüllen
3.3	Anpassung, Neuentwicklung und Validierung von iterativen Rechenmodellen zur Abbildung unterschiedlicher Detaillierungsgrade
<b>AP 4</b>	<b>Ausarbeitung eines Bewertungsverfahrens</b>
<b>AP 5</b>	<b>Dokumentation und Berichterstellung</b>

### 3 Bauphysikalische und normative Grundlagen

Zur Veranschaulichung der nachfolgend verwendeten Begrifflichkeiten im Bereich des Wärmetransports soll an dieser Stelle eine kurze Erläuterung der Transportmechanismen erfolgen.

Der Energietransport in und zwischen Festkörpern und Fluiden (Flüssigkeiten und Gase) erfolgt jeweils vom Körper/Bereich höherer Temperatur zum Körper/Bereich niedrigerer Temperatur. Dabei kommt es zu einem Temperatúrausgleich. Die Wärme kann durch Leitung, durch Konvektion und durch Strahlung übertragen werden.

Die Wärmeleitung erfolgt auf atomarer Ebene durch Weitergabe kinetischer Energie der in einem Körper enthaltenen Atome von Atom zu Atom.

Unter Konvektion wird der Wärmetransport in Fluiden durch Massenbewegung, also durch Strömungsvorgänge, verstanden. Die in einer bestimmten Stoffmasse enthaltene Wärmemenge wird mit dem Stoff mitgeführt und an einen anderen Ort transportiert. Es wird unterschieden zwischen freier Konvektion und erzwungener Konvektion. Bei der freien Konvektion ist die Ursache der Strömung ein temperaturbedingter Dichtegradient im Fluid. Beispielsweise bewegt sich erwärmte und damit weniger dichte Luft entgegen der Schwerkraft nach oben. Ist die Strömung durch äußere Einflüsse bedingt (z. B. durch einen Ventilator), so spricht man von einer erzwungenen Konvektion.

Festkörper und Fluide senden an freien Oberflächen entsprechend ihrer absoluten Temperatur Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung aus. Dabei ist sowohl die Frequenz als auch die abgestrahlte Energie abhängig von der absoluten Temperatur und der Stoffeigenschaft (Oberflächeneigenschaft). Viele Gase (z. B. auch Luft) sind weitestgehend durchlässig für Wärmestrahlung. Der Frequenzbereich der Wärmestrahlung (von ca. 2.5  $\mu\text{m}$  bis ca. 50  $\mu\text{m}$ ) liegt überwiegend deutlich oberhalb der Wellenlängen der solaren Einstrahlung (ca. 200 nm bis ca. 3000 nm). Während Festkörper ein kontinuierliches Strahlungsspektrum erzeugen, strahlen Gase in charakteristischen Wellenlängenabschnitten (Linienpektren).

Bei den Wärmetransportvorgängen in mehrlagigen Hüllenaufbauten mit Luftzwischenräumen sind alle drei Transportvorgänge beteiligt. Die Gewichtung der einzelnen Wärmeströme ist nicht konstant, sondern abhängig von den Randbedingungen (Umströmungsgeschwindigkeiten an den Oberflächen, Emissionskoeffizienten, Sichtfaktoren, Oberflächentemperaturen der Hüllenschichten und der Umgebungen usw.) [1].

#### 3.1 U-Wert-Berechnung nach Norm

Der U-Wert oder Wärmedurchgangskoeffizient ist eine physikalische Größe zur Beschreibung des Wärmedurchgangs durch eine oder mehrere Materialschichten. Er stellt in der Bauphysik einen wichtigen Kennwert für die Nachweise nach der Energiesparverordnung dar [2].

Das Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten und des Wärmedurchlasswiderstandes ist in Deutschland durch die Norm DIN EN ISO 6946:2018 [3] geregelt, auf die im Folgenden Bezug genommen wird. Die Basis der in die Berechnung eingehenden Parameter bilden die Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe sowie die Wärmeübergangswiderstände der zu bemessenden Bauteilschichten.

## 3.2 Begriffe

Es werden die Definitionen für die nachfolgenden Begriffe aus der DIN EN ISO 6946:2018 herangezogen:

### **Bauteil**

Teil eines Gebäudes, wie z. B. Wand, Boden oder Dach.

### **Bauteilkomponente**

Bauwerksteil oder ein Teil davon (Anmerkung 1 zum Begriff: In dieser Internationalen Norm wird der Begriff „Bauteilkomponente“ im Sinne sowohl von „Bauteil“ als auch von „Bauteilkomponente“ verwendet).

### **Wärmeschutztechnischer Bemessungswert**

Bemessungswärmeleitfähigkeit oder Bemessungswärmedurchlasswiderstand (Anmerkung 1 zum Begriff: Der Bemessungswert schließt mögliche nachteilige Auswirkungen z. B. durch Alterung, Feuchte und/oder Konvektion mit ein. Im Gegensatz zum Nennwert, bei dem es sich um den für eine wärmeschutztechnische Eigenschaft eines Baustoffes oder -produktes zu erwartenden Wert handelt, der anhand von Messdaten bei Referenzbedingungen für Temperatur und Feuchte bewertet wird, siehe ISO 10456 [4]).

### **Bemessungswärmeleitfähigkeit**

Wert der Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffes oder -produktes unter bestimmten äußeren und inneren Bedingungen, die als typisch für das Verhalten dieses Baustoffes oder -produktes im Bauteil angesehen werden können.

### **Bemessungswärmedurchlasswiderstand**

Wert des Wärmedurchlasswiderstandes eines Bauproduktes unter bestimmten äußeren und inneren Bedingungen, die als typisch für das Verhalten des Produktes im Bauteil angesehen werden können.

### **Thermisch homogene Schicht**

Schicht konstanter Dicke mit als einheitlich anzusehenden thermischen Eigenschaften.

## 3.3 Berechnungsverfahren

Zur Berechnung des U-Wertes finden das detaillierte Berechnungsverfahren und das vereinfachte Berechnungsverfahren Anwendung. Das detaillierte Berechnungsverfahren stützt sich auf numerische Simulationen und wird nach ISO 10211 [5] durchgeführt. Bei Bauteilkomponenten, die aus thermisch homogenen oder inhomogenen Schichten bestehen und Luftschichten von nicht mehr als 30 cm beinhalten, darf das vereinfachte Verfahren angewandt werden, welches im Folgenden beschrieben wird.

### 3.4 Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten nach DIN EN ISO 6946:2018

Über die Wärmeleitfähigkeit der Materialien wird der Wärmedurchlasswiderstand jeder einzelnen Schicht ermittelt.

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad \left[ \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right] \quad (1)$$

Mit

$R$  Wärmedurchlasswiderstand

$d$  Dicke der Baustoffschicht in der Bauteilkomponente [m]

$\lambda$  Bemessungswärmeleitfähigkeit des Baustoffes  $\left[ \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$

Der Wärmedurchgangswiderstand der gesamten Bauteilschicht berechnet sich aus den ermittelten Wärmedurchlasswiderständen und dem inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstand.

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad \left[ \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right] \quad (2)$$

Mit

$R_{tot}$  Wärmedurchgangswiderstand des Gesamtaufbaus  $\left[ \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$

$R_{si}$  innerer Wärmeübergangswiderstand  $\left[ \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$

$R_1, R_2 \dots R_n$  Bemessungswärmedurchlasswiderstände der einzelnen Schichten  $\left[ \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$

$R_{se}$  äußerer Wärmeübergangswiderstand  $\left[ \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$

Nach dem vereinfachten Berechnungsverfahren ergibt sich der Wärmedurchgangskoeffizient aus dem Kehrwert des totalen Wärmedurchgangswiderstandes.

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (3)$$

Mit

$U$  Wärmedurchgangskoeffizient  $\left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$



$R_{tot}$  Wärmedurchgangswiderstand

$$\left[ \frac{m^2 K}{W} \right]$$

### 3.4.1 Wärmeübergangswiderstände

Es sind die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Bemessungswerte für die Wärmeübergangswiderstände aus DIN EN ISO 6946 zu verwenden. Bei einem Wärmestrom von  $\pm 30^\circ$  in horizontaler Richtung sind die Werte der Spalte „Horizontal“ anzusetzen.

Tabelle 3-1: Wärmeübergangswiderstände nach DIN EN ISO 6946

Wärmeübergangswiderstand $\left[ \frac{m^2 K}{W} \right]$	Richtung des Wärmestromes		
	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
$R_{si}$	0,10	0,13	0,17
$R_{se}$	0,04	0,04	0,04

Anmerkung: Die Wärmeübergangswiderstände gelten für Oberflächen, die mit der Luft in Berührung stehen. Der Wärmeübergangswiderstand ist nicht anwendbar, wenn die Oberfläche einen anderen Stoff berührt.

### 3.4.2 Wärmedurchlasswiderstand von Luftschichten

Für den Wärmedurchlasswiderstand von Luftschichten existieren tabellierte Werte, die der Norm entnommen werden können. Die Werte sind in Abhängigkeit von der Dicke der Luftschicht sowie der Richtung des Wärmestromes gegeben. Bedingung für die Anwendung dieser Tabelle ist, dass es sich um ruhende Luftschichten handeln muss [6].

Dicke der Luftschicht mm	Wärmedurchlasswiderstand $m^2 \cdot K/W$		
	Richtung des Wärmestromes		
	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

ANMERKUNG Zwischenwerte können mittels linearer Interpolation ermittelt werden.

Abbildung 3.1 Wärmedurchlasswiderstände von ruhenden Luftschichten

In den späteren Berechnungen der Wärmedurchgangskoeffizienten der Proben in der Dachversuchsbox, die für den Fall des aufwärts gerichteten Wärmestroms und für Luftschichtdicken

von 25 mm und 85 mm durchgeführt wurden, wurde der Wärmedurchlasswiderstand der Luftschicht zu

$$R_{Luft} = 0,16 \quad [(m^2K)/W] \quad (4)$$

angesetzt.

Zur Beschreibung des Wärmeübergangs an den äußeren Oberflächen des betrachteten Bauteils wurden die Wärmeübergangswiderstände aus Tabelle 3-1 verwendet. Sie umfassen den konvektiven, den strahlungsbedingten sowie den wärmeleitungsbedingten Anteil des Wärmeübergangs unmittelbar vor dem Bauteil. Es wird unterschieden zwischen dem Wert der Innenoberfläche  $R_{si}$  und dem der Außenoberfläche  $R_{se}$ . Für den Fall des aufwärts gerichteten Wärmestroms bei den Proben in der Dachversuchsbox ergeben sich folgende Werte:

$$R_{si} = 0,10 \quad [(m^2K)/W] \quad (5)$$

$$R_{se} = 0,04 \quad [(m^2K)/W] \quad (6)$$

Mit

$R_{si}$  Wärmeübergangswiderstand an der inneren Bauteiloberfläche  $[(m^2K)/W]$

$R_{se}$  Wärmeübergangswiderstand an der äußeren Bauteiloberfläche  $[(m^2K)/W]$

Für den Fall des horizontal gerichteten Wärmestroms bei den Proben in der Hotbox (geregelter Heizkasten) ergeben sich folgende Werte:

$$R_{si} = 0,13 \quad [(m^2K)/W] \quad (7)$$

$$R_{se} = 0,04 \quad [(m^2K)/W] \quad (8)$$

### 3.5 Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten nach DIN EN ISO 6946:2018 Anhang D

Diese Berechnungsweise unterscheidet sich von der in Kapitel 3.4 beschriebenen in der Art der Bestimmung der Wärmeübergangswiderstände und des Wärmedurchlasswiderstands von Lufträumen.

Die zuvor verwendeten, tabellierten Werte des Wärmeübergangswiderstands wurden mit Annahmen für den Emissionsgrad von  $\epsilon=0,9$  und 20 °C Innenraumtemperatur sowie 0 °C Außentemperatur und einer Windgeschwindigkeit von  $v=4$  m/s bestimmt [6].

Sollen die Wärmeübergangswiderstände in Abhängigkeit des vorhandenen Emissionsgrads des Materials und der auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt werden, reichen die tabellierten Werte nicht mehr aus.

Der Wärmedurchlasswiderstand bleibt unverändert und wird weiterhin aus der Wärmeleitfähigkeit und der Materialstärke berechnet [6].

$$R_n = \frac{d}{\lambda} \quad [(\text{m}^2\text{K})/\text{W}] \quad (9)$$

Mit

$\lambda$  Wärmeleitfähigkeit [W/(m2K)]

$d$  Schichtdicke des Bauteils [m]

In Anhang D der DIN EN ISO 6946:2018 [6] wird der Wärmedurchlasswiderstand von Lufträumen ausführlicher behandelt. Es werden hierbei die Wärmeübergangskoeffizienten durch Strahlung, Konvektion und Leitung miteinbezogen. Beeinflussende Faktoren sind die Emissionsgrade der den Luftraum umschließenden Flächen und die einzelnen Schichttemperaturen.

Als Luftraum wird eine Luftschicht verstanden, bei der die Breite und die Länge mindestens das Zehnfache der Dicke betragen [6].

Der Wärmedurchlasswiderstand von Lufträumen ergibt sich zu

$$R_g = \frac{1}{(h_a + h_r)} \quad [(\text{m}^2\text{K})/\text{W}] \quad (10)$$

Mit

$h_a$  Wärmeübergangskoeffizient durch Leitung/Konvektion [W/m2K]

$h_r$  Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung [W/m2K]

Dabei wird der Wärmeübergangskoeffizient durch Leitung und Konvektion wie folgt berechnet; unterschieden wird dabei nach der Wärmestromrichtung (horizontal/vertikal):

$$h_a = \max \left\{ \begin{array}{l} h_a \\ 0,025 \\ \frac{d}{d} \end{array} \right. \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (11)$$

Mit

$h_a$  Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion [W/m2K]

$d$  Dicke des Luftraumes in Wärmestromrichtung [m]

Der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion  $h_a$  ergibt sich für den Fall des aufwärts gerichteten Wärmestroms (Dachversuchsstand) in Abhängigkeit des Temperaturunterschieds von einer zur anderen Seite des Luftraums. Er beträgt:

$$h_a = \begin{cases} 1,95 & (\Delta T \leq 5 \text{ K}) \\ 1,14(\Delta T)^{1/3} & (\Delta T > 5 \text{ K}) \end{cases} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (12)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion  $h_a$  ergibt sich für den Fall des horizontal gerichteten Wärmestroms (Hotbox) in Abhängigkeit des Temperaturunterschieds im Luftraum. Er beträgt:

$$h_a = \begin{cases} 1,25 & (\Delta T \leq 5 \text{ K}) \\ 0,73(\Delta T)^{1/3} & (\Delta T > 5 \text{ K}) \end{cases} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (13)$$

Mit

$\Delta T$  Temperaturdifferenz von einer zur anderen Seite des Luftraums in Kelvin

Der Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung  $h_r$  ergibt sich zu

$$h_r = E \cdot h_{r0} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (14)$$

Mit

$E$  Strahlungsaustauschgrad der Oberflächen

$h_{r0}$  Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung für einen schwarzen Körper  $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$

Der Strahlungsaustauschgrad  $E$  berechnet sich zu

$$E = \frac{1}{(1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2) - 1} \quad (15)$$

Mit

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  hemisphärische Emissionsgrade der begrenzenden Flächen  $[\text{W}/\text{m}^2]$

Der Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung bei einem schwarzen Körper  $h_{r0}$  nach Gleichung 14 wird wie folgt bestimmt:

$$h_{r0} = 4 * \sigma * T_{mn}^3 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (16)$$

Mit

$\sigma$  Stefan-Boltzmann-Konstante  $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)]$

$T_{mn}$  mittlere thermodynamische Temperatur der Oberfläche und der Umgebung  $[\text{K}]$

Die Berechnung der Wärmeübergangswiderstände ohne Tabellenwerte wird im Folgenden dargestellt. Der Wärmeübergangswiderstand setzt sich aus Anteilen der Wärmestrahlung und Konvektion zusammen. Dieses Verfahren wird im Anhang C der DIN EN ISO 6946:2018 [6] erläutert.

Für den Wärmeübergangswiderstand ergibt sich:

$$R_s = \frac{1}{(h_c + h_r)} \quad [(\text{m}^2\text{K})/\text{W}] \quad (17)$$

Mit

$h_c$  Wärmübergangskoeffizient durch Konvektion

$h_r$  Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung

Darin erhalten ist der Wärmübergangskoeffizient durch Konvektion  $h_c$ . Für diesen gilt bei Innenoberflächen:

$$h_c = h_{ci} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (18)$$

Mit

$h_{ci}$  Wärmübergangskoeffizient durch Konvektion an Innenoberflächen  $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$

Der gegebene Werte von  $h_{ci}$  für einen aufwärts gerichteten Wärmestrom ist

$$h_{ci} = 5,0 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (19)$$

Der gegebene Werte von  $h_{ci}$  für einen horizontal gerichteten Wärmestrom ist

$$h_{ci} = 2,5 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (20)$$

Im Fall von Außenoberflächen wird der Wärmeübergangskoeffizient berechnet:

$$h_c = h_{ce} = 4 + 4v \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (21)$$

Mit

$h_{ce}$  Wärmübergangskoeffizient durch Konvektion an Außenoberflächen  $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$

$v$  Windgeschwindigkeit  $[\text{m}/\text{s}]$ .

Der Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung  $h_r$  berechnet sich wie folgt:

$$h_r = \varepsilon \cdot (4 \cdot \sigma \cdot T_{mn}^3) \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (22)$$

Mit

$\varepsilon$  Emissionsgrad der Oberfläche

$\sigma$  Stefan-Boltzmann-Konstante  $5,67 \cdot 10^{-8}$  [W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)]

$T_{mn}$  mittlere thermodynamische Temperatur der Oberfläche und der Umgebung [K]

Für die Ermittlung der messwertbasierten U-Werte in Kapitel 5 erfolgte die Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten (Konvektion und Strahlung) nach den beiden obigen Gleichungen ( $h_c$  nach Gleichung 21 sowie  $h_r$  nach Gleichung 22) für den Außen- und den Innenübergang. Der Wärmedurchlasswiderstand der Bauteilschichten von der inneren zur äußeren Membranlage wurde mit den gemessenen Differenzen der Oberflächentemperaturen und der gemessenen Wärmestromdichten bestimmt ( $R_n = \Delta T/q$ ).

Der gesamte Wärmedurchgangswiderstand ergibt sich abermals als Summe der Wärmeübergangs- und Wärmedurchlasswiderstände.

$$R_T = R_{si} + \sum_1^n R_n + R_{se} \quad [(m^2K)/W] \quad (23)$$

Mit

$R_{si}$  Wärmeübergangswiderstand für die innere Bauteiloberfläche [(m<sup>2</sup>K)/W]

$R_n$  Wärmedurchlasswiderstand für die Bauteilschicht  $n$  [(m<sup>2</sup>K)/W]

$R_{se}$  Wärmeübergangswiderstand für die äußere Bauteiloberfläche [(m<sup>2</sup>K)/W]

Der Wärmedurchgangskoeffizient ist der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstands.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad [W/(m^2K)] \quad (24)$$

Mit

$R_T$  gesamter Wärmedurchgangswiderstand [(m<sup>2</sup>K)/W]

### 3.6 U-Wert-Berechnung basierend auf der Messdatenauswertung

Es besteht neben den vorgestellten Verfahren die Möglichkeit, die U-Werte aus Messwerten zu bestimmen. Diese In-situ-Messungen werden nach Vorgaben der ISO 9869-1:2014 [7] durchgeführt. Dazu werden die Daten von Wärmeflussensoren sowie die Oberflächentemperaturen beziehungsweise die Umgebungslufttemperaturen herangezogen.

Der Wärmedurchgangskoeffizient U ergibt sich zu

$$U = \frac{q}{T_{Innen} - T_{Außen}} \quad [W/(m^2K)] \quad (25)$$

Mit

$q$  Wärmestromdichte von Warmseite zu Kaltseite [W/m<sup>2</sup>]

$T_{Innen}$  Innenlufttemperatur [°C]

$T_{Außen}$  Außenlufttemperatur [°C]

Der Wärmedurchlasswiderstand der Bauteilschichten und der dazwischen liegenden Luftschichten kann aus folgender Gleichung bestimmt werden.

$$\frac{1}{R} = \frac{q}{T_{OF\ Innen} - T_{OF\ Außen}} \quad [W/(m^2K)] \quad (26)$$

Mit

$q$  Wärmestromdichte von Warmseite zu Kaltseite [W/m<sup>2</sup>]

$T_{OF\ Innen}$  Oberflächentemperatur der dem Innenraum zugewandten Probenoberfläche [°C]

$T_{OF\ Außen}$  Oberflächentemperatur der dem Außenraum zugewandten Probenoberfläche [°C]

Bei der messwertbasierten Bestimmung von  $R$  wird die gemessene Wärmestromdichte herangezogen (messwertbasierte Anwendung der DIN EN ISO 6946).

### 3.7 U-Wert-Berechnung mit dem Layer Tool

Ein weiteres Verfahren zur Berechnung von U-Werten für mehrlagige Membranhüllen mit und ohne Funktionswerkstoffe ist in der Software des Programms „Layer-Tool“ umgesetzt [1]. Es wurde für die Analyse von Wärme- und Feuchtetransportvorgängen durch mehrlagige Materialaufbauten entwickelt. Durch die Eingabe der erforderlichen Parameter werden Temperatur- und Wasserdampfpartialdruckprofile in Schichtungsrichtung eindimensional berechnet. Berücksichtigt werden sowohl leitungsbasierte, konvektive und strahlungsbedingte Wärmeflüsse als auch der wasserdampfdiffusionsbedingte Feuchtetransport. Die Wärmetransportrate durch den gesamten Aufbau wird ebenfalls bestimmt.

Das Programm bietet zwei Berechnungsmodi: „Quick Analysis“ (Schnellanalyse) und „Full Analysis“ (Komplettanalyse). Der Modus „Quick Analysis“ ist eine im klassisch bauphysikalischen Sinne querschnittsbasierte Analyse der Wärmeleitfähigkeit einzelner Materialien. Der Modus „Full Analysis“ berücksichtigt zusätzlich die Transluzenz und Transparenz der Materialien und berechnet den strahlungsbedingten Wärmefluss durch die und zwischen den Schichtaufbauten sowie den leitungsbedingten und konvektiven Wärmefluss.

Bei den Probenmessungen kam ausschließlich der Modus „Full Analysis“ zur Anwendung. Er wird deshalb im Folgenden näher erläutert.

### 3.7.1 „Full Analysis“ (Komplettanalyse) Modus

Der Berechnungsmodus „Full Analysis“ basiert auf einer Methode, die von Michael Rubin [8] für die Berechnung des Wärmetransportes durch Fenster entwickelt wurde. Diese Methode nimmt eine konstante Temperatur über die Dicke der jeweiligen Glasscheibe an, was eine gute Näherung für Glas oder andere dünne Materialien darstellt, die über ein hohes Maß an thermischer Leitfähigkeit verfügen. Diese Annahme ist allerdings für dickere Aufbauten und isolierende Materialien ungeeignet.

Aus diesem Grund wurde die Methode deutlich erweitert und verbessert, um beliebige Kombinationen von Materialien unterschiedlicher Dicken und Wärmeleitfähigkeiten berücksichtigen zu können. Diese modifizierte Methode wird im Folgenden als „Klaus-Rubin-Methode“ bezeichnet.

#### 3.7.1.1 Klaus-Rubin-Methode

Eine Einschränkung der Rubin-Methode stellt die Annahme einer identischen Temperatur an beiden Oberflächen einer Materialschicht (siehe Abbildung 3.2) dar. Um diesen Nachteil zu vermeiden, werden bei der Klaus-Rubin-Methode die Materiallagen des Systemaufbaus in Oberflächen und Sub-Oberflächen unterteilt.

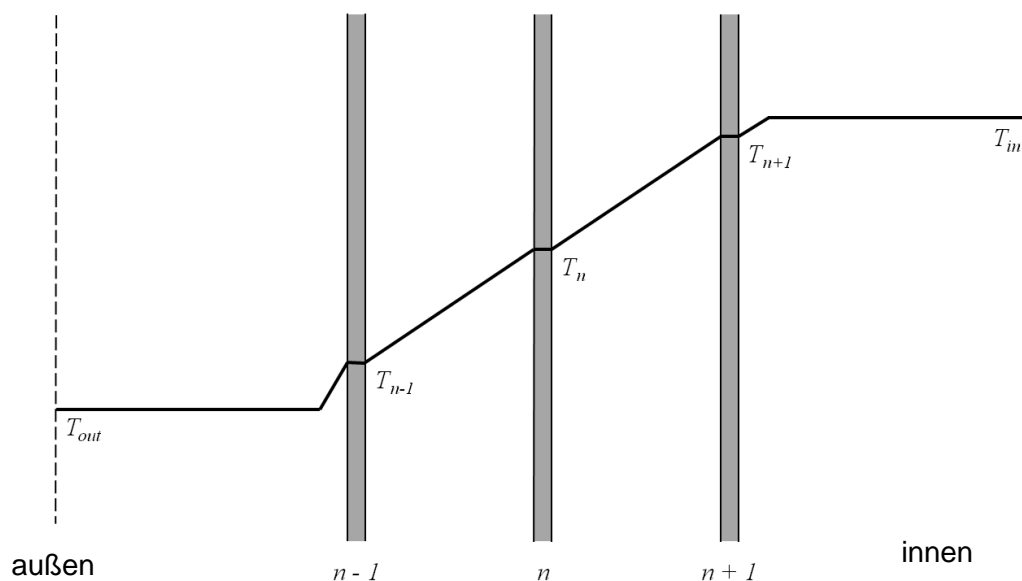


Abbildung 3.2: Temperaturverlauf Rubin-Methode

Jede Materiallage weist zwei Oberflächen auf: die eine zeigt nach außen, die andere nach innen. Diese Oberflächen werden jeweils in zwei Sub-Oberflächen unterteilt, wobei eine dieser Sub-Oberflächen nach innen und die andere nach außen zeigt. Diese Unterteilung ist in Abbildung 3.3 dargestellt.



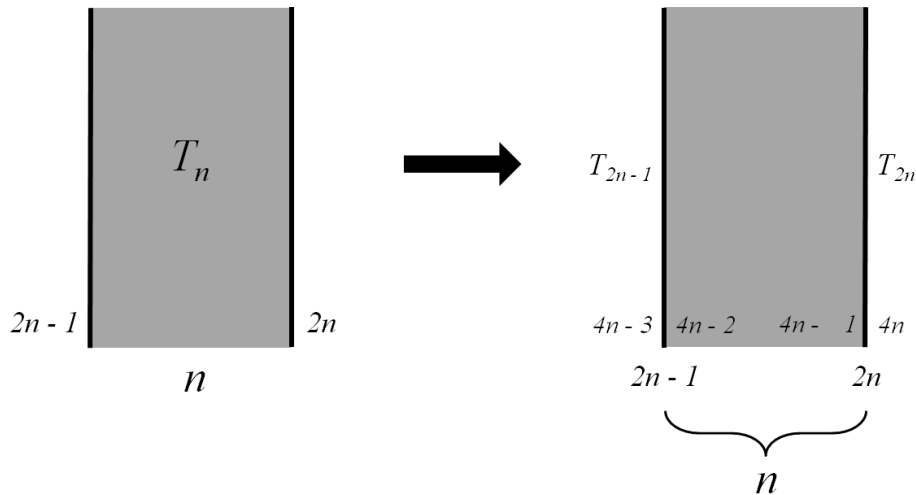


Abbildung 3.3: Unterteilung in Sub-Oberflächen

Die Oberflächen  $2n - 1$  und  $2n$  jeder Materialschicht  $n$  können unterschiedliche Temperaturen annehmen und ein Temperaturgradient entlang der Dickenrichtung des Materialquerschnittes ist abbildbar. Hierdurch wird die Berechnung von dickeren Schichten und isolierenden Materialien ermöglicht.

Gemäß dieser Unterteilung sind es die als infinitesimal dünn vorstellbaren Oberflächen, für die eine gleichmäßige Temperatur angenommen wird. Durch die weitere Einführung von Sub-Oberflächen  $4n - 3 \dots 4n$  erhält man eine Analogie zwischen der Rubin-Methode mit den dort verwendeten gleichen Temperaturen der beiden Oberflächen jeder Materiallage und der Klaus-Rubin-Methode mit den konstanten Oberflächentemperaturen der jeweiligen Materialoberflächen. Diese Analogie ermöglicht einen gleichen mathematischen Lösungsansatz beider Methoden, wobei eine signifikante Modifikation der Eingabeparameter notwendig ist, um die komplexere Anordnung der Oberflächen und Sub-Oberflächen zu berücksichtigen und das vorhandene Material und die Lufträume zwischen den Oberflächen einzubinden. Das modifizierte System ist in Abbildung 3.4 vollständig dargestellt.

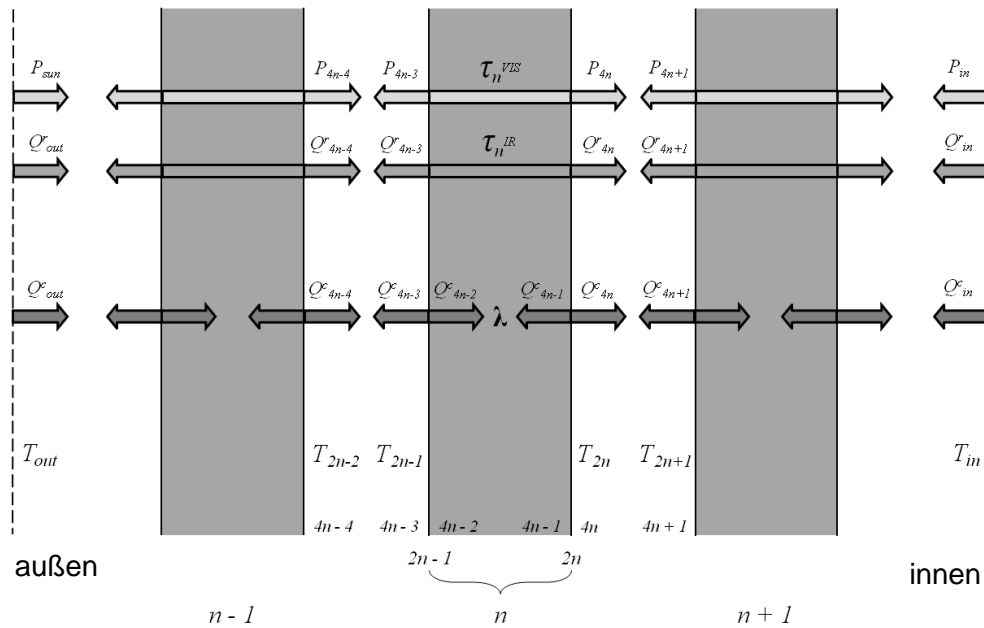


Abbildung 3.4: Modifiziertes System der Klaus-Rubin-Methode

Um das Wärmetransportverhalten innerhalb jeder Materialschicht richtig modellieren zu können, werden zwei verschiedene Ansätze verwendet. Zum einen wird für strahlungsbedingte Wärmeströme  $Q_n^r$  und  $P_n$  der Fluss zwischen den nach innen zeigenden Sub-Oberflächen  $4n - 2$  und  $4n$  durch die Transmission des Materials im IR- und VIS-Wellenlängenbereich berücksichtigt. Zum anderen werden die leitungsbedingten und konvektiven Wärmeströme  $Q_n^c$  durch die Wärmeleitfähigkeit des Materials  $\lambda_n$  erfasst. Die Gleichgewichtsbedingung, die bei der Rubin-Methode für jede Materialschicht verwendet wird, wird bei der Klaus-Rubin-Methode für die Änderung der Temperatur jeder Materialoberfläche bestimmt, wobei lediglich eine Modifikation der Bezeichnungssystematik erfolgt. Beispielsweise ergibt sich für die Oberfläche  $2n - 1$  folgende Systematik:

$$\Delta_{2n-1} = Q_{4n-3}^r + Q_{4n-2}^r - Q_{4n-4}^r - Q_{4n-1}^r + Q_{4n-3}^c + Q_{4n-2}^c - Q_{4n-4}^c - Q_{4n-1}^c + P_{4n-3} + P_{4n-2} - P_{4n-4} - P_{4n-1}$$

Mit der Klaus-Rubin-Methode kann durch diesen Ansatz ein Temperaturverlauf eines beliebigen mehrlagigen Aufbaus ermittelt werden. Das beinhaltet die Temperaturgradienten innerhalb der Materialschichtung. Abbildung 3.5 veranschaulicht diesen Ansatz.

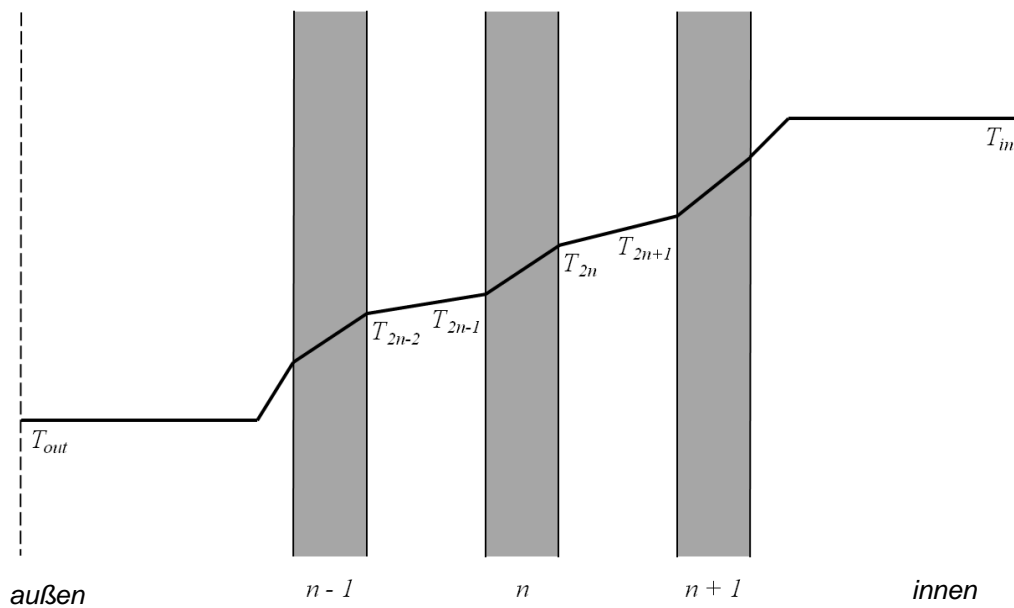


Abbildung 3.5: Temperaturverlauf bei Anwendung der Klaus-Rubin-Methode

### 3.8 Gesamtenergiedurchlassgrad

Der g-Wert oder Gesamtenergiedurchlassgrad ist ein Maß für die Energiedurchlässigkeit eines transparenten Bauteils und wird durch die für den Glasbau geltende DIN EN 410 geregelt. Weiter greifen für die Bemessung von Glas im Bauwesen die DIN EN 673, DIN EN 674, DIN EN 675 und DIN EN 12898, die sich auf die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) und des Emissionsgrades beziehen. Die Energiedurchlässigkeit wird anhand der vom Bauteil direkt durchgelassenen Sonnenstrahlung und der sekundären Wärmeabgabe nach innen ermittelt [2].

### 3.9 Begriffe

Es Definitionen der nachfolgenden Begriffe sind der DIN EN 410 entnommen:

#### Lichttransmissionsgrad

Anteil des auftreffenden Lichts, der von der Verglasung hindurch gelassen wird

#### Lichtreflexionsgrad

Anteil des auftreffenden Lichts, der von der Verglasung reflektiert wird

#### Gesamtenergiedurchlassgrad

Anteil der auftreffenden Strahlung, der von der Verglasung insgesamt hindurch gelassen wird

### 3.10 Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrades

Nach DIN EN 410 ergibt sich der Gesamtenergiedurchlassgrad aus der Summe des direkten Strahlungstransmissionsgrads und des sekundären Wärmeabgabegrads nach innen, welcher sich aus Konvektion und Strahlung ergibt.

$$g = \tau_e + q_i \quad [-] \quad (27)$$

$$\tau_e = \frac{\int_{300nm}^{2500nm} S_\lambda \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{300nm}^{2500nm} S_\lambda \cdot d\lambda} \quad (28)$$

Mit

$g$	Gesamtenergiedurchlassgrad	[-]
$r_e$	direkter Strahlungstransmissionsgrad	[-]
$q_i$	sekundärer Wärmeabgabegrad der Verglasung nach innen	[-]
$\tau_e$	gewichteter Mittelwert der Transmission	
$S_\lambda$	relative spektrale Globalstrahlungsflussverteilung	
$\tau(\lambda)$	mit dem Spektralphotometer gemessene Transmission bei der Wellenlänge $\lambda$	

Für den durch Strahlung und Konvektion bedingten sekundären Wärmeabgabegrad werden nach DIN EN 410 unterschiedliche Berechnungsverfahren angesetzt. Diese sind für ein- bis mehrlagige Verglasungen spezifiziert und werden im Wesentlichen durch den solaren Absorptionsgrad der einzelnen Scheiben sowie die Wärmeübergangskoeffizienten nach innen und außen bestimmt. Maßgeblich für die Wärmeübergangskoeffizienten sind dabei die Lage der Verglasung, die Windgeschwindigkeit an der äußeren Oberfläche, die Innen- und Außentemperaturen und die Temperaturen an der inneren und äußeren Bauteiloberfläche.

## 4 Messtechnische Infrastruktur am ILEK

Im Folgenden werden die am ILEK für die Vermessung der Wärmedurchgangseigenschaften der Proben genutzten Versuchsanordnungen und Probekörper sowie die zur Verfügung stehende messtechnische Infrastruktur beschrieben.

In den Versuchsständen Hotbox (geregelter Heizkasten), Dachprüfstand, Forschungsgebäude Aktivhaus B10 sowie ILEK-Fassadenprüfstand wurden Untersuchungen an folgenden Aufbauten durchgeführt:

- mehrlagiger Membranaufbau (2- und 3-Lagensysteme) ohne Funktionsmaterialien
- dreilagiger Membranaufbau mit Funktionsmaterialien
- pneumatisches Kissen (dreilagig mit Bedruckung)
- schaltbare Verglasung und Vakuumverglasung

### 4.1 Hotbox

Die Hotbox (siehe Abbildung 4.1) dient der Ermittlung von Wärmedurchgangskoeffizienten von Lagenaufbauten unter stationären Bedingungen (konstante Temperaturdifferenz zwischen der Warm- und der Kaltseite).

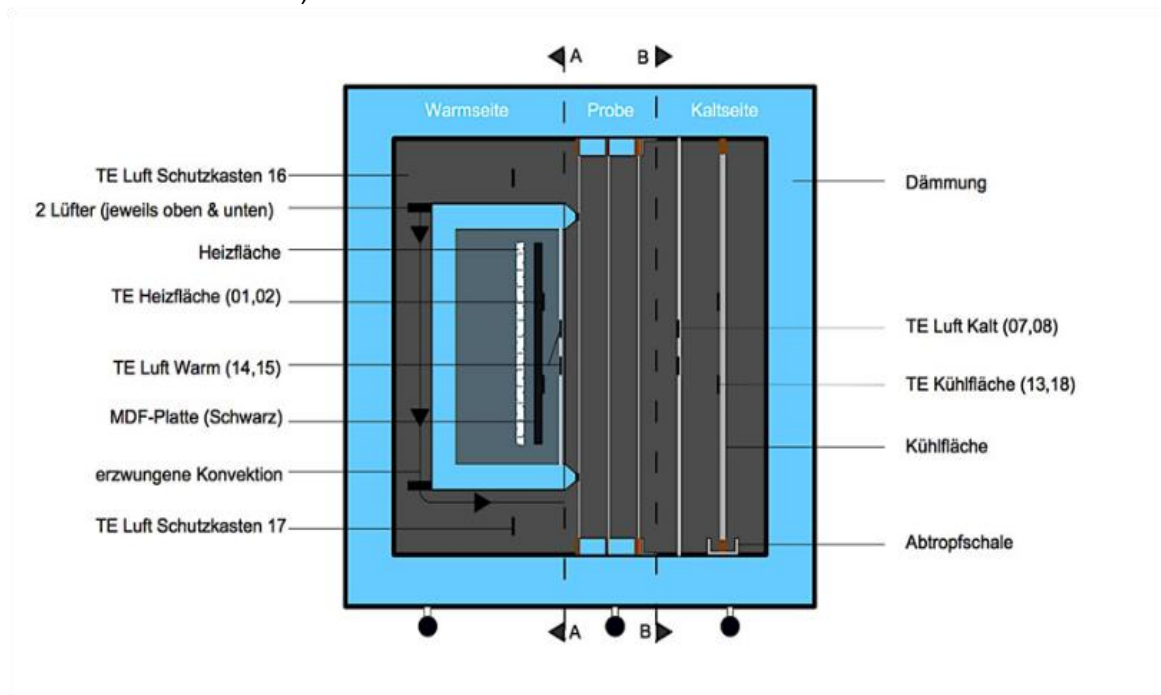


Abbildung 4.1: Schnitt durch den Heizkasten [9]

Zur messtechnischen Erfassung von Mehrlagensystemen verfügt das ILEK über eine sogenannte Hotbox. Mit Hilfe dieses Prüfstands lassen sich die bauphysikalischen Eigenschaften beliebiger Lagenkombinationen aus unterschiedlichen Materialien messtechnisch erfassen. Insbesondere die Ermittlung der U-Werte ist damit möglich. Dieser „Heizkasten“ wurde am ILEK in Anlehnung an die DIN EN ISO 8990 [10] konstruiert.

Im Folgenden wird der Aufbau der ILEK-Hotbox einschließlich ihrer Sensorik beschrieben. Anschließend wird die im Projektrahmen durchgeführte Referenzmessung anhand eines Probekörpers aus Polystyrol dokumentiert und die Messergebnisse dargestellt. Abschließend werden die Materialien aufgelistet, die dem ILEK für die Messungen zur Verfügung standen.

#### 4.1.1 Aufbau der ILEK-Hotbox

Die Versuchseinrichtung besteht aus drei Teilen, die zusammen den Heizkasten bilden. Innerhalb dieser nach außen wärmeisolierten Box wird unterschieden zwischen der Warm- und der Kaltseite (siehe Abbildung 4.2). Der mittlere Bereich dient der Aufnahme unterschiedlichster Mehrlagenaufbauten und trennt die warme von der kalten Seite. Da sowohl die Warm- als auch die Kaltseite unabhängig voneinander thermisch konditioniert werden können, ist es möglich, unterschiedliche Temperaturdifferenzen zwischen diesen beiden Seiten einzustellen. Hierfür wurde auf der Warmseite ein elektrisches Heizelement installiert, analog dazu wird die Kaltseite mit Hilfe eines Kühlaggregats thermisch konditioniert.

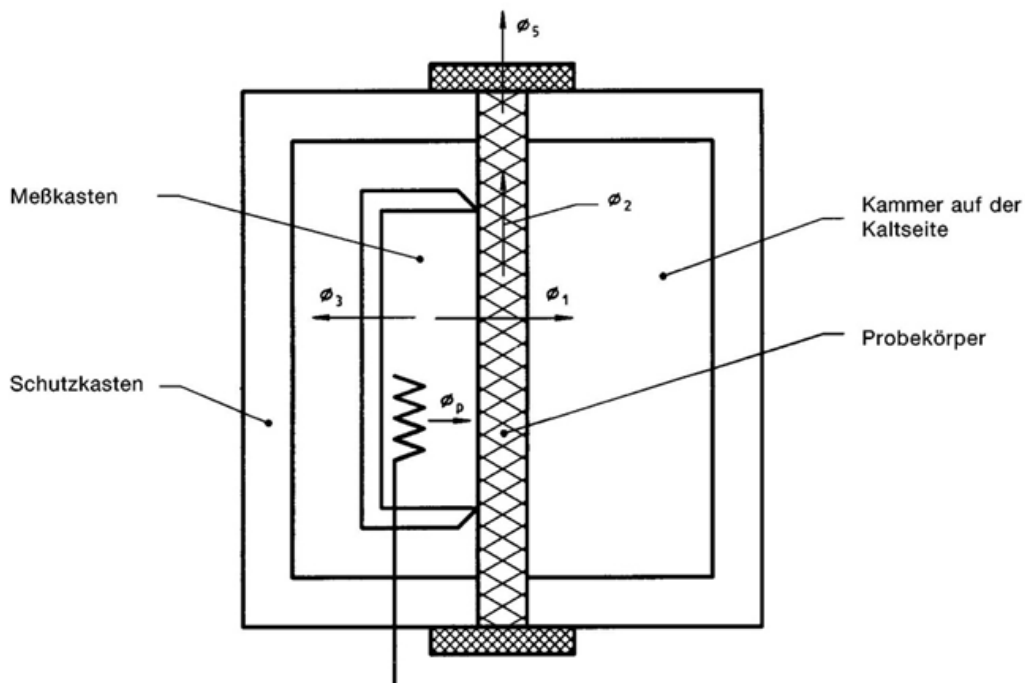


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau des Heizkastens nach DIN EN ISO 8990

Die Temperaturen in den Heizkastenbereichen werden durch eine zentrale Mess- und Steuerungseinheit erfasst. Dieses Gerät steuert gleichzeitig die Temperaturen auf der Warmseite. Die Kaltseite wird über die Steuerung des Kühlaggregats konditioniert. Ergänzend dazu können auch die Werte der relativen Feuchte gemessen werden.

Die zentrale Steuerungseinheit erfasst gleichzeitig auch die Oberflächentemperaturen auf den Probenoberflächen, die sowohl der Warm- als auch der Kaltseite zugewandt sind. Zwei Wärmeflussplatten erfassen die Wärmeströme, die in Folge des Temperaturgefälles innerhalb der Hotbox durch den Probenaufbau fließen.

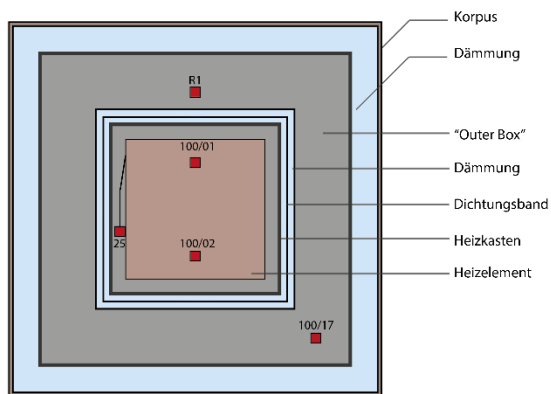
Zur Erreichung einer möglichst genauen Erfassung der Wärmeströme durch die Proben verfügt die Hotbox gemäß Norm über einen zusätzlichen gedämmten halboffenen Messkasten im Warmseitenbereich. Dieser definiert die Probenmessfläche und schließt luftdicht mit der Probe ab, um Konvektion zwischen dem Messbereich und dem Schutzkastenbereich auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Illustration in Abbildung 4.3 zeigt die schematische Anordnung der Temperatursensoren innerhalb des Heizkastens. Sie gliedert sich in sechs Darstellungen, jeweils drei für die Warmseite (links) und drei für die Kaltseite (rechts). Die oberen beiden Grafiken zeigen die Sensorpositionen für die Messung der Oberflächentemperaturen der Heiz- und Kühlflächen sowie der Temperaturen der Lufträume (Warmseite). Die Grafiken in der Mitte zeigen die Positionen der Temperatursensoren im Luftraum sowohl der Warm- als auch der Kaltseite. Die unteren beiden Illustrationen zeigen die Anordnungen der Messpunkte auf dem Probekörper – sowohl für die der Warmseite zugewandte (links) als auch die der Kaltseite zugewandte Probenoberfläche. Neben Temperaturfühlern sind auf der Probe auch die Wärmeflussplatten angebracht.

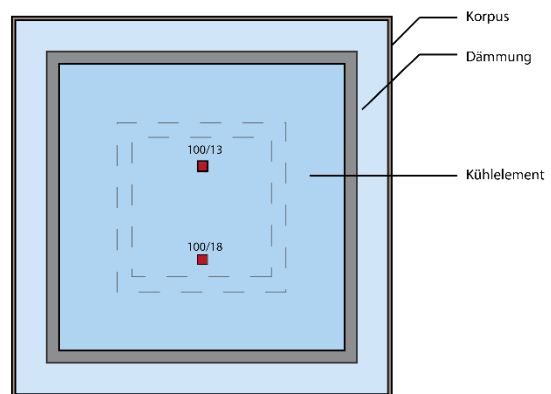
Zur Bestimmung der wärmetechnischen Kennwerte einer Probe werden die Sensoren zur Erfassung der Luftraumtemperaturen (siehe mittlere beiden Grafiken) sowie die Fühler auf den Probenoberflächen herangezogen (siehe untere beiden Grafiken). Alle übrigen Sensoren dienen der Steuerung und Konditionierung des Gesamtsystems unter Miteinbeziehung der Messwerte im Messkastenbereich.

Zunächst fand eine Kalibrierung der Sensoren der Hotbox statt:

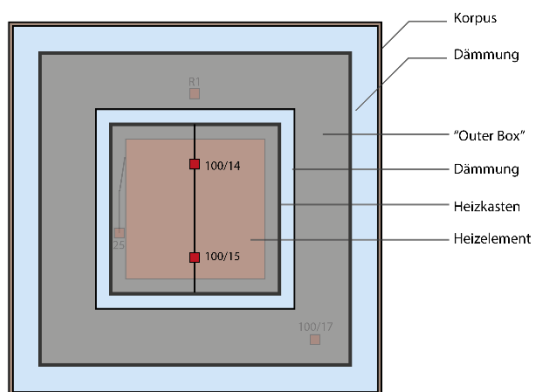
Für die Messungen des Temperatur- und Luftfeuchteverlaufs stehen 20 Temperatursensoren (Typ PT100) und 7 Feuchtigkeitsaufnehmer (Typ Linear Voltage) zur Verfügung. Die Kalibrierung der Temperatursensoren erfolgte mittels eines Wasserbads bei drei verschiedenen Temperaturen (0°C, 20°C, 40°C) und eines geeichten Referenzthermometers. Die Kalibrierung der Feuchtesensoren beruhte auf Eigenschaften verschiedener gesättigter Salzlösungen. In einem abgeschlossenen Luftraum über verschiedenen Salzlösungen stellen sich bestimmte Feuchtwerte ein, die zur Kalibrierung benutzt werden können. Bei Referenzmessung zur Überprüfung der Kalibrierung wiesen die Temperatursensoren eine Toleranz von  $\pm 0,05$  K auf. Die Genauigkeit der Feuchtigkeitsensoren betrug  $\pm 5$  % rel. Luftfeuchtigkeit.



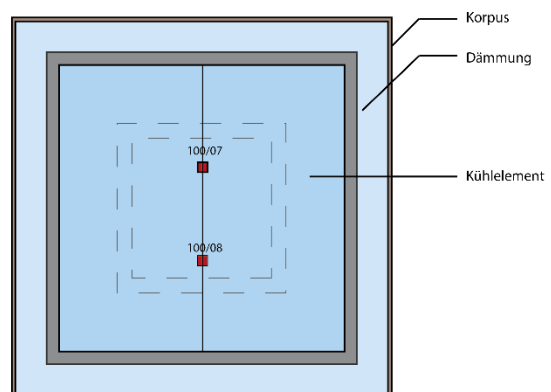
Hotbox Warmseite Heizelement



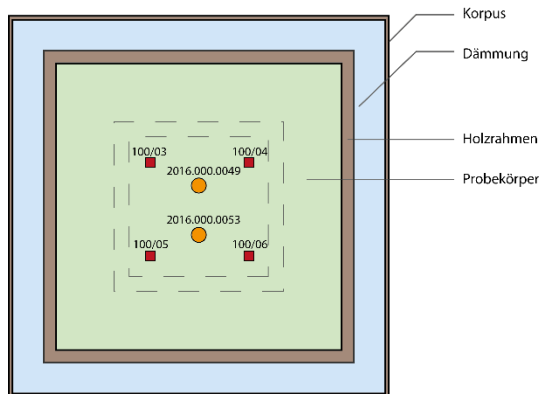
Hotbox Kaltseite Kühlelement



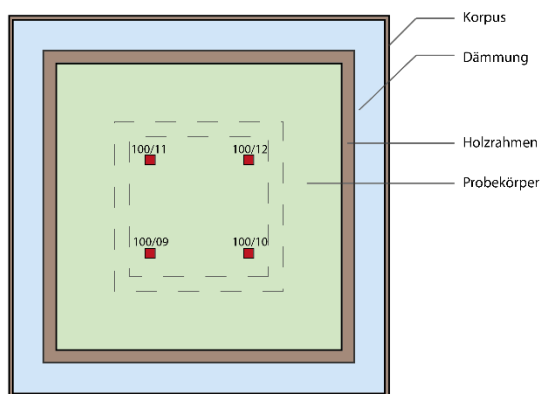
Hotbox Warmseite Luftraum



Hotbox Kaltseite Luftraum



Hotbox Warmseite Probekörper



Hotbox Kaltseite Probekörper

- Temperatursensor
- Wärmeflussplatte

Abbildung 4.3: Illustration der Sensorpositionen des ILEK-Heizkastens



#### 4.1.2 Referenzmessungen an einem Probekörper aus 100 mm dickem Polystyrol

Grundsätzlich gliedert sich der Ablauf einer jeden Versuchsdurchführung in der Hotbox in zwei Phasen. Innerhalb der ersten Phase wird sowohl die Warm- als auch die Kaltseite so temperiert, dass sich ein nahezu konstantes Temperaturniveau auf beiden Seiten der Probe durch die Regelungstechnik erreichen lässt. Die Benutzeroberfläche der Hotbox-Regelungssoftware informiert den Anwender hierüber, indem ein optisches Signal auf den sogenannten „Konstantmodus“ hinweist. Die Dauer bis zum Erreichen dieses Modus ist abhängig von der Art und dem Aufbau der Messprobe. Sie beträgt je nach Probe zwischen ein bis drei Tagen. Da bis zum Erreichen des Konstantmodus die Zufuhr an thermischer Energie getaktet erfolgt, muss das System beim Erreichen dieses Zustands umgeschaltet werden auf eine kontinuierliche Einbringung einer vom Programm ermittelten geringen Wärmeleistung. Wird dies über den Zeitraum von ungefähr zwei Tagen aufrechterhalten, dann stellt sich ein stationärer Zustand ein und eine Messung zur U-Wertermittlung kann erfolgen.

Vor dem Beginn von Testmessungen an unterschiedlichen Membranen und Werkstoffen ist es erforderlich, einen Nachweis über die Plausibilität der Ausgabewerte der Hotbox zu erbringen. Hierfür wurde ein handelsübliches Dämmmaterial verwendet, dessen Bemessungsbeiwert der Wärmeleitfähigkeit bekannt ist. Durch die messtechnische Erfassung dieser Probe in der Hotbox kann auf der Grundlage der gewonnenen Daten rechnerisch nachvollzogen werden, welche Wärmeleitfähigkeit diese Probe im Versuchsstand aufweist, so dass abschließend eine prozentuale Abweichung des Ist- vom Sollwert beschrieben werden kann. Für die Referenzmessung wurde ein 100 mm dicker Probekörper aus dem Dämmstoff Styrodur 2800 C der Firma BASF verwendet. Laut Hersteller weist dieser eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,036 \text{ W/(mK)}$  auf (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Werkstoffkenndaten des Referenzprobekörpers

Hersteller	BASF
Bezeichnung	Styrodur 2800 C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]	0.035
Wärmedurchlasswiderstand [(m <sup>2</sup> *K)/W]	3
Bemessungswert von der Wärmeleitfähigkeit nach DIN 4108 [W/(m*K)]	0.036
Länge [cm]	125
Breite [cm]	60
Gesamtdicke [cm]	10
Brandverhalten	B1

##### 4.1.2.1 Probenherstellung Probekörper

Da die Abmessungen für die Hotbox-Probe größer sind als die Modulgröße einer Styrodurplatte, musste der Probekörper aus einzelnen Elementen zusammengefügt werden.

Nach dem Grobzuschnitt der einzelnen Polystyrolblöcke wurden diese mit Hilfe eines für Polystyrol geeigneten Klebstoffs miteinander verbunden. Dem abschließenden Formatzuschnitt des Rohlings auf das finale Probenmaß folgte ein letzter Feinschliff der Oberflächen.



Abbildung 4.4: Referenzprobekörper während des Aushärtens des Klebstoffes

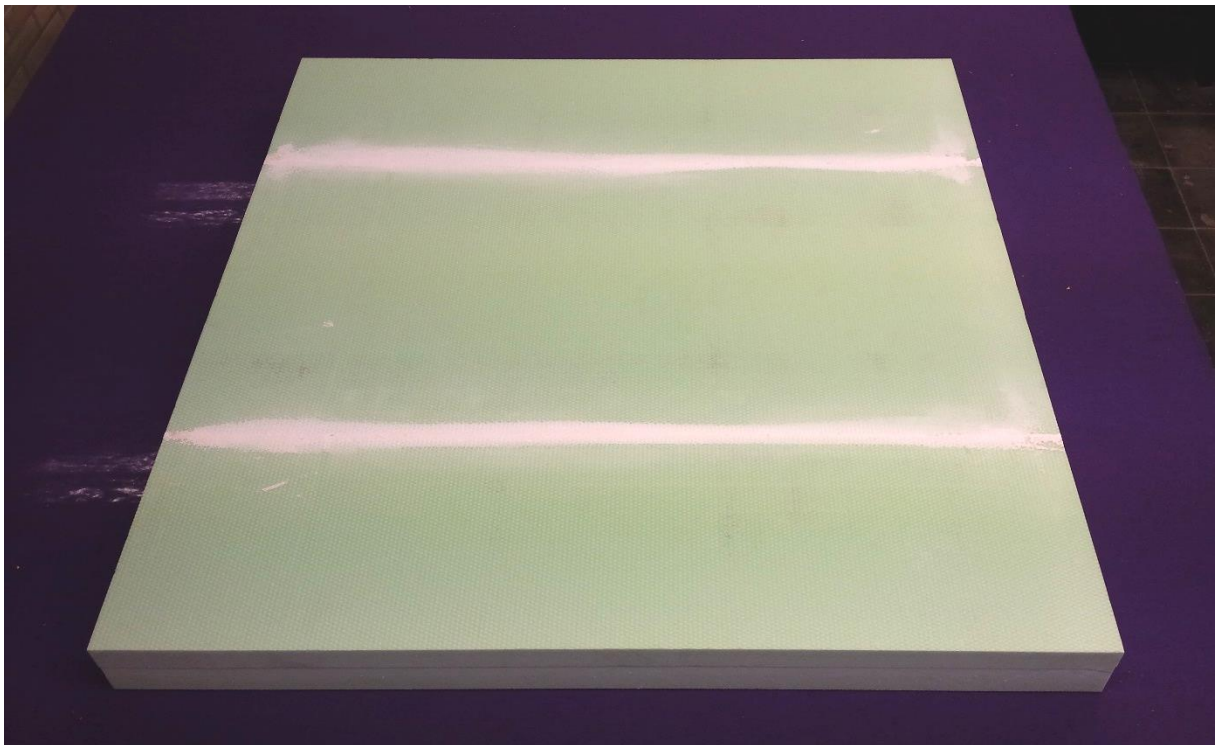


Abbildung 4.5: Referenzprobekörper vor dem Einbau in die Hotbox

Im Anschluss an die Probenkonfektionierung erfolgte die Markierung der Sensorpositionen unter Verwendung einer Rasterschablone, die eine exakte Anordnung der vier Temperatursensoren und der beiden Wärmeflussplatten ermöglichte. Darüber hinaus konnten mit dieser Schablone alle erforderlichen Dichtungsbahnen auf der Probe befestigt werden, die einen unkontrollierten Luftaustausch im Warmseitenbereich der Hotbox zwischen dem Messkasten und dem Schutzkasten vermeiden sollten.

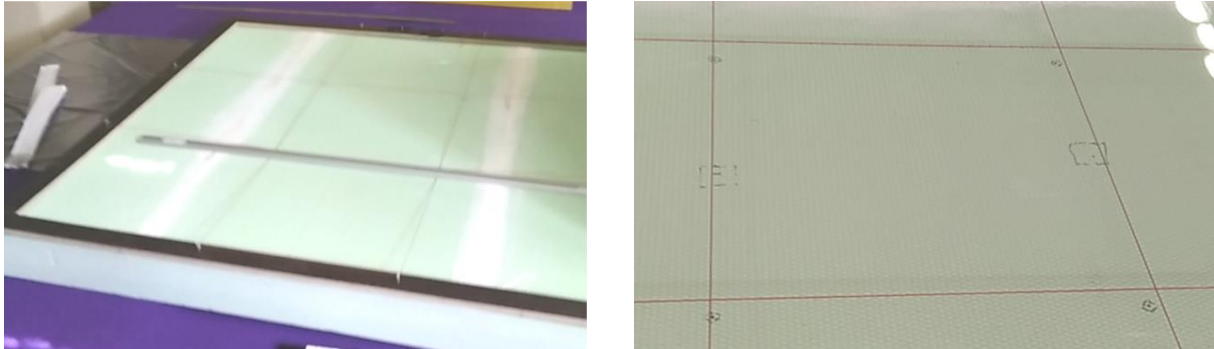


Abbildung 4.6: Positionierung der Rasterschablone (linkes Bild) zur Markierung der Sensorpositionen auf dem Referenzprobekörper (rechtes Bild)

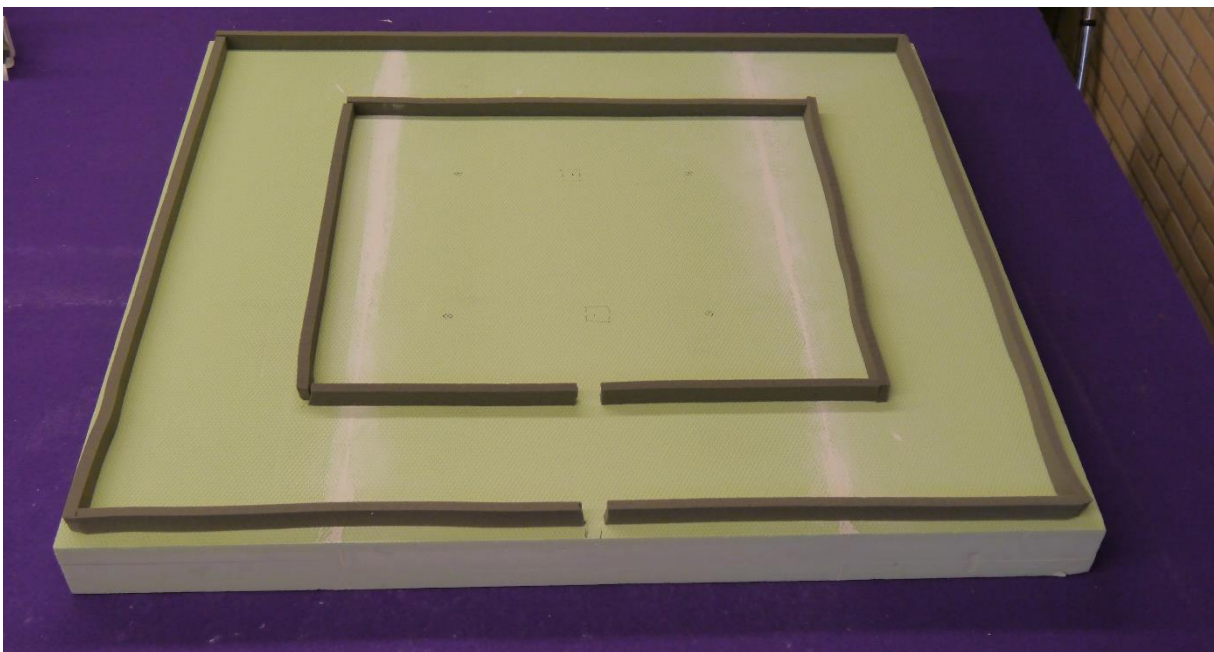


Abbildung 4.7: Befestigung des Abdichtungsbandes auf dem Referenzprobekörper

#### 4.1.2.2 Einbau der Probe in die Hotbox

Die Probe wurde in den mittleren Bereich der Hotbox eingebaut, indem sie mit Hilfe von Stahlwinkeln am Falz des mittleren Hotbox-Kastens fixiert wurde. Der Bereich zwischen der Probe und dem Falz wurde doppelt abgedichtet, zum einen mit einem fugenfüllenden Abdichtungsband, zum anderen mit einem Aluminiumklebeband, um den Luftaustausch an den potentiellen Überströmöffnungen zu verhindern. Im Anschluss erfolgte die Befestigung der Sensoren auf



der Probe. Hierfür wurden diese zunächst mit einer Wärmeleitpaste bestrichen und dann entsprechend der vorgesehenen Markierung durch den Einsatz von geeigneten Klebebändern befestigt.



Abbildung 4.8: Warmseite der Hotbox mit eingebautem Referenzprobekörper (linkes Bild), auf dem anschließend die Sensoren befestigt wurden (rechtes Bild)

#### 4.1.2.3 Versuchsauswertung

Aus den Messergebnissen der Referenzmessung lassen sich folgende Erkenntnisse ziehen:

Laut Herstellerangaben weist der Dämmstoff einen Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von 0,036 W/(mK) auf. Die rechnerische Auswertung der Messergebnisse aus dem Hotbox-Versuch ergab eine Wärmeleitfähigkeit von 0,038 W/(mK), was einer Abweichung in Höhe von ungefähr sieben Prozent entspricht. Diese Abweichung liegt im Bereich der Genauigkeit der eingesetzten Messtechnik.

Nach DIN EN ISO 6946 wurden der U-Wert und der Bemessungsbeiwert der Wärmeleitfähigkeit für die Referenzprobe mit den folgenden Parametern und Formeln berechnet.

$U$	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	$\left[ \frac{W}{m^2K} \right]$
$R_{se}$	äußerer Wärmeübergangswiderstand	$\left[ \frac{m^2K}{W} \right]$

$R_{si}$	innerer Wärmeübergangswiderstand	$\left[ \frac{m^2K}{W} \right]$
$R$	Wärmedurchlasswiderstand des Lagenaufbaus	$\left[ \frac{m^2K}{W} \right]$
$q$	Wärmefluss von Warmseite zu Kaltseite	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$T_{warm}$	Lufttemperatur Warmseite	$[^{\circ}C]$
$T_{kalt}$	Lufttemperatur Kaltseite	$[^{\circ}C]$
$T_{OFwarm}$	Oberflächentemperatur Warmseite	$[^{\circ}C]$
$T_{OFkalt}$	Oberflächentemperatur Kaltseite	$[^{\circ}C]$
$d_i$	Schichtdicke i	$[m]$
$\lambda_i$	Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	$\left[ \frac{W}{mK} \right]$

Zur Bestimmung des U-Wertes wird das Verhältnis des Wärmeflusses zum Temperaturunterschied zwischen der Warm- und Kaltseite ermittelt (siehe Gleichung 31). Der 1/R-Wert (siehe Gleichung 32) wird anhand der Differenz der Oberflächentemperaturen bestimmt. Der U-Wert lässt sich aus den Übergangswiderständen und der Wärmeleitfähigkeit bestimmen.

$$U = \frac{1}{R_{se}} + \frac{1}{\frac{d_1}{\lambda_1}} + \frac{1}{\frac{d_2}{\lambda_2}} + \frac{1}{\frac{d_{\dots}}{\lambda_{\dots}}} + \frac{1}{R_{si}} \quad \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (29)$$

$$U = \frac{1}{R_{se}} + \frac{1}{\frac{d}{\lambda}} + \frac{1}{R_{si}} \quad \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (30)$$

Für den einlagigen Aufbau der 100 mm dicken Polystyrolprobe ergibt sich somit ein berechneter U-Wert in Höhe von 0,339 W/m<sup>2</sup>K.

$$R_{se} = 0,04 \quad \left[ \frac{m^2K}{W} \right]$$

$$R_{si} = 0,13 \quad \left[ \frac{m^2K}{W} \right]$$

$$d_1 = 0,1 \quad [m]$$

$$\lambda_1 = 0,036 \quad \left[ \frac{W}{mK} \right]$$

$$U = 0,339 \quad \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

Der messtechnisch ermittelte U-Wert wurde auf der Grundlage der nachfolgenden Formeln und Parameter bestimmt. Es ergibt sich ein U-Wert aus der Messung für den stationären Zustand in Höhe von 0,353 W/m<sup>2</sup>K.

$$U = \frac{q}{T_{warm} - T_{kalt}} = \frac{1}{R_{se} + R + R_{si}} \quad \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (31)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{q}{T_{OFwarm} + T_{OFkalt}} \quad \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (32)$$

$$U = \frac{1}{R_{se} + \frac{T_{OFwarm} - T_{OFkalt}}{q} + R_{si}} \quad \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (33)$$

Mit

$$d_i = 0,1 \quad [m]$$

$$T_{OFwarm} = 40,47 \quad [^{\circ}C]$$

$$T_{OFkalt} = 6,53 \quad [^{\circ}C]$$

$$U = 0,353 \quad \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

Im Zuge des Abgleichs des Bemessungswerts der Wärmeleitfähigkeit mit den Messergebnissen konnte nach der Anwendung der folgenden Formeln eine Wärmeleitfähigkeit von 0,038 W/(mK) errechnet werden.

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{T_{OFwarm} - T_{OFkalt}}{q} \quad \left[ \frac{m^2K}{W} \right] \quad (34)$$

$$\lambda = \frac{q * d}{T_{OFwarm} - T_{OFkalt}} \quad \left[ \frac{W}{mK} \right] \quad (35)$$

Mit

$$q = 12,76 \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$d_1 = 0,1 \quad [m]$$

$$T_{OFwarm} = 40,47 \quad [^{\circ}C]$$

$$T_{OFkalt} = 6,53 \quad [^{\circ}C]$$

Die oben aufgeführten Messergebnisse ergeben eingesetzt in Gleichung (35):

$$\lambda = 0,0376 \quad \left[ \frac{W}{mK} \right]$$

Bei diesen Messungen wurden die tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Hotbox, die Einflüsse auf die Wärmeübergangswiderstände haben, nicht berücksichtigt, sondern es wurden die Wärmeübergangswiderstände aus der Norm übernommen. Im Zuge einer präziseren Betrachtung werden für nachfolgende Berechnungen die Strömungszustände und die sich daraus ergebenden Wärmeübergangswiderstände einbezogen. Hierzu erfolgten Strömungsmessungen im Heizkasten.

#### 4.1.3 Exemplarische Probenkonfektionierung für die Hotbox

Für die Herstellung der Membranproben wurden die Membranen zunächst abgerollt und grob zugeschnitten. Danach erfolgte eine Kennzeichnung der Kett- und Schussrichtung sowie der „Vorder- und Rückseite“ des textilen Werkstoffes. Im Anschluss daran wurden die vorgefertigten Montagerahmen (Abmessungen ca. 1440 mm x 1440 mm x 10 mm) mit doppelseitigem Klebeband versehen. Nach dem Entfernen der Schutzfolie der Klebebänder konnten die Membranproben so mit den textilen Werkstoffen verbunden werden, dass die Textilien einen einheitlichen Überstand aufwiesen, der abschließend auf Maß zugeschnitten wurde. Da einige der Membranen sogenannte antiadhäsive Eigenschaften aufweisen, war eine Befestigung mit doppelseitigem Klebeband nicht immer möglich. Deswegen wurden diese Membranen zusätzlich mit Tackerklammern auf dem Rahmen fixiert, um den Verbund zwischen Rahmen und Textil sicherstellen zu können. Aufgrund ihrer minimalen Abmessungen kamen Klammern zum Einsatz, so dass eine minimale konstruktive Aufbauhöhe der Rahmenkonstruktion (ca. 11 mm) erzielt werden konnte. Für jedes Membranmaterial wurden entsprechende Rahmen hergestellt, so dass eine Kombination untereinander möglich war. Im Zuge einer strukturierten Vorgehensweise wurden die einzelnen Membranen in der Hotbox untersucht und die Messergebnisse ausgewertet.



Abbildung 4.9: Membranrolle vor dem Grobzuschnitt (linkes Bild), vorkonfektionierte Probe nach dem Grobzuschnitt (rechtes Bild)

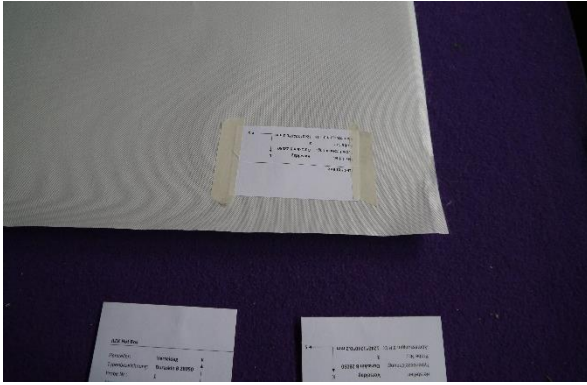


Abbildung 4.10: Vorabkennzeichnung der Probe (linkes Bild), Entfernen der Schutzfolie des doppelseitigen Klebbands vor dem Aufbringen des Montagerahmens auf die Probe (rechtes Bild)



Abbildung 4.11: Aufkleben des Montagerahmens auf die Probe (linkes Bild), Formatschnitt der Probe (rechtes Bild)



Abbildung 4.12: Konfektionierte Probe auf Rahmen (linkes Bild), zusätzliche mechanische Befestigung der Membrane auf dem Montagerahmen (rechtes Bild)



## 4.2 Dachprüfstand

Neben der Hotbox (Vermessung von Proben im stationären Zustand) kam der Dachprüfstand des ILEK für die Vermessung von Proben unter Freilandbedingungen zum Einsatz. Mit diesem Versuchsstand am Standort Pfaffenwandring 7 in Stuttgart-Vaihingen (Flachdach des Uni-Gebäudes) können die wärmetechnischen Kennwerte von Lagenaufbauten unter realen Klimabedingungen messtechnisch erfasst werden. Zusätzlich ist in diesem Bereich eine Wetterstation installiert, welche die relevanten Außenklimadaten samt Strahlungswerten, die für die U-Wert-Ermittlungen notwendig sind, erfasst.



Abbildung 4.13: Luftbild mit Standort des Dachprüfstandes, Pfaffenwandring 7, Stuttgart



Abbildung 4.14: Prüfkasten des Dachprüfstandes, Pfaffenwandring 7, Stuttgart

Der Dachprüfstand besteht aus einem thermisch gedämmten, quadratischen, mehrteiligen Holzkasten. Die Proben sind in der Horizontalen angeordnet. Der Messbereich umfasst eine Fläche von 730 mm x 730 mm. Der Kasten ist modular aufgebaut und setzt sich aus mehreren

Segmenten zusammen. Zum Schutz vor der Witterung kann der Messkasten außerhalb der Messzeiten abgedeckt werden.

In den Versuchsstand (siehe Abbildung 4.15) können horizontal unterschiedliche Lagen übereinander eingebracht und befestigt werden, so dass der gesamte Lagenaufbau (in diesem Fall bestehend aus Lage M1 innen, M2 Mittellage und M3 außen) untersucht werden kann. Neben einer Vielzahl an Sensoren im Innenbereich (Temperaturfühler TE und Wärmeflussplatten WFP) befindet sich eine Heizplatte (HP) am Boden des Kastens, die eine thermische Konditionierung des unteren Raumes zwischen dem Kastenboden und der unteren Gewebelage ermöglicht. Die Heizplatte besteht aus einer 5 mm dicken Aluminiumplatte, an deren Unterseite Heizfolien befestigt sind. Die Aluminiumplatte hat durch ihre matt schwarze Oberseite einen vergleichbaren Emissionsgrad wie die Seitenverkleidungen des Kastens aus schwarzem MDF.

Der In-situ-Prüfstand dient der messtechnischen Erfassung der Wärmeströme durch die Mehrlagenaufbauten. Mit ihm lässt sich für die entsprechenden Messzeiträume der Wärmedurchgangskoeffizient für instationäre Wärmeübertragungsvorgänge bestimmen. Die äußere Probenoberfläche steht im Strahlungsaustausch mit dem Himmel über dem Messkasten.

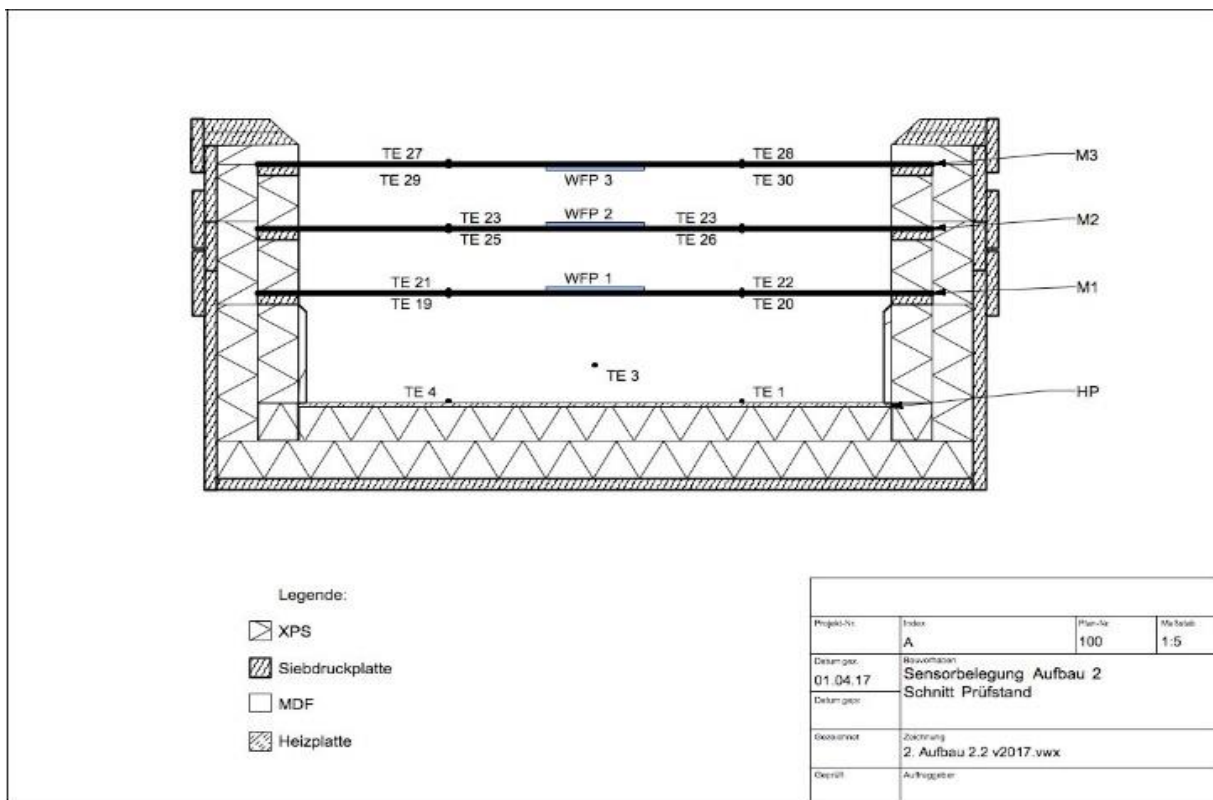


Abbildung 4.15: Exemplarischer Schnitt durch den Dachprüfstand mit einem dreilagigen-Aufbau einschließlich Darstellung der Sensorpositionen [11]

#### 4.2.1 Messtechnik

Nachfolgend wird die verwendete Messtechnik zur Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten vorgestellt. Es werden die Oberflächentemperaturen und die Wärmeströme an den Membranflächen sowie die eintreffende Strahlung der Sonne und des Himmels gemessen.

#### 4.2.1.1 Wetterstation

In unmittelbarer Nähe zum Messkasten befindet sich ein Gestell aus Aluminiumprofilen, auf dem die externen Sensoren einer Funkwetterstation montiert sind. Da sich das Gestell in der Mitte des Daches befindet, kann der Wind frei zirkulieren und es besteht keine Verschattungsgefahr. Es werden unter anderem Daten eines Thermo-Hygrometers, eines Regensensors und eines Anemometers erfasst. Ausgewertet werden darüber hinaus die Außenlufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit.

Die Messdaten werden in der Station kontinuierlich erfasst und gespeichert. Mittels der zur Wetterstation gehörenden Software „Nexus“ der Firma tfa kann der Speicher der Basisstation am Computer ausgelesen werden.

Zu Beginn der Versuche war die Wetterstation so eingestellt, dass die Werte alle 10 Minuten gespeichert wurden. Ab dem zweiten Aufbau erfolgte die Messdatenerfassung mit der maximalen Speicherrate im Fünf-Minuten-Takt.

Die erreichbare Genauigkeit der Wetterstation beträgt bei Messung der Temperatur  $\pm 1$  °C. Die Luftfeuchtigkeit weicht bis zu  $\pm 5$  % ab. Bei der Windgeschwindigkeit sind es  $\pm 2$  mph (ca. 3,218 km/h)  $\pm 5$  % [12].

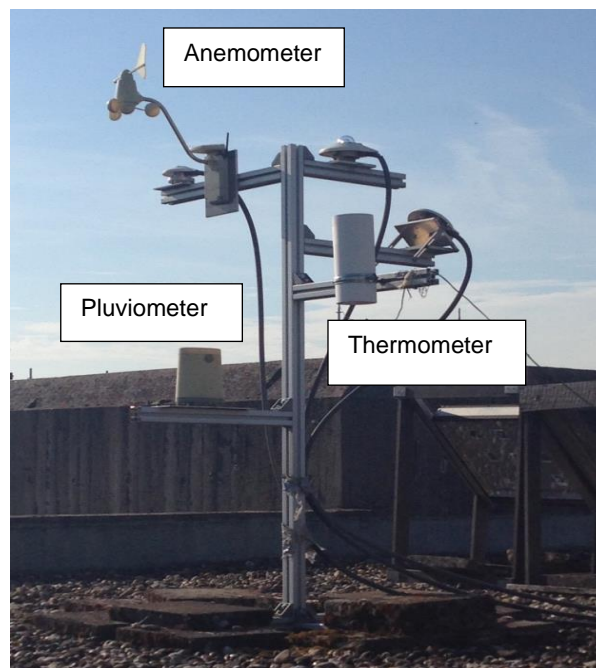


Abbildung 4.16: Übersicht über die Sensoren der Wetterstation [11]

#### 4.2.1.2 Thermoelemente

Für die Messung der Oberflächentemperaturen der Membranen kamen Thermoelemente zum Einsatz. Der zugrunde liegende physikalische Vorgang, der die Erfassung der Temperatur ermöglicht, ist der Seebeck-Effekt. Verwendet wurden Thermoelemente vom Typ K. Die Einsatztemperatur dieser Sensoren reicht von  $-50$  °C bis  $250$  °C [13]. Die Umrechnung der erfassten Spannungswerte in Temperaturen erfolgte durch die Messsoftware [14]. Die Thermoelemente

wurden auf den Membranen befestigt. Die Verbindung vom Thermoelement zum Messdatenerfassungsgerät wurde mit Ausgleichsleitungen über Steckverbinder hergestellt, die aus denselben Legierungen wie das Thermoelement selbst bestehen. Der Stromkreis wird lediglich verlängert, ohne die Thermospannung zu beeinflussen [15]. Die Grenzabweichung nach DIN IEC 584 für diesen Typ eines Thermoelements in der gegebenen Genauigkeitsklasse beträgt  $\pm 1.5 \text{ K}$  im Bereich von  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $375 \text{ }^\circ\text{C}$  [16].

#### 4.2.1.3 Wärmeflussplatten

Zur Erfassung der Wärmeströme durch die Membranflächen kamen Wärmeflussplatten zum Einsatz. Diese Sensoren basieren auf dem gleichen Messprinzip wie Thermoelemente. Innerhalb der Wärmeflussplatte sind mehrere hundert Thermoelemente in gleicher Orientierung in Reihe geschaltet. Es handelt sich dabei um passive Sensoren, deren Ausgangsspannung von der Messgröße beeinflusst wird. Die ausgegebene Thermospannung ist proportional zur Wärmestromdichte durch die Wärmeflussplatte [17].

Jede Wärmeflussplatte hat einen individuellen Kalibrierwert als Proportionalitätsfaktor. Mit diesem erfolgt die Umrechnung der ausgegebenen Spannung in den resultierenden Wärmestrom pro Flächeneinheit mit folgender Formel [17]:

$$\dot{q} = c \cdot U \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (36)$$

Mit

$c$  Kalibrierwert Wärmeflussplatte [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ mV})$ ]

$U$  gemessene Thermospannung [ $\text{mV}$ ]

Die Anschlussleitung wird an die Wärmeflussplatte gelötet und verläuft ununterbrochen von der Anschlussstelle am Sensor bis zum Datenerfassungsgerät. Verwendet wurden Wärmeflussplatten des Herstellers Phymeas vom Typ 6T mit den Abmessungen  $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$  [14]. Sie bestehen aus flexiblem Silikongummi und können sich so den leicht gebogenen Membranen gut anpassen. Jedoch muss bei der Installation darauf geachtet werden, dass die filigranen internen Leiterbahnen nicht beschädigt werden. Zwischen Membran und Wärmeflussplatte wird Wärmeleitpaste aufgebracht. Sie dient dazu, einen gleichmäßigen und vollflächigen Kontakt zwischen den beiden Oberflächen herzustellen. Zusätzlich besitzt sie eine hohe Wärmeleitfähigkeit von  $5 \text{ W}/\text{m}$  [18]. Ein  $30 \text{ mm}$  breiter Rand ist nicht Bestandteil des Messbereichs der Wärmeflussplatte. Dieser wird dazu benutzt, die Wärmeflussplatte sowie die Anschlussleitung mittels Klebeband zu fixieren. Jede Phymeas Wärmeflussplatte besitzt einen Aufkleber. Ein Wärmefluss durch die Platte in Richtung der Seite mit dem Aufkleber ist als positiv definiert.

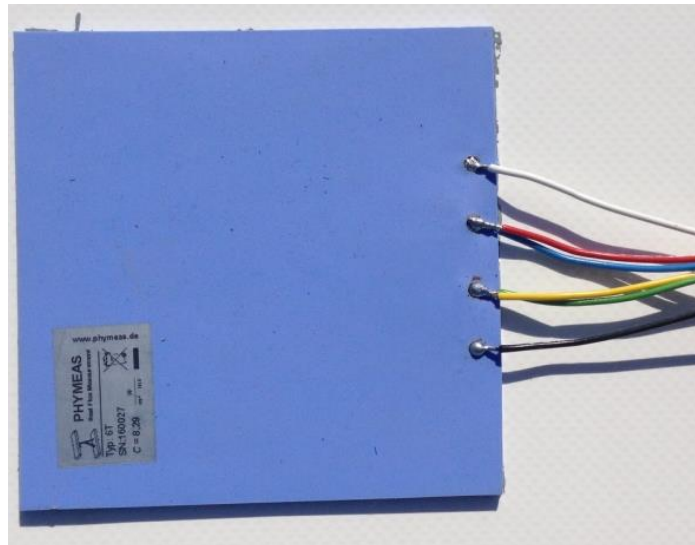


Abbildung 4.17: Abbildung einer Wärmeflussplatte [11]

#### 4.2.1.4 Pyranometer

Mit einem Pyranometer wird die solare Globalstrahlung gemessen. Das ist die Summe der elektromagnetischen Strahlung im Wellenlängenbereich von  $0,3 \mu\text{m}$  bis  $3 \mu\text{m}$ . Der Messbereich ist der obere Halbraum über dem Messgerätedom. Grundlage des Sensors ist eine Thermosäule von in Reihe geschalteten Thermoelementen.

Wichtig ist die präzise Ausrichtung des Messgeräts in der horizontalen Ebene. Dazu sind eine Libelle sowie Einstellschrauben am Pyranometer vorhanden. Bei der Wahl des Befestigungsortes wurde darauf geachtet, dass das Pyranometer nicht verschattet wird. Dazu muss ein Mindestabstand zum Nachbargebäude eingehalten werden. Zusätzlich sorgen der Sonnenschirm und die weiße Farbe des Geräts für eine Verringerung der Störungen des Messergebnisses durch Erhitzung (Abbildung 4.18).

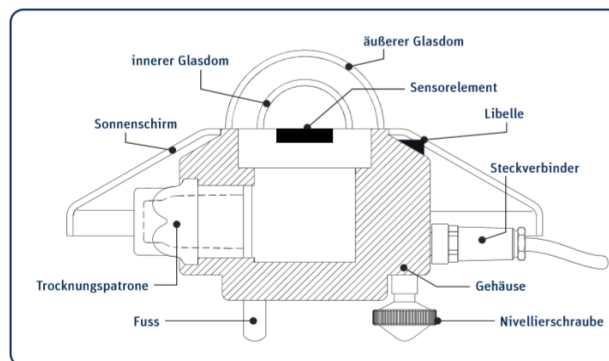


Abbildung 4.18: Schnittbild des Pyranometers [19]

Am Dachprüfstand befinden sich auf dem nach Süden gerichteten Ausleger des Gestells der Wetterstation zwei Pyranometer. Beide Modelle sind vom Typ CMP11 von Kipp & Zonen B.V. Eines ist horizontal ausgerichtet, das andere im  $45^\circ$ -Winkel geneigt. Für die Messungen an den Membranaufbauten wurde das Pyranometer in horizontaler Ausrichtung ausgewertet.



Diese Art von Pyranometer misst im Spektralbereich von 285 nm bis 2800 nm. Als Sensorsignal wird die Thermospannung im Bereich von 0 mV bis 30 mV ausgegeben. Diese wird, ähnlich wie bei Wärmeflussplatten, mit einem Kalibrierwert  $c$  [ $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ] verrechnet, um die eintreffende horizontale Strahlungsstärke pro Fläche in  $\text{W}/\text{m}^2$  zu erhalten [19].

#### 4.2.1.5 Pyrgeometer

Ein Pyrgeometer ist ein Messgerät zur Erfassung elektromagnetischer Strahlung im Bereich der Infrarotstrahlung.

Für eine komplette Energiebilanz muss neben der kurzwelligen Sonnenstrahlung auch die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung betrachtet werden. Diese entsteht, wenn die sichtbare und die UV-Strahlung der Sonne zum Teil in der Atmosphäre absorbiert werden. Die dadurch erfolgte Erwärmung der Atmosphäre führt zu einer Emission von langwelliger Strahlung auf die Membranprobe. Das elektromagnetische Spektrum umfasst Wellenlängen von  $4,5 \mu\text{m}$  bis  $45 \mu\text{m}$  im fernen Infrarotbereich [20].



Abbildung 4.19: Abbildung des Pyrgeometers [11]

Eingesetzt wurde ein Pyrgeometer vom Typ CGR3 von Kipp & Zonen B.V. Dieses befindet sich neben dem Pyranometer auf dem Gestell der Wetterstation. Gemessen wird im Messfeld von  $150^\circ$ .

Ein Pyrgeometer ist ähnlich wie ein Pyranometer aufgebaut. Es besteht aus einer Thermosäule, die hinter einer stark absorbierenden Schicht angebracht ist.

Ein Pyrgeometer ist ein passives Messgerät, das eine Spannung ausgibt, die proportional zur innerhalb des Sichtfeldes eintreffenden Strahlung ist. Mittels eines individuellen Empfindlichkeitswertes wird die Ausgangsspannung zur Nettostrahlung in  $\text{W}/\text{m}^2$  umgerechnet [20].

Für die Genauigkeit der Messung ist die präzise Positionierung des Messgeräts entscheidend. Der Sensor darf nicht verschattet werden. Das Datenblatt gibt einen Mindestabstand zu Nachbargebäuden vor, der am Dachprüfstand mit 20 m Entfernung eingehalten wird.

Die Spezifikationen des Messgeräts beschreiben die erreichbare Genauigkeit der Messungen. Es stellt sich eine Nichtlinearität des Messwerts von weniger als 1 % pro Jahr ein, bei Temperaturen zwischen -40 °C bis 80 °C liegt die Abweichung bei weniger als 5 % [20].

Bei einem Messwert von 1000 W/m<sup>2</sup> liegt der systematische Fehler bei weniger als 15 W/m<sup>2</sup> [20].

#### **4.2.1.6 Datenlogger**

Zur Erfassung der Oberflächentemperaturen der Proben im Dachversuchsstand mittels der Thermoelemente wurden zwei Advantech USB-4718 Datenlogger eingesetzt. An diese können je acht Sensoren angeschlossen werden. Mit der dazugehörigen Software wird eingestellt, welcher Art das Eingangssignal ist und wie es verarbeitet werden soll. Für Thermoelemente wird die eingehende Spannung umgerechnet und als Temperatur ausgegeben. Die Frequenz, mit der die Aufzeichnung der Messergebnisse stattfinden soll, kann im Bereich von  $f=0,01$  Hz bis 1000 Hz frei gewählt werden [21].

Die Pyranometermessdaten wurden ebenfalls mit einem Advantech USB-4718 Datenlogger erfasst. Die Daten wurden innerhalb einer LabView-Anwendung erfasst und gespeichert.

Für die Wärmeflussplatten und das Pyrgeometer kam ein Datenlogger vom Typ Ahlborn Almemo 2890-9 zum Einsatz.

Dieser Datenlogger besitzt Eingänge für neun Sensoren. Die Messfrequenz kann beliebig eingestellt werden. Der interne Speicher des Geräts kann mit Speicherkarten erweitert werden. Am Ende der Messung wird der Datenlogger mit einem Übertragungskabel am Computer angeschlossen, um die Messdaten auszulesen. Mittels der passenden Software können die Messergebnisse als Excel-Datei ausgegeben werden.

### **4.2.2 Vorbereitende Messungen**

Die Messungen im Inneren des Messkastens wurden im Rahmen der Untersuchungen am Aufbau aus dreilagigem Polyester-PVC-Gewebe mit einer Probenhöhe von 17 cm durchgeführt. Um zusätzlich Parameter des Messkasteninneren zu erfassen, wurde die Messtechnik erweitert. Eingesetzt wurde ein Thermoanemometer für die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit im Raum zwischen der Heizplatte und der ersten Membranlage. Zwei zusätzliche Wärmeflussplatten an den seitlichen Bereichen des Messkastens wurden zur Bestimmung des Wärmeverlusts durch die Seitenflächen eingesetzt.

#### **4.2.2.1 Kalibrierung der Thermoelemente**

Um zu verifizieren, ob alle Sensoren einwandfrei funktionierten, wurde eine Kalibrierung in Anlehnung an die Vorgaben der deutschen Akkreditierungsstelle [22] vorgenommen.

Hierzu wurden Messungen im Vergleichsverfahren in Wasser und einer Wasser-Salz-Lösung durchgeführt. Die Kalibrierung fand in Gruppen von je acht Thermoelementen statt. Diese wurden an einem Stab befestigt und in das Wasser bekannter Temperatur getaucht. Parallel wurden die Temperaturen sekundlich am Advantech-Logger erfasst.

Die Wassertemperatur zur Untersuchung betrug 50 °C und die Temperatur der Wasser-Salz-Lösung 10 °C.

Die Referenzmessung erfolgte mit zwei amtlich geeichten Hauptnormal-Thermometern. Deren Zehntelgrad-Skala erlaubt ein präzises Ablesen der Temperatur. Die Messungen wurden individuell für jeden Temperaturbereich durchgeführt. Dabei wurde der Zeitpunkt des Erreichens einer Zieltemperatur durch das Referenzthermometer vermerkt.

Bei der Auswertung des Messprotokolls wurde der Messwert zu diesem Zeitpunkt erfasst. Ein Vergleich aller Thermoelemente ergab eine maximale Abweichung von 1,05 K über den gesamten Temperaturbereich. Damit war die Vorgabe des Genauigkeitsgrads erfüllt.

#### **4.2.2.2 Bestimmung des Emissionsgrads der Heizplatte**

Zur Bestimmung des Strahlungsaustauschs zweier Flächen wird der Emissionsgrad benötigt. Im Gegensatz zu den Membranmaterialien ist dieser Wert für die Heizplatte nicht bekannt. Für Aluminiumoberflächen mit einer schwarz eloxierten Oberseite findet sich in der Literatur ein Emissionsgrad von  $\epsilon=0,95$  [23].

Um den Emissionsgrad messtechnisch zu verifizieren, wurde eine Wärmebildkamera eingesetzt. Die Temperaturmessungen dieser Kamera sind nur dann exakt, wenn der Emissionsgrad des betrachteten Materials bekannt ist. Alternativ erlaubt die Kenntnis einer bekannten Oberflächentemperatur den Rückschluss auf den Emissionsgrad.

Für dieses Vorgehen wurde die aktuelle Temperatur der betrachteten Oberfläche mit Thermoelementen am Ahlborn Logger erfasst. Anschließend wurde die angegebene Temperatur am Messpunkt der Kamera auf diesen Wert angepasst.

Als Messwert für die Heizplatte wurde nach dreimaliger Wiederholung der Messung der Emissionsgrad  $\epsilon=0,98$  ermittelt. Der Emissionsgrad der Seitenflächen aus MDF im Bereich zwischen der Heizplatte und der untersten Membranlage wurde auf dieselbe Weise ermittelt. Hier beträgt der Wert des Emissionsgrads ebenfalls  $\epsilon=0,98$ . In Abbildung 4.20 wird eine Aufnahme der Wärmebildkamera gezeigt. Der Mittelwert der beiden Thermoelemente links und rechts wird in der Mitte angegeben. Bei entsprechender Funktionsauswahl der Wärmebildkamera wird der Emissionsgrad intern ermittelt und unten rechts ausgegeben.



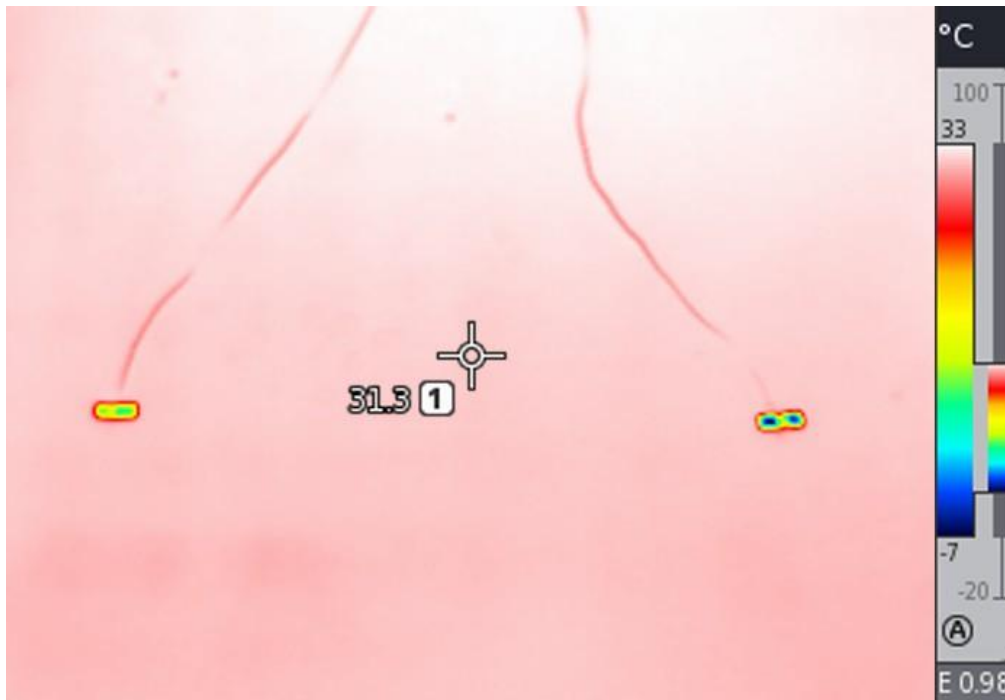


Abbildung 4.20: Messung der Wärmebildkamera an der Heizplatte [11]

#### 4.2.2.3 Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit im Messkasten

Für die Bestimmung der Wärmeübergangswiderstände durch Konvektion ist es unerlässlich, die Strömungsgeschwindigkeiten auf beiden Seiten der Probe zu kennen. Der Windmesser der Wetterstation erfasst die Strömungsgeschwindigkeit im Außenbereich. Zusätzlich wird die Strömungsgeschwindigkeit  $v_i$  im Raum zwischen der Heizplatte und der unteren Membranlage im Inneren des Messkastens benötigt. Durch freie Konvektion kommt es im Bereich zwischen der Heizplatte und der unteren Membranlage zur Luftbewegung.

Im Rahmen einer gesonderten Messreihe wurde diese exemplarisch bestimmt. Dabei wurden die Messungen bei jeweils 100 % und 25 % der maximalen Heizleistung der Heizplatte ausgewertet. Um zudem die Auswirkungen der Bewölkung und der Tageszeit mit einzubeziehen, wurden die Zeiträume so gewählt, dass tagsüber und nachts sowohl bei hohem Bewölkungsgrad als auch bei klarem Himmel gemessen wurde.

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgte mit einem Thermoanemometer. Dieses zeichnet sich durch einen Messbereich aus, der selbst kleinste Strömungsgeschwindigkeiten von 0,015 m/s erfasst. Zusätzlich besitzt das Messgerät eine hohe Messgenauigkeit von  $\pm 1$  % vom Endwert. Das Strömungsmessgerät wurde in der Mitte der Heizplatte platziert. Die Daten wurden im Minutentakt vom Ahlborn Datenlogger erfasst.

Nachfolgend finden sich die in die Berechnung einfließenden Durchschnittswerte der Strömungsgeschwindigkeit im Inneren des Messkastens. Zusätzlich ist der Verlauf über den Auswertungszeitraum dargestellt. Diese Ergebnisse wurden für alle untersuchten Aufbauten verwendet. Trotz verschiedener Umgebungsbedingungen zeigte sich, dass die Mittelwerte der konvektiven Luftgeschwindigkeiten  $\bar{v}_i$  ähnliche Werte erreichten und zwischen  $\bar{v}_i = 0,031$  m/s

und  $\bar{v}_i = 0,044$  m/s lagen. Die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten an den Innenoberflächen erfolgte mit der maximalen gemessenen Strömungsgeschwindigkeit von  $\bar{v}_i = 0,044$  m/s unter Anwendung der Gleichung 21.

klare Nacht, 100 % HP:  $\bar{v}_i = 0,044$  m/s

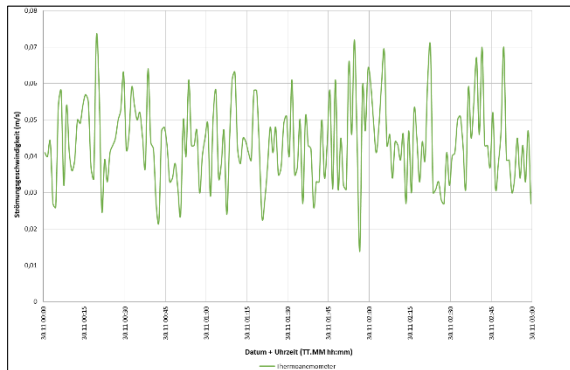


Abbildung 4.21: Strömungsgeschwindigkeit, klare Nacht, 100 % Heizleistung

bewölkter Tag, 100 % HP:  $\bar{v}_i = 0,041$  m/s

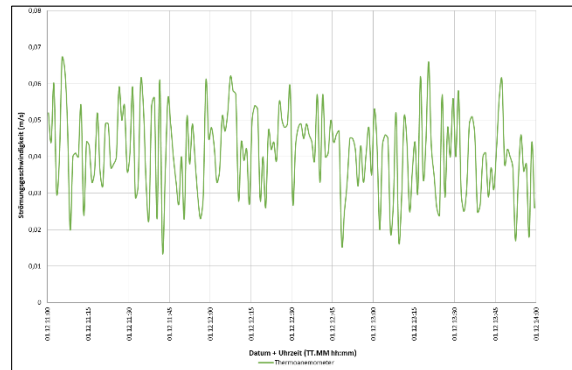


Abbildung 4.22: Strömungsgeschwindigkeit, bewölkter Tag, 100 % Heizleistung

bewölkte Nacht, 100 % HP:  $\bar{v}_i = 0,044$  m/s

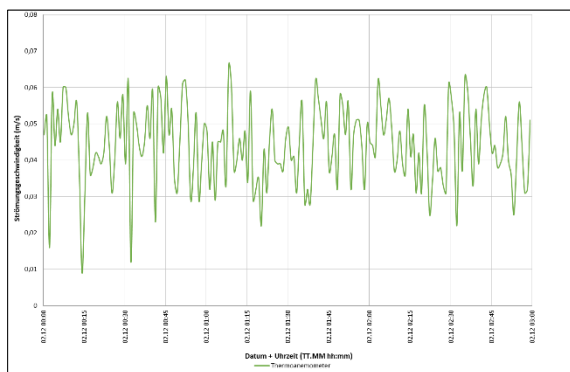


Abbildung 4.23: Strömungsgeschwindigkeit, bewölkte Nacht, 100 % Heizleistung

klarer Tag, 100 % HP:  $\bar{v}_i = 0,031$  m/s

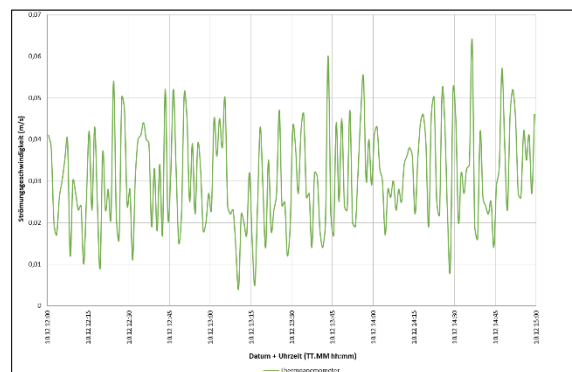


Abbildung 4.24: Strömungsgeschwindigkeit, klarer Tag, 100 % Heizleistung

klare Nacht, 25 % HP:  $\overline{v_i} = 0,041 \text{ m/s}$

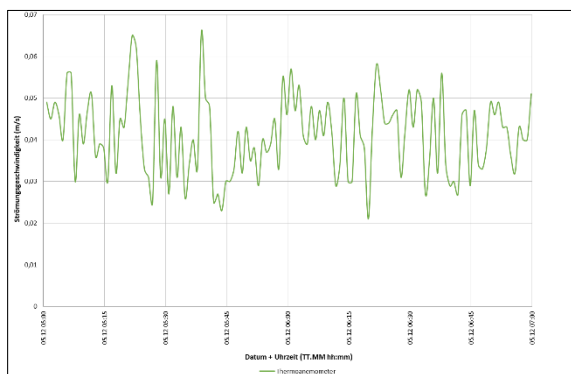


Abbildung 4.25: Strömungsgeschwindigkeit, klare Nacht, 25 % Heizleistung

bewölkter Tag, 25 % HP:  $\overline{v_i} = 0,035 \text{ m/s}$

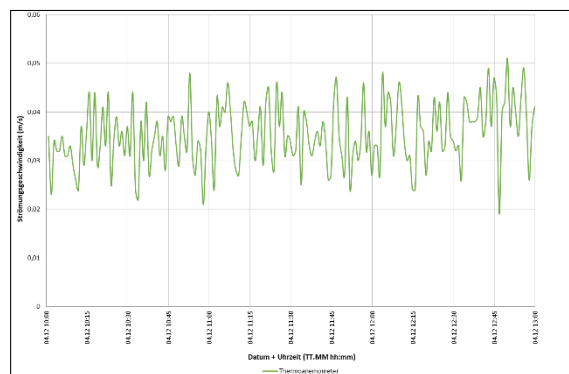


Abbildung 4.26: Strömungsgeschwindigkeit, bewölkter Tag, 25 % Heizleistung

bewölkte Nacht, 25 % HP:  $\overline{v_i} = 0,039 \text{ m/s}$

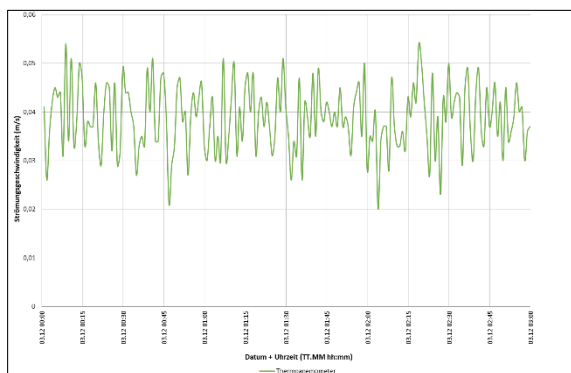


Abbildung 4.27: Strömungsgeschwindigkeit, bewölkte Nacht, 25 % Heizleistung

klarer Tag, 25 % HP:  $\overline{v_i} = 0,039 \text{ m/s}$

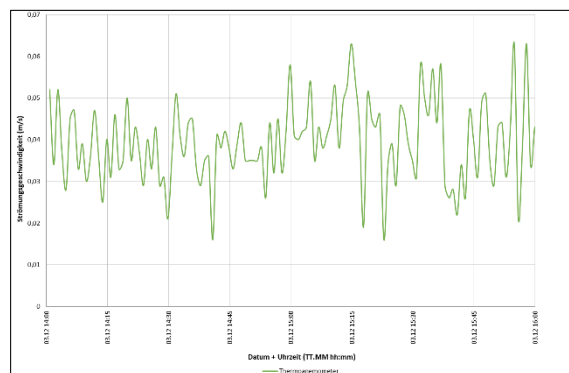


Abbildung 4.28: Strömungsgeschwindigkeit, klarer Tag, 25 % Heizleistung

### 4.2.3 Einrichten des Dachprüfstands

Die zu vermessenden Proben wurden in den Räumen des Instituts vorbereitet. Dort erfolgte der Zuschnitt der Membranmaterialien und die Aufbringung auf den Probenrahmen. Anschließend wurden die Positionen zur Fixierung der Thermolemente und der Wärmeflussplatten auf der Probe markiert. Die Anbringung der Wärmeflussplatten erfolgte mittig auf der entsprechenden Membranlage. Die Thermolemente wurden in einem regelmäßigen Raster in den Kreuzungspunkten der vertikalen und horizontalen Linien (rot) nach Abbildung 4.29 positioniert. Am Kontaktpunkt der Thermolemente mit der Oberfläche wurde Wärmeleitpaste angebracht.

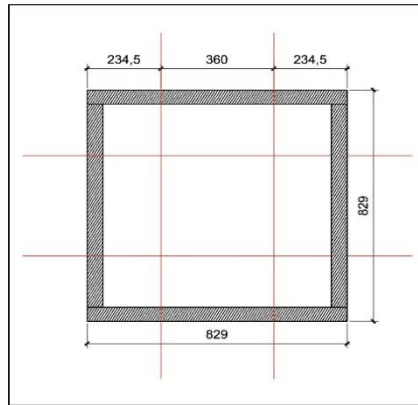


Abbildung 4.29: Platzierung der Thermoelemente

Nach dem Transport zum Prüfstand erfolgte der Einbau der vorbereiteten Einzellagen in den Messkasten. Zuvor wurden alle Sensoren kontrolliert, um Defekte oder Transportschäden zu erkennen, bevor die Messungen begannen. Luftdichtigkeit zwischen den einzelnen Lagen konnte durch das Anbringen eines Aluminiumklebebandes im Randbereich sichergestellt werden. Dieses besitzt eine hohe Dampfdichtigkeit und verhindert so Luftströmungen zwischen den einzelnen Lufträumen zwischen den Membranlagen. Mit den Messungen wurde begonnen, sofern die Wettervorhersage eine geringe Niederschlagswahrscheinlichkeit vorhersagte. Jeder Aufbau wurde mindestens während einer klaren und einer bedeckten Nacht untersucht. Die gleichen Randbedingungen wurden auch bei den Messungen am Tag angestrebt.

#### 4.3 Aktivhaus B10

Neben den genannten Prüfvorrichtungen hatte das ILEK Zugang zum Aktivhaus B10, einem Forschungsgebäude, das über eine bereits integrierte Monitoringinfrastruktur verfügt und mit einer nach Westen orientierten Glasfassade ausgestattet ist, die mit unterschiedlichen Verglasungen bestückt werden kann (siehe Abbildung 4.30).

Die Fassadenrahmen der verglasten Front des Gebäudes werden durch Profile der Schweizer Firma Sky-Frame gebildet, die durch eine außergewöhnliche Schlankheit gekennzeichnet sind. Diese Schlankheit ermöglicht einen maximalen Verglasungsbereich. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen befand sich eine Vakuumisoliationsverglasung in dieser Fassade.

Im Rahmen von mehrtägigen Messungen wurden Daten generiert, die Aussagen zum dynamischen U-Wert und zum Transmissionswert der Verglasung erlauben. Gleichzeitig wurden Wärmedurchgangsmessungen an den Fassadenprofilen durchgeführt.



Abbildung 4.30: Aktivhaus B10 von Werner Sobek, Foto: Zooney Braun, Stuttgart

### 4.3.1 Messtechnische Infrastruktur im Forschungsgebäude

Das Aktivhaus B10 ist mit mehreren Datenloggingsystemen ausgestattet, die bereits aufeinander abgestimmt wurden und somit eine messtechnische Erfassung der Eigenschaften der Verglasung erleichterten.

Hierzu gehörten eine Wetterstation, ein Datenloggingsystem für die Globalstrahlung, ein Loggingsystem zur Erfassung von Komfortparametern im Innenraum sowie ein Loggingsystem zur direkten Messung von Wärmeströmen und Temperaturen im Glasfassadenbereich.

Sämtliche Loggingsysteme erfassten die Daten in einer einheitlichen Taktung von 60 Sekunden. Dies ermöglichte eine präzise Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Die gewonnenen Daten mussten im Rahmen der Auswertungen auf ein einheitliches Datenformat gebracht werden. Hierfür wurde am ILEK eine entsprechende Software entwickelt, die dies sowohl für bestehende als auch für zukünftige Messkonstellationen erlaubt.

#### 4.3.1.1 Multi-Messwertgeber Vaisala (Wetterstation)

Die notwendigen Messdaten des Außenklimas wurden durch die auf dem Gebäudedach fest verbaute Wetterstation vom Typ Vaisala WXT 520 bereitgestellt. Diese erfasste eine Vielzahl an Messgrößen (u.a. Lufttemperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Niederschlag). Für die U-Wert-Berechnung waren insbesondere die Außenlufttemperaturen und die Strömungsgeschwindigkeiten (Windgeschwindigkeiten) von Bedeutung.

#### 4.3.1.2 Datenlogger Agilent (Multiple Messgrößen)

Der Datenlogger 34980A der Firma Agilent Technologies (heute Keysight Technologies) erfasste Temperaturen, Luftfeuchten und Wärmeströme der nicht verglasten Gebäudehülle. Darüber hinaus waren zwei Pyranometer zur messtechnischen Erfassung der Globalstrahlung an dieses Gerät angeschlossen. Das eine Pyranometer war horizontal ausgerichtet, so dass repräsentative Messdaten für die Dachebene generiert wurden. Das zweite war vertikal im Bereich der nach Westen orientierten Glasfassade angeordnet, so dass die für die Bestimmung des Transmissionswerts der Vakuumverglasung erforderlichen Messdaten durch diesen Sensor bereitgestellt werden konnten.

#### 4.3.1.3 Datenlogger Ahlborn 1 (Komfortparameter)

Zur Erfassung u.a. von Behaglichkeitsparametern wurde im Innenbereich eine flexibel einsetzbare Messstation (Almemo 2890-9) installiert, die folgende Messgrößen erfasste: Lufttemperatur, Luftdruck, operative Temperatur, relative Luftfeuchte, CO<sub>2</sub>-Konzentration, Helligkeit, Globalstrahlung und Luftgeschwindigkeit.

Für die dynamische U-Wert-Ermittlung wurden von dieser Loggingeinheit die Messdaten der Raumlufttemperaturen und die der Luftgeschwindigkeiten benötigt. Zur Ermittlung des Transmissionswerts bedurfte es der Messdaten der Globalstrahlung im Innenbereich. Hierfür wurde ein Globalstrahlungssensor innen analog zum äußeren Sensor vertikal in Richtung der Glasfassade ausgerichtet.

#### 4.3.1.4 Datenlogger Ahlborn 2 (Wärmeströme und Temperaturen Glasfassade)

An einem zweiten mobilen Loggingsystem wurden die Wärmeflussplatten und die Thermoelemente angeschlossen, die direkt im Bereich der Fassadeneinheit von Sky-Frame und Vakuumisolationsverglasung zum Einsatz kamen. Hierfür wurde ein Präzisionsmessgerät mit Datenloggerfunktion des Typs 5690-1 CPU des Herstellers Ahlborn verwendet.

Es wurden biegbare Wärmestrommessplatten mit integrierten Temperatursensoren (PT) des Herstellers Phymas vom Typ 2T und 6T verwendet. Da im weiteren Projektverlauf auch Wärmeströme an gekrümmten Oberflächen (Luftkissen) gemessen werden sollten, konnte so mit einer einheitlichen Messtechnikausstattung gearbeitet werden.

Die Wärmeflussplatten waren im Innenbereich angebracht und dienten der Messung der Wärmeströme sowie der Oberflächentemperaturen: die Wärmeflussplatten des Typs 2T befanden sich auf jeweils einem vertikalen Fassadenprofil des Sky-Frames, die des Typs 6T auf den Glasflächen.

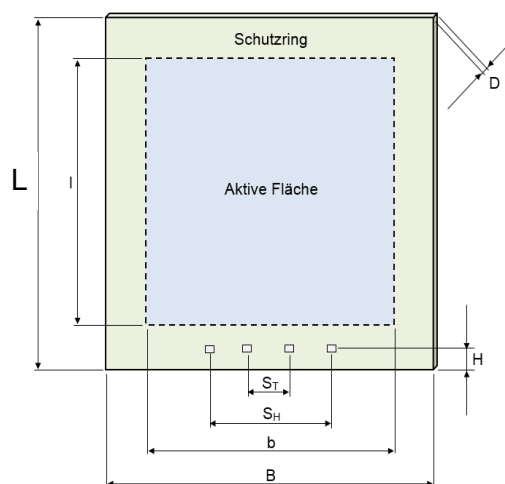


Abbildung 4.31: Illustration der Bezugslinien der PHYMEAS-Wärmeflussplatten [14]



Tabelle 4-2: Kenndaten der PHYMEAS-Wärmeflussplatten

Typ	L [mm]	B [mm]	l [mm]	b [mm]	ST [mm]	SH [mm]	H [mm]	D [mm]	Kalibrierwert c [W/m <sup>2</sup> *mV]
2T	100	30	80	20	7	21	8	3	30...50
6T	120	120	90	90	16	48	8	3	8...12

#### 4.3.2 Testfassade aus Sky-Frame-Profilen und Vakuumisolierverglasung

Die Firma Sky-Frame bezeichnet ihre Aluminium-Fassadenkonstruktion als „rahmenlose Schiebefenster“, bei denen die horizontalen Rahmenprofile so eingebaut sind, dass sie sowohl im Decken- als auch im Bodenbereich bündig mit der Oberfläche abschließen. In Erscheinung treten somit nur die vertikal verlaufenden Profile, die sich nach ihrer Funktion bei der Einfassung von festen und beweglichen Verglasungseinheiten unterscheiden lassen.

Im Forschungsgebäude B10 wurden geschosshohe Vakuumisolationsscheiben eingebaut, die von der chinesischen Firma Beijing Synergy Vacuum Glazing hergestellt wurden. Diese Verglasung ist dadurch gekennzeichnet, dass insgesamt drei Glasscheiben miteinander verbunden wurden. Zwischen der dem Innenraum zugewandten und der mittleren Scheibe befindet sich eine Luftschicht. Zwischen der dem Außenraum zugewandten Scheibe und der mittleren befinden sich sogenannte Spacer (Abstandshalter), die einen evakuierten Zwischenraum von ca. 0,5 mm Dicke ausbilden. Durch den Einsatz einer patentierten Technik für den Randverbund des Scheibenaufbaus soll das Vakuum dauerhaft erhalten bleiben. Die Vakuumisolierverglasungen der Schiebefenster sind umlaufend in glasfaserverstärkten Profilen (Glasfaserverbundtyp ACS) eingebettet, die eine konstruktive Anbindung der Scheiben an die Aluminium-Fassadenprofile erlauben.

Die Rahmenaußenmaße der Glasfassade betragen 14,14 m in der Breite und 2,84 m in der Höhe, woraus sich eine Gesamtfläche von ungefähr 40 m<sup>2</sup> ergibt. Das gesamte Fassadenelement besteht aus 8 einzelnen Vakuumisolierverglasungen mit einer durchschnittlichen Glasfeldbreite von 1,724 m. Der Glasanteil, bezogen auf den sichtbaren Rahmen, beträgt 97,7 %. Fünf der acht Scheiben sind horizontal verfahrbar, so dass die Fassadenfront sehr weit geöffnet werden kann.

Laut Glashersteller beträgt der U-Wert für die Vakuumisolierverglasung 0,44 W/m<sup>2</sup>K. Auf der Berechnungsgrundlage von DIN EN ISO 10077 Teil 1 und 2 ergibt sich für die Fassade unter Einbeziehung der Verglasung und der Rahmenkonstruktion ein U-Wert von 0,83 W/m<sup>2</sup>K (Berechnung der Firma Sky-Frame vom 12.09.2013). Der Gesamtenergiedurchlassgrad der Fassade wird mit g=0,382 angegeben.

#### 4.3.3 Installation, Anschluss und Inbetriebnahme der Sensoren

Um den laufenden Betrieb im Gebäude so wenig wie möglich durch die Messungen zu beeinträchtigen, wurden an zwei exemplarischen Scheiben sowie an zwei anschließenden Fassadenprofilen der insgesamt acht Vakuumverglasungen Sensoren befestigt. Hierfür wurden die beiden mittleren Fenstermodule ausgewählt.

Je Position konnten somit der Wärmefluss und die Oberflächentemperatur innen durch Wärmestromplatten und die Fassadenoberflächentemperatur außen durch Temperatursensoren erfasst werden. Im Bereich des Isolierglases wurden Sensorpositionen im oberen, mittleren und unteren Abschnitt der Fassade festgelegt, um einen möglichst großen Bereich abzudecken und so die durch Höhendifferenz entstehenden Eigenschaftsunterschiede zu erfassen. Es ergaben sich damit sechs Sensorpositionen für die Messwerte der Vakuumisolierverglasung. Zwei weitere Messpositionen befanden sich auf der Aluminiumfassade, welche den Bereich der Glasfassade umschließt. Aufgrund einer Sensorbeschädigung an Position 2.3 konnten für diesen Bereich allerdings keine Messwerte für den Wärmefluss und die Oberflächentemperatur innen erfasst werden.

Durch die Temperatursensoren wurden nur die äußeren Oberflächentemperaturen (Außenscheibe-Außenoberfläche, Innenscheibe-Innenoberfläche) erfasst. Der Sensorplan der Gebäudefrontansicht zeigt die jeweiligen Positionen (Abbildung 4.32 und Abbildung 4.33).

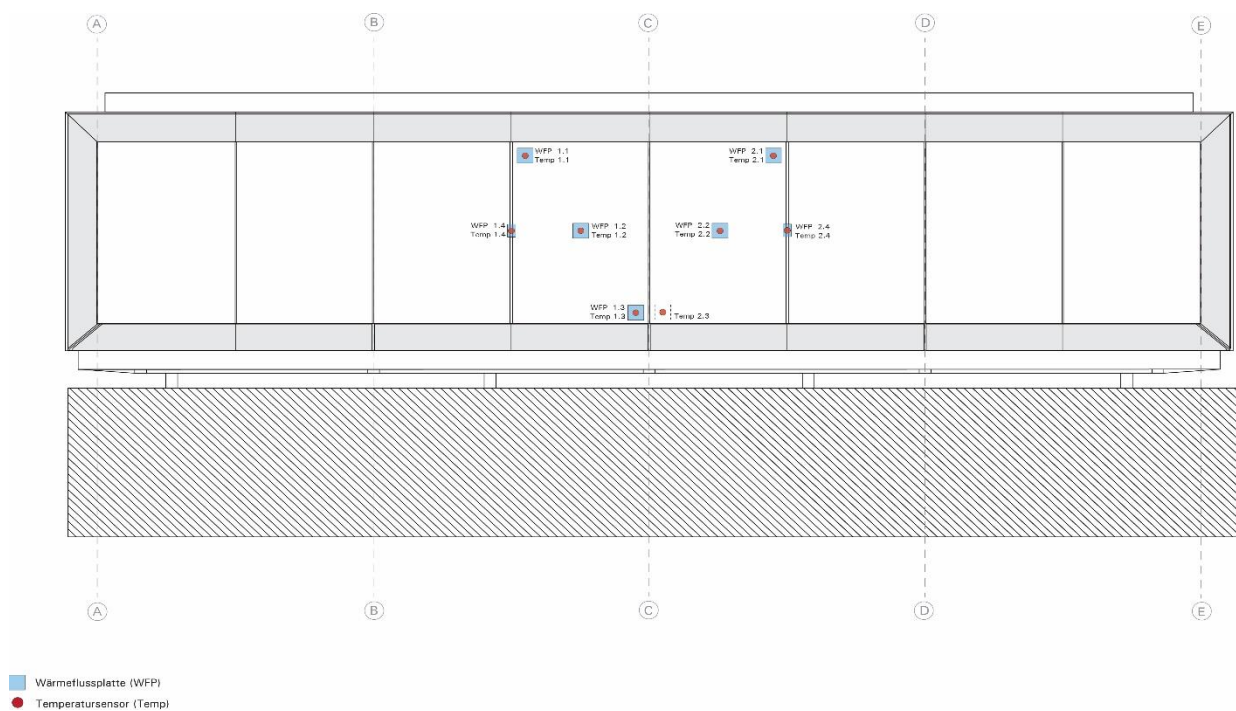


Abbildung 4.32: Schematische Darstellung der Sensorpositionen im Bereich der B10-Vakuumglasfassade



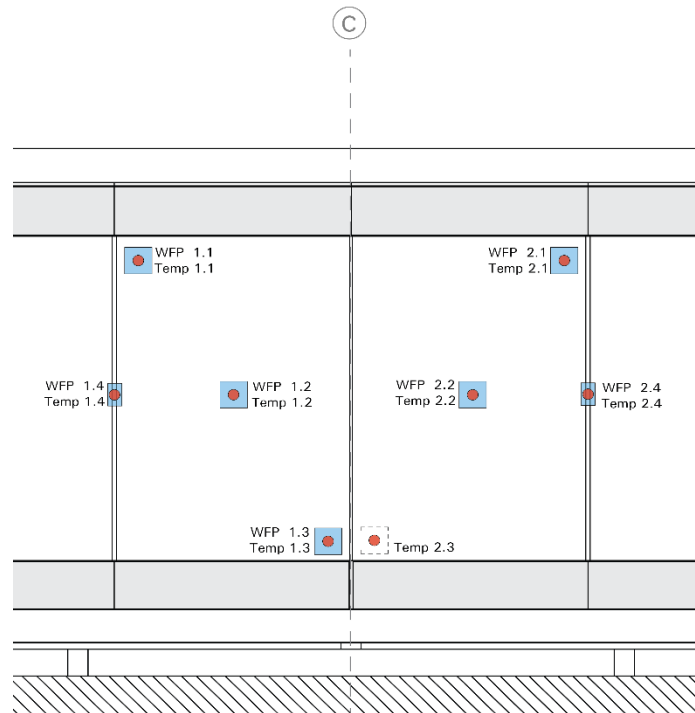


Abbildung 4.33: Detaildarstellung der Sensorpositionen im Bereich der B10 Vakuumglasfassade

Die Wärmeflussplatten wurden zunächst über vier Lötstellen an sechsadrige Kabel angelötet. Dabei wurden zur Temperaturerfassung je zweimal zwei Kabel zusammen auf die äußeren Lötstellen geführt (4-Leiter-Technik). Die Lötstellen für die Messung der Spannung befinden sich entsprechend auf den beiden inneren Positionen. Die Kabel wurden bereits vorher auf die individuellen Längen konfektioniert und am anderen Ende mit Almemo-Steckern des Typs ZA9000-FS0 (zur Erfassung der Wärmeströme) und des Typs ZA9030-FS2 (zur Erfassung der Temperaturen) verbunden. Abschließend wurden die Almemo-Stecker auf die sensorspezifischen Kalibrierwerte der Wärmeflussplatten programmiert.

Zur Erfassung der Temperaturen im Außenbereich kamen handelsübliche Thermoelemente vom Typ K zum Einsatz. Diese wurden an den Außenoberflächen der Verglasungen und der Aluminiumprofile befestigt und über entsprechend konfektionierte Ausgleichsleitungen mit einem Stecker vom Typ ZA 5690-MU an den Datenlogger angeschlossen. Die Kabel wurden mit Hilfe von geeigneten Klebebändern und Kabelbindern verlegt.



Abbildung 4.34: Sensorpositionen im Systemachsenbereich C der Vakuumglasfassade



Abbildung 4.35: Detailansicht einer Wärmeflussplatte mit äußerem Strahlungsschirm

Um zu verhindern, dass direkte Sonneneinstrahlung die Sensoren erhitzt und somit die Messergebnisse verfälscht, wurden im Außenbereich der Glasscheiben mit Spiegelfolie beklebte Kunststoffplatten befestigt (maximale Reflexion der Sonneneinstrahlung). Diese wurden mit Abstandshaltern an der Fassade fixiert, so dass eine Hinterlüftung möglich war und nur die relevanten Oberflächentemperaturen erfasst wurden. Die Dimensionierung dieser Reflektoren ermöglichte zugleich eine Verschattung der Wärmeflussplatten.

Im Fassadenprofilbereich wurde mit Hilfe von Aluminiumklebeband eine Vorrichtung befestigt, die die Thermoelemente vor direkter Sonneneinstrahlung schützt.

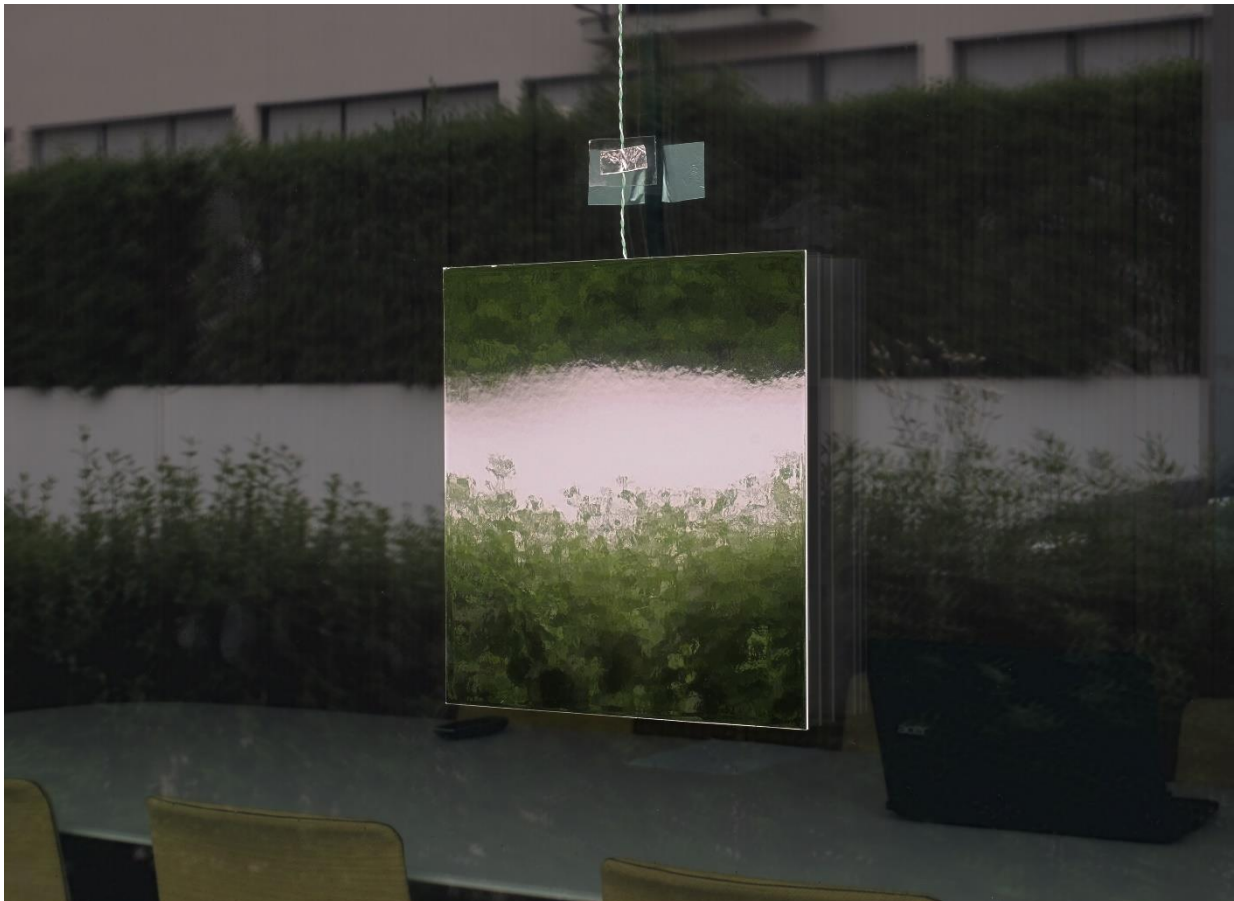


Abbildung 4.36: Hinterlüftetes Reflektorschild (Strahlungsschirm) im Außenbereich der Fassade zum Schutz der Sensoren vor direkter Sonneneinstrahlung

#### 4.4 Fassadenprüfstand

Zur Untersuchung von Verglasungssystemen verfügt das ILEK über ein Fassadentestgebäude. Auf einfache Weise lassen sich dort die unterschiedlichsten Verglasungssysteme einbauen und untersuchen.



#### 4.4.1 Allgemeine Informationen und Konstruktion

Der Fassadenprüfstand des ILEK ist als zweigeschossiges Gebäude mit insgesamt vier Messräumen ausgeführt. Er wurde im März 2015 in Betrieb genommen und dient der Untersuchung unterschiedlicher Gebäudehüllen sowie Fassadenkonstruktionen mit transparenten, transluzenten oder auch opaken Bauteilen aus den verschiedensten Materialien.

Dieses Testgebäude wurde in einer modularen Bauweise errichtet (siehe Abbildung 4.37) und ermöglicht daher eine flexible Nutzung. Neben der freien Beispielbarkeit der Fassadenöffnungen mit unterschiedlichen Testobjekten sind auch Ausrichtungen der vertikalen Proben in unterschiedliche Himmelsrichtungen denkbar. Die zurzeit realisierte Raumkonstellation ermöglicht eine messtechnische Erfassung von Proben, die im Bereich der Südfassade eingebaut werden (siehe Abbildung 4.38).



Abbildung 4.37: Unterschiedliche Montagezustände des modularen Fassadenprüfstands während der Errichtung

Die vier Messräume weisen jeweils lichte Abmessungen von ca. 2,00 m x 4,20 m x 2,70 m auf (siehe Abbildung 4.39) und sind über einen zentral angeordneten Bereich, die sogenannte Multifunktionszone, zugänglich. Diese dient neben der Erschließung des Gebäudes auch der Unterbringung der erforderlichen Infrastruktur wie beispielsweise der Gebäudetechnik und der Messtechnik (siehe Abbildung 4.40).

Der Fassadenprüfstand ist mit unterschiedlichen adaptiven Verglasungen ausgestattet. Im Projektverlauf wurden Untersuchungen an einer Auswahl dort eingebauter Verglasungen durchgeführt.



Abbildung 4.38: Fassadenprüfstand auf dem Freiversuchsgelände des ILEK: Außenperspektive Süd-West-Fassade (linkes Bild), Innenperspektive mit Blick nach Süden (rechtes Bild)

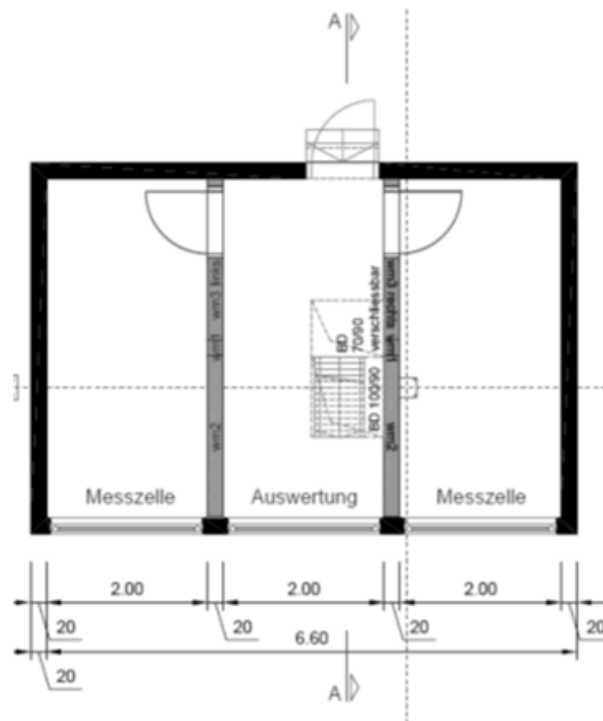


Abbildung 4.39: Grundriss des Fassadenprüfstands im EG (identisch im OG)

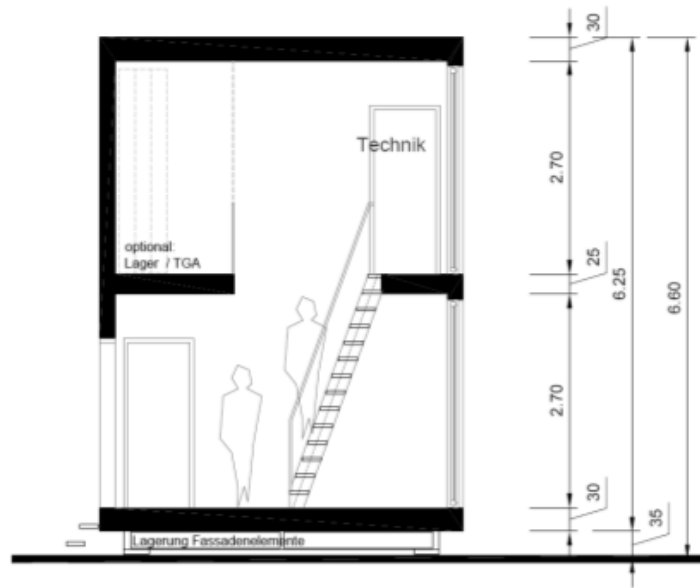


Abbildung 4.40: Schnitt A-A durch den zweigeschossigen Fassadenprüfstand

#### 4.5 Spektralphotometer

Für die Ermittlung der strahlungstechnischen Kenndaten im solaren Strahlungsspektrum wurde ein am ILEK zur Verfügung stehendes Spektralphotometer (Varian Modell Cary 5000, Spektrum: 250 nm – 2500 nm, Abbildung 4.41) eingesetzt. Mit diesem Gerät lassen sich die Kennwerte der Transmission und Reflexion für nichtstreuende und streuende Proben in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmen. Die Messwerte wurden wie folgt integriert, um gewichtete radiometrische Mittelwerte zu bestimmen:

$$\tau_{SOL} = \frac{\int_{250nm}^{2500nm} S_{\lambda} \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{250nm}^{2500nm} S_{\lambda} \cdot d\lambda} \quad (37)$$

Mit

$\tau_{SOL}$  gewichteter Mittelwert der Transmission

$S_{\lambda}$  relative spektrale Globalstrahlungsflussverteilung nach DIN EN 410

$\tau(\lambda)$  mit dem Spektralphotometer gemessene Transmission bei der Wellenlänge  $\lambda$

Analog erfolgte die Bestimmung der gewichteten Mittelwerte für die Reflexion.



Abbildung 4.41: Spektralphotometer Varian Modell Cary 5000 und Ulbricht-Kugel

Für die Bestimmung der strahlungstechnischen Eigenschaften im infraroten Spektralbereich (2,5  $\mu\text{m}$  bis 35  $\mu\text{m}$ ) wurde ein am ILEK zur Verfügung stehendes FTIR Spektrometer (Bruker, Tensor 27, Spektrum: 2500 – 35000 nm) eingesetzt. Referenzweißstandard bei den Messungen war eine Gold-Probe. Mit diesem Gerät lassen sich die strahlungstechnischen Kennwerte in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmen. Diese wurden wie folgt integriert (am Beispiel der Transmission im Infrarotspektrum):

$$\tau_{IR} = \frac{\int_{2500nm}^{3500nm} \tau(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{2500nm}^{3500nm} d\lambda} \quad (38)$$

Mit

$\tau_{IR}$  Mittelwert der Transmission

$\tau(\lambda)$  mit dem IR-Spektrometer gemessene Transmission bei der Wellenlänge  $\lambda$

Analog erfolgte die Bestimmung der Mittelwerte für die Reflexion. Diese Mittelwertbildung ist angelehnt an die DIN EN 12898. Eine Gewichtung mit der relativen spektralen Ausstrahlung des schwarzen Körpers erscheint dem Erstautor zur Bestimmung der Emissivitätswerte besser geeignet zu sein, wird aber nicht angewandt, um die Konformität mit der genannten Norm zu wahren. Auf der Grundlage des Kirchhoffschen Gesetzes wird die Emissivität gleichgesetzt mit der Absorption.

Die Materialkennwerte, die nach den Gleichungen 37 und 38 bestimmt wurden, fanden Verwendung bei den Computersimulationen zur Modellierung der Wärme- und Lichtdurchgangsprozesse (Layer-Tool, Kapitel 3.7).

## 5 Messungen im geregelten Heizkasten (Hotbox)

In der Hotbox (geregelter Heizkasten) wurden folgende Mehrlagensysteme getestet: zweilagige textile Aufbauten ohne Funktionsmaterialien (siehe Kapitel 5.1), dreilagige textile Aufbauten ohne Funktionsmaterialien (siehe Kapitel 5.2), zweilagige textile Aufbauten mit Funktionsmaterialien (siehe Kapitel 0) und ein dreilagiges pneumatisches Kissen aus ETFE (siehe Kapitel 5.4).

### 5.1 Zweilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien

Mit dem Verfahren der Heizkastenmessung wurden zwei nachfolgend dargestellte unterschiedliche zweilagige Proben untersucht. In Abbildung 5.1 zeigt die Messanordnung, die Übersicht zu den untersuchten Proben findet sich in Tabelle 5-1.

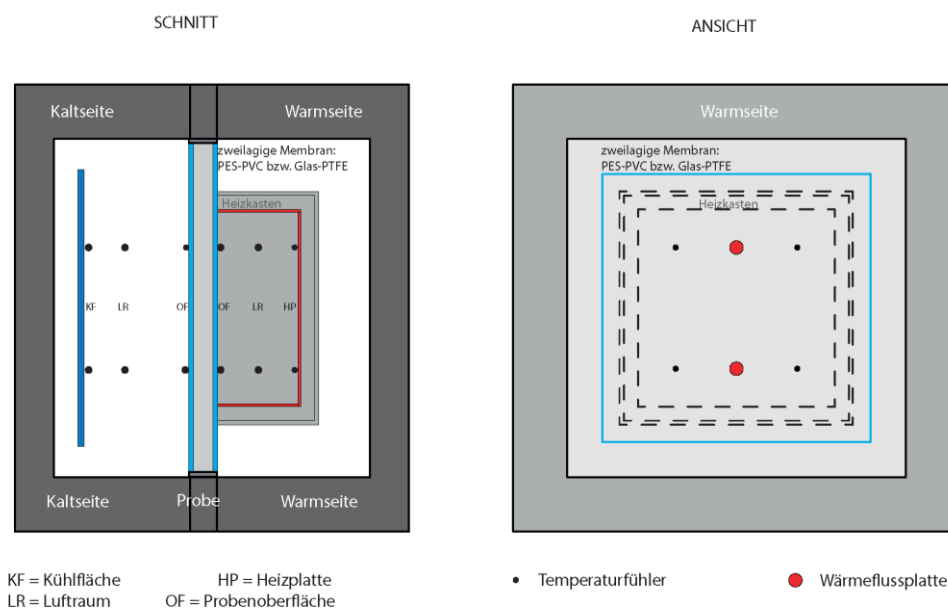


Abbildung 5.1: Versuchsaufbau und Sensoranordnung der zweilagigen textilen Lageaufbauten ohne Funktionsmaterialien im Heizkasten

Tabelle 5-1: Übersicht der in der Hotbox untersuchten zweilagigen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien

Lagenaufbau	Lage 1 (Warmseite)	Zwischenraum	Lage 2 (Kaltseite)
1. PES-PVC I	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915	Luftschicht 85 mm	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915
2. PES-PVC II	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B4915	Luftschicht 85 mm	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B4915

Die ermittelten Wärmedurchgangswerte sind in der nachfolgenden Tabelle 5-2 dargestellt. Sie wurden nach Gleichung 25 und 26 ermittelt.



Tabelle 5-2: Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten zweilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien [9]

Lagenaufbau	Temperatur [°C]		Temperatur [°C]	Wärmestromdichte [W/m <sup>2</sup> ]	Kennwerte [W/m <sup>2</sup> K]	
	Warmseite Probenoberfläche (OF)	Kaltseite Probenoberfläche (OF)	Temperaturdifferenz Warmseite-OF-Kaltseite OF	Mittelwert aus beiden Wärmeflussplatten	1/R-Wert	U-Wert
1. Verseidag Duraskin B1915 PVC/PES	32,12	16,92	15,2	113,73	7,482	3,681
	35,76	20,17	15,49	116,58	7,526	3,426
	40,72	20,81	19,91	166,02	8,339	4,058
2. Verseidag Duraskin B4915 PVC/PES	17,15	3,57	13,58	89,37	6,581	3,048
	21,41	5,42	15,99	111,34	6,963	3,219
	25,47	6,87	18,6	133,93	7,201	3,39
	31,14	16,51	14,63	106,36	7,27	3,496
	33,7	10,74	22,96	182,29	7,938	3,71
	39,24	14,43	24,81	152,96	6,165	3,8
	46,57	12,12	34,45	152,3	4,421	4,432

Es lässt sich festhalten, dass die gemessenen U-Werte der fünf unterschiedlichen Materialaufbauten bei einem Temperaturgefälle von ungefähr 15 K bis 34 K in einem Bereich von 3,048 W/m<sup>2</sup>K bis 4,432 W/m<sup>2</sup>K liegen. Es wurden dabei unterschiedliche Temperaturniveaus sowie unterschiedliche Temperaturdifferenzen zwischen den Oberflächentemperaturen betrachtet. Bei höherer Temperatur der Warmseite ist bei gleicher oder sehr ähnlicher Temperaturdifferenz zwischen der Warm- und der Kaltseite der U-Wert wie auch der 1/R-Wert (nach Gleichung 26) höher. Die Ursache hierfür ist die Abhängigkeit des Wärmestroms von der vierten Potenz der Oberflächentemperaturen nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz für den Strahlungsaustausch.

## 5.2 Dreilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien

Bei der messtechnischen Erfassung dreilagiger Aufbauten in der Hotbox (siehe Abbildung 5.2) kamen insgesamt fünf Systeme zum Einsatz. Zwei Aufbauten bestanden aus einem Polyester beschichteten PVC-Gewebe (Typ III), zwei Aufbauten aus einem PTFE-beschichteten Glasfasergewebe und ein Aufbau aus einem dreilagigen unbeschichteten Glasfasergewebe (siehe Tabelle 5-3). Die Anordnung war bei allen fünf Aufbauten identisch, die jeweilige Breite des Luftzwischenraums betrug 85 mm, so dass die Dicke des gesamten Lagenaufbaus bei ca. 170 mm lag. Die Temperatureinstellungen der Hotbox wurden bei einigen Messungen so vorgenommen, dass sich jeweils nahezu gleiche Temperaturgefälle von ungefähr 20 K zwischen der Probenoberfläche auf der Warm- und der Kaltseite einstellten. Bei diesen Versuchen unterschieden sich jedoch die Temperaturniveaus der jeweiligen Oberflächentemperaturen. Die Ergebnisse hierzu sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst. Darüber hinaus wurden zusätzliche

Messungen mit hiervon abweichenden Temperaturdifferenzen durchgeführt, die ebenfalls in der Tabelle zu finden sind.

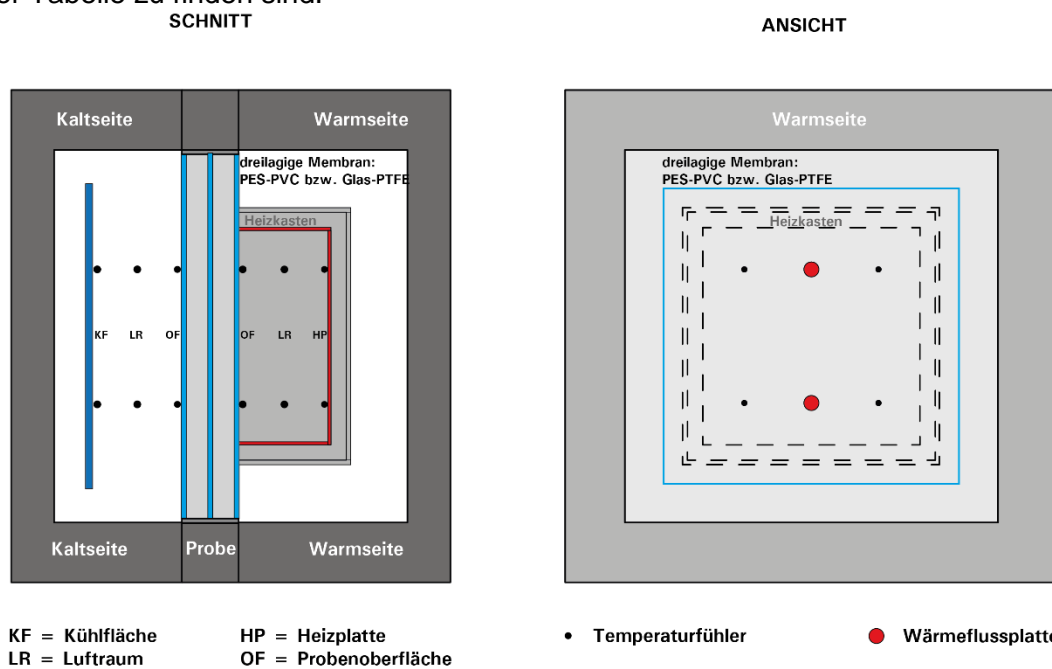


Abbildung 5.2: Sensoranordnung in der Hotbox bei dreilagigen textilen Lagenaufbauten ohne Funktionsmaterialien

Tabelle 5-3: Übersicht der in der Hotbox untersuchten dreilagigen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien

Lagenaufbau	Lage 1 (Warmseite)	Zwischenraum	Lage 2	Zwischenraum	Lage 3 (Kaltseite)
1. PES-PVC I	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915	Luftschicht 85 mm	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915	Luftschicht 85 mm	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915
2. PES-PVC II	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B4915	Luftschicht 85 mm	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B4915	Luftschicht 85 mm	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B4915
3. Glas-PTFE I	Glas-PTFE Membran Verseidag Duraskin B18059	Luftschicht 85 mm	Glas-PTFE Membran Verseidag Duraskin B18059	Luftschicht 85 mm	Glas-PTFE Membran Verseidag Duraskin B18059
4. Glas-PTFE II	Glas-PTFE Membran Verseidag Duraskin B18089	Luftschicht 85 mm	Glas-PTFE Membran Verseidag Duraskin B18089	Luftschicht 85 mm	Glas-PTFE Membran Verseidag Duraskin B18089
5. Glasfasergewebe	Glasfasergewebe Verseidag Duraskin B28050	Luftschicht 85 mm	Glasfasergewebe Verseidag Duraskin B28050	Luftschicht 85 mm	Glasfasergewebe Verseidag Duraskin B28050

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die gemessenen U-Werte der fünf unterschiedlichen Materialaufbauten bei einem Temperaturgefälle von ungefähr 20 K in einem Bereich

von 1,51 W/m<sup>2</sup>K bis 2,63 W/m<sup>2</sup>K liegen. Es wurden dabei unterschiedliche Temperaturniveaus (Temperaturen der Probenoberflächen der Warm- bzw. Kaltseite) betrachtet, um den Effekt der Oberflächentemperaturen auf den Wärmeaustausch durch Strahlung zu verdeutlichen. Nachfolgend finden sich die Tabellen und Grafen zu den einzelnen Materialaufbauten, aus denen die Temperaturabhängigkeit des U-Werts deutlich zu erkennen ist.

Tabelle 5-4: Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien [9]

Lagenaufbau	Temperatur [°C]		Temperatur [°C]	Wärmestromdichte [W/m <sup>2</sup> ]	Kennwerte [W/m <sup>2</sup> K]	
	Warmseite Probenoberfläche (OF)	Kaltseite Probenoberfläche (OF)	Temperaturdifferenz Warmseite-OF-Kaltseite OF		1/R-Wert	U-Wert
1. Verseidag Duraskin B1915 PVC/PES	20,11	0,97	19,14	61,48	3,21	2,07
	25,63	6,25	19,38	69,52	3,59	2,31
	33,72	13,81	19,91	81,55	4,10	2,53
2. Verseidag Duraskin B4915 PVC/PES	19,66	0,71	18,95	58,51	3,09	2,03
	25,95	6,10	19,85	67,43	3,40	2,31
	34,15	13,23	20,92	85,04	4,07	2,63
3. Verseidag Duraskin B18059	19,92	0,77	19,15	40,63	2,12	1,51
	25,36	6,06	19,30	45,45	2,35	1,65
	30,68	11,65	19,03	59,41	3,12	2,13
4. Verseidag Duraskin B18089	20,21	0,89	19,32	63,27	3,27	2,09
	25,74	6,12	19,62	72,04	3,67	2,31
	31,72	11,83	19,89	78,99	3,97	2,48
5. Verseidag Duraskin B28050	20,20	0,92	19,28	67,39	3,50	2,22
	25,89	6,41	19,48	75,80	3,89	2,42
	31,76	12,03	19,64	83,61	4,26	2,63

### 5.2.1 Dreilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B1915

Das folgende Diagramm (Abbildung 5.3) stellt die U-Werte nach DIN EN ISO 6946:2018, berechnet mit den Bemessungswerten der Wärmeübergangswiderstände (Tabelle 3-1) sowie den Wärmedurchlasswiderständen von ruhenden Luftschichten (Abbildung 3.1), denen der Messungen in der Hotbox für den dreilagigen Aufbau des PES-PVC Duraskin B 1915 gegenüber. Bei dieser Versuchsreihe wurde eine Vielzahl an Messungen durchgeführt, bei denen Temperaturdifferenzen zwischen der Warm- und der Kaltseite von 15,61 bis zu 27 K eingestellt wurden (siehe Tabelle 5-5). Für diesen Probenaufbau wurden die meisten Messungen durchgeführt. Anhand der umfangreichen Versuche konnten für die nachfolgenden Messungen die relevanten Messbedingungen ermittelt und festgelegt werden. Es ist deutlich zu erkennen,

dass die jeweiligen Temperaturniveaus (mit unterschiedlichen Oberflächentemperaturen auf der Probenwarmseite) einen signifikanten Einfluss auf die gemessenen 1/R- sowie U-Werte haben. Diese Temperaturabhängigkeit wird bei der Berechnungsmethode nach DIN nicht berücksichtigt, so dass Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem berechneten U-Wert (U-Wert nach DIN = 100 %) von bis zu ca. 48 % entstehen.

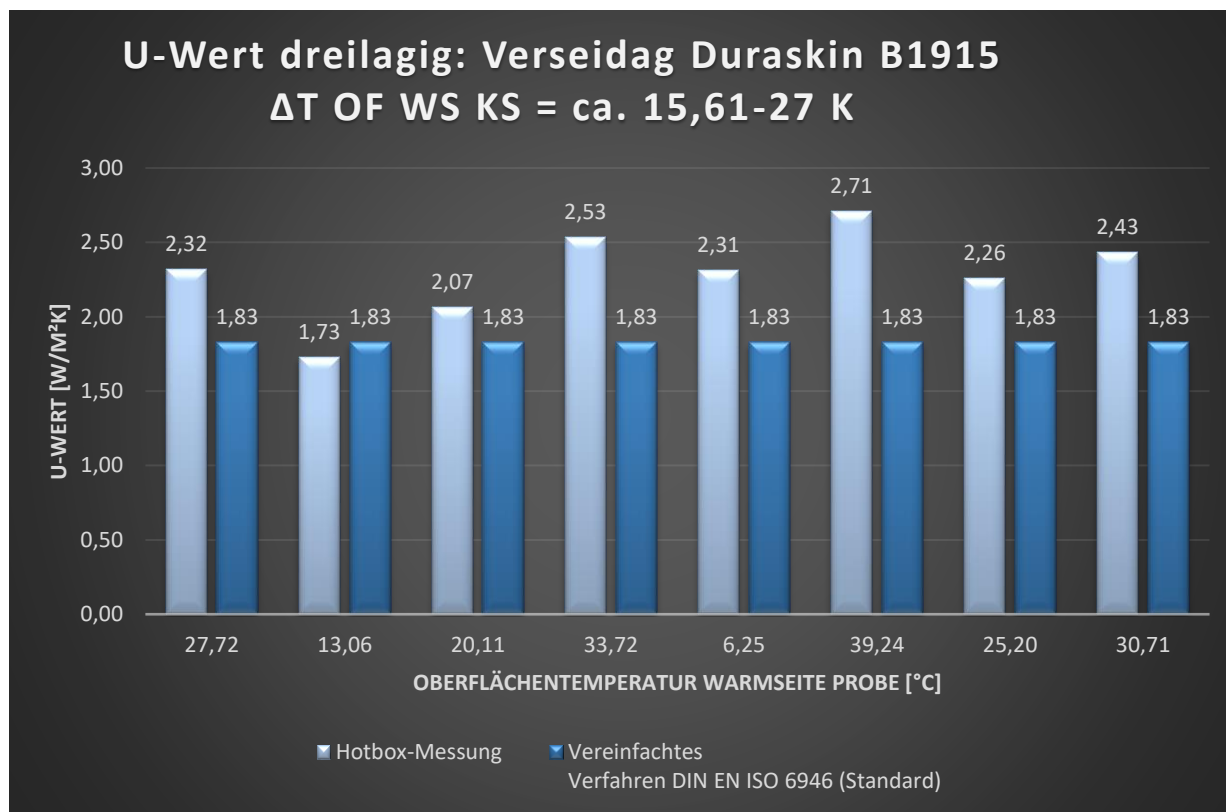


Abbildung 5.3: U-Werte des dreilagigen Aufbaus Duraskin B1915 ohne Funktionsstoffe nach Hotbox-Messung und Berechnung nach vereinfachtem Verfahren der DIN EN ISO 6946:2018

Tabelle 5-5: Messergebnisse und daraus berechnete U-Werte der in der Hotbox untersuchten dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B1915

Nr.	Warm OF [°C]	Kalt OF [°C]	Delta T (OF) [K]	WFP [W/m²]	1/R-Wert [W/m²K]	U-Wert [W/m²K]
1.1	27,72	12,11	15,61	58,284	3,734	2,318
1.2	13,06	-3,05	16,11	42,14	2,616	1,728
1.3	20,11	0,97	19,14	61,4808	3,212	2,065
1.4	33,72	13,81	19,91	81,55	4,096	2,532
1.5	25,63	6,25	19,38	69,52	3,587	2,312
1.6	39,24	14,93	24,31	103,97	4,277	2,710
1.7	25,2	1,63	23,57	83,54	3,544	2,257
1.8	30,71	3,71	27	106,35	3,939	2,443

## 5.2.2 Dreilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B4915

Das folgende Diagramm (Abbildung 5.4) stellt die U-Werte nach DIN EN ISO 6946:2018, berechnet mit den Bemessungswerten der Wärmeübergangswiderstände (Tabelle 3-1) sowie den Wärmedurchlasswiderständen von ruhenden Luftschichten, denen der Messungen in der Hotbox für den dreilagigen Aufbau des PES-PVC Duraskin B4915 gegenüber (siehe Tabelle 5-6). Es ist deutlich zu erkennen, dass die jeweiligen Temperaturniveaus einen signifikanten Einfluss auf die 1/R- sowie U-Werte haben. Diese Temperaturabhängigkeit wird bei der Berechnungsmethode nach DIN nicht berücksichtigt, so dass Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem berechneten U-Wert (U-Wert nach DIN = 100 %) von bis zu ca. 68 % entstehen.

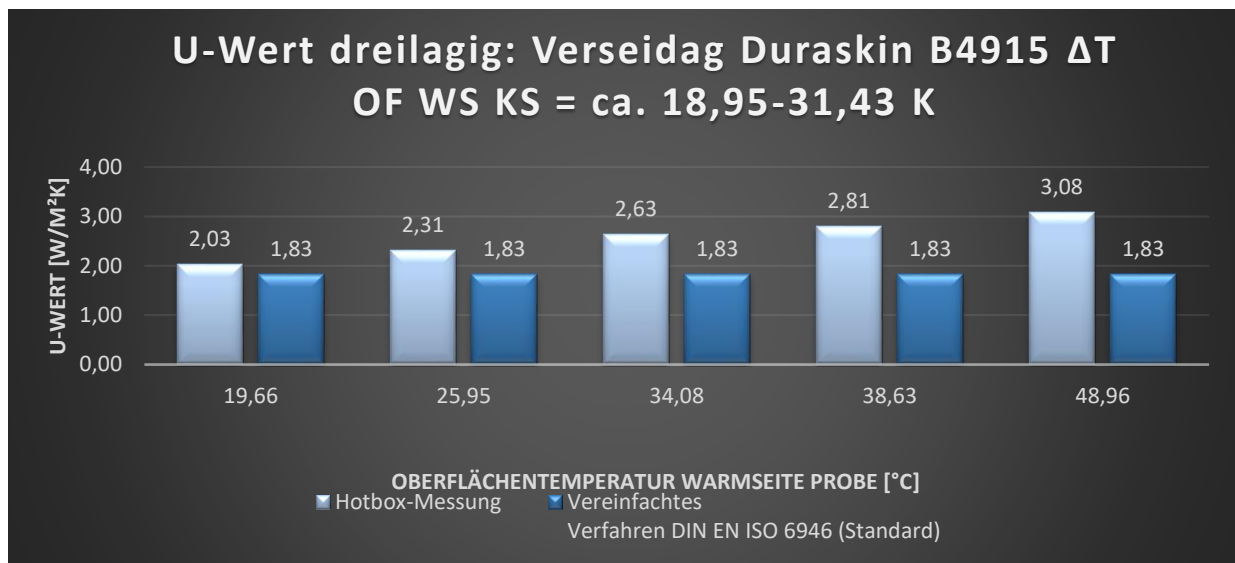


Abbildung 5.4: U-Werte des dreilagigen Aufbaus Duraskin B4915 ohne Funktionsstoffe nach Hotbox-Messung und Anwendung der DIN EN ISO 6946:2018.

Tabelle 5-6: Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B4915

Nr.	Warm OF [°C]	Kalt OF [°C]	Delta T (OF) [K]	WFP [W/m²]	1/R-Wert [W/m²K]	U-Wert [W/m²K]
2.1	19,66	0,71	18,95	58,51	3,088	2,029
2.2	25,95	6,1	19,85	67,43	3,397	2,31
2.3	34,08	13,22	20,86	85,04	4,077	2,631
2.4	38,63	14,64	23,99	107,76	4,492	2,805
2.5	48,96	17,63	31,33	151,74	4,843	3,079

### 5.2.3 Dreilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B18059

Das folgende Diagramm (Abbildung 5.5) stellt die U-Werte nach DIN EN ISO 6946:2018, berechnet mit den Bemessungswerten der Wärmeübergangswiderstände (Tabelle 3-1) sowie den Wärmedurchlasswiderständen von ruhenden Luftschichten, denen der Messungen in der Hotbox für den dreilagigen Aufbau des PTFE-beschichteten Glasfasergewebes Duraskin B18059 gegenüber (siehe Tabelle 5-7). Es ist deutlich zu erkennen, dass die jeweiligen Temperaturniveaus einen Einfluss auf die 1/R- sowie U-Werte haben. Diese Temperaturabhängigkeit wird bei der Berechnungsmethode nach DIN nicht berücksichtigt, so dass Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem berechneten U-Wert (U-Wert nach DIN = 100 %) von bis zu ca. 19,68 % entstehen.

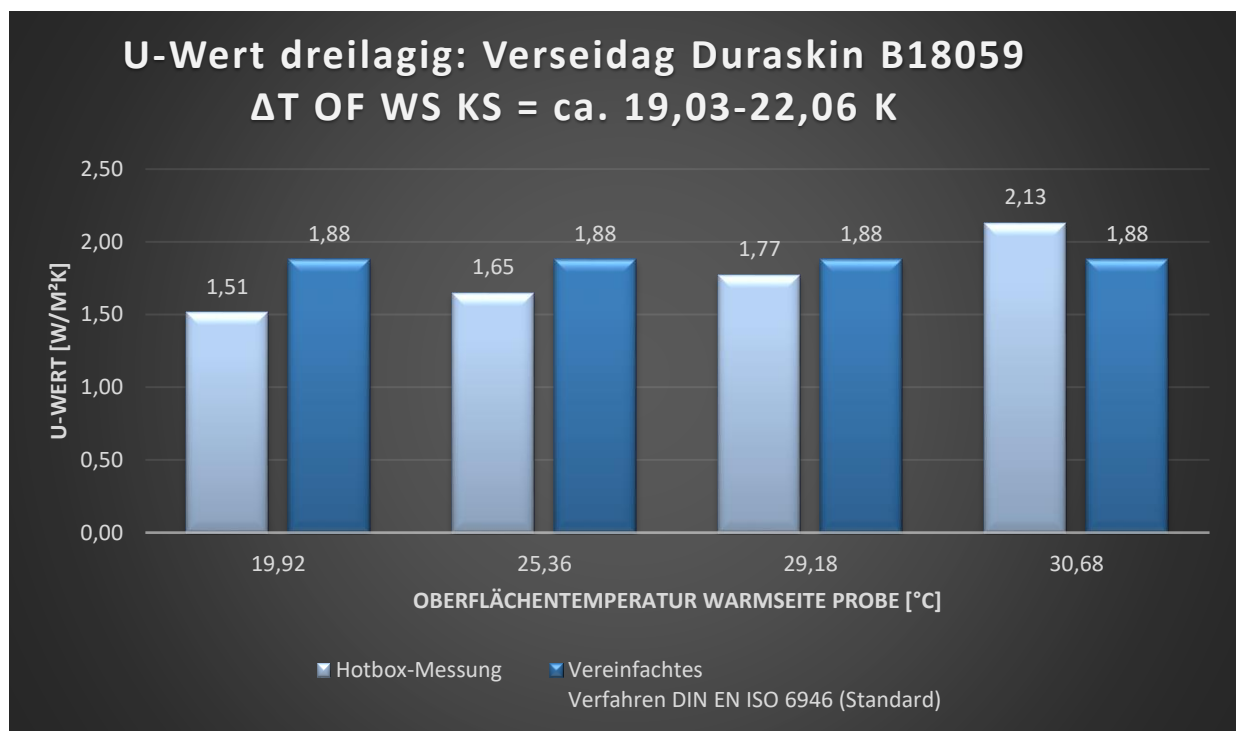


Abbildung 5.5: U-Werte des dreilagigen Aufbaus Duraskin B18059 ohne Funktionsstoffe nach Hotbox-Messung und Anwendung der DIN EN ISO 6946:2018

Tabelle 5-7: Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B18059

Nr.	Warm OF [°C]	Kalt OF [°C]	Delta T (OF) [K]	WFP [W/m²]	1/R-Wert [W/m²K]	U-Wert [W/m²K]
3.1	19,92	0,77	19,15	40,63	2,12	1,51
3.2	25,36	6,06	19,30	45,45	2,36	1,65
3.3	29,18	7,12	22,06	56,34	2,55	1,77
3.4	30,68	11,65	19,03	59,41	3,12	2,13

## 5.2.4 Dreilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B18089

Das folgende Diagramm (Abbildung 5.6) stellt die U-Werte nach DIN EN ISO 6946:2018, berechnet mit den Bemessungswerten der Wärmeübergangswiderstände (Tabelle 3-1) sowie den Wärmedurchlasswiderständen von ruhenden Luftschichten, denen der Messungen in der Hotbox für den dreilagigen Aufbau des PTFE-beschichteten Glasfasergewebes Duraskin B18089 gegenüber (siehe Tabelle 5-8). Es ist deutlich zu erkennen, dass die jeweiligen Temperaturniveaus einen Einfluss auf die U-Werte haben. Diese Temperaturabhängigkeit wird bei der Berechnungsmethode nach DIN nicht berücksichtigt, so dass Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem berechneten U-Wert (U-Wert nach DIN = 100 %) von bis zu ca. 33,5 % entstehen.

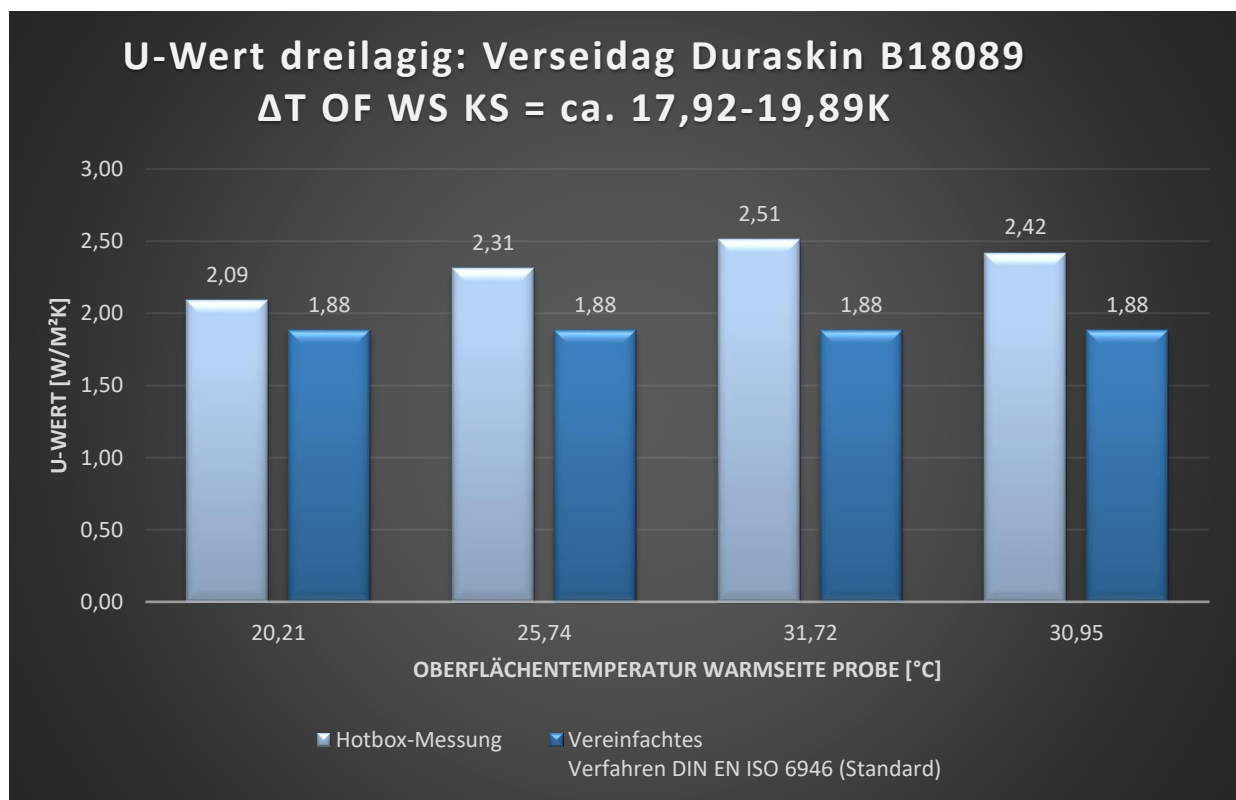


Abbildung 5.6: U-Werte des dreilagigen Aufbaus Duraskin B18089 ohne Funktionsstoffe nach Hotbox-Messung und Anwendung der DIN EN ISO 6946:2018

Tabelle 5-8: Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B18089

Nr.	Warm OF [°C]	Kalt OF [°C]	Delta T (OF) [K]	WFP [W/m²]	1/R-Wert [W/m²K]	U-Wert [W/m²K]
4.1	20,21	0,89	19,32	63,27	3,28	2,09
4.2	25,74	6,12	19,62	72,04	3,67	2,31
4.3	31,72	11,83	19,89	79,99	4,02	2,51
4.4	30,95	13,03	17,92	69,17	3,86	2,42



### 5.2.5 Dreilagiger textiler Aufbau ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B28050

Das folgende Diagramm (Abbildung 5.7) stellt die U-Werte nach DIN EN ISO 6946:2018 denen der Messungen in der Hotbox für den dreilagigen Aufbau des unbeschichteten Glasfasergewebes Duraskin B28050 gegenüber (siehe Tabelle 5-9). Es ist deutlich zu erkennen, dass die jeweiligen Temperaturniveaus einen Einfluss auf die U-Werte haben. Diese Temperaturabhängigkeit wird bei der Berechnungsmethode nach DIN nicht berücksichtigt, so dass Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem berechneten 1/R- sowie U-Wert (U-Wert nach DIN = 100 %) von bis zu ca. 42 % entstehen.

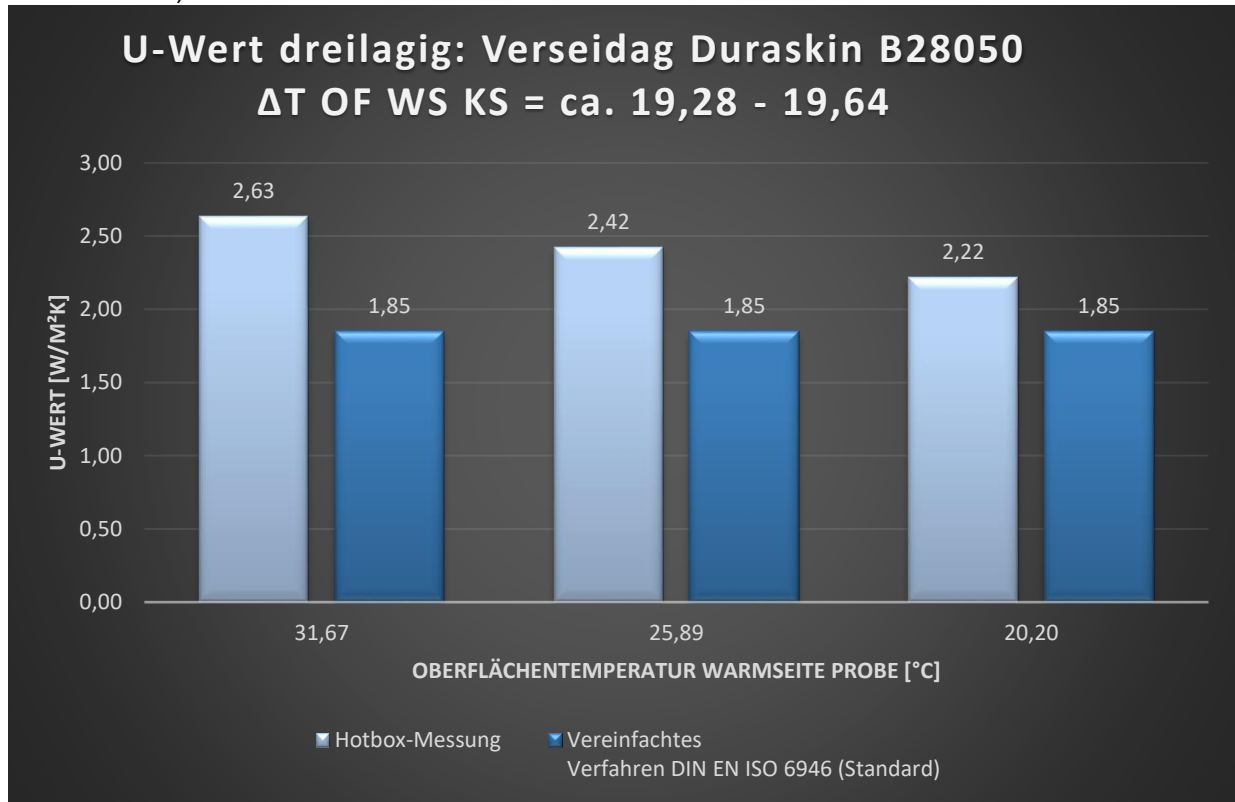


Abbildung 5.7: U-Werte des dreilagigen Aufbaus Duraskin B28050 ohne Funktionsstoffe nach Hotbox-Messung und Anwendung der DIN EN ISO 6946:2018

Tabelle 5-9: Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B28050

Nr.	Warm OF [°C]	Kalt OF [°C]	Delta T (OF) [K]	WFP [W/m²]	1/R-Wert [W/m²K]	U-Wert [W/m²K]
5.1	31,67	12,03	19,64	83,61	4,26	2,63
5.2	25,89	6,41	19,48	75,80	3,89	2,42
5.3	20,20	0,92	19,28	67,39	3,50	2,22



### 5.3 Zweilagiger textiler Aufbau mit Funktionsmaterialien

Um zu ermitteln, welchen Einfluss wärmedämmende Funktionsmaterialien auf den Wärmedurchgang ausüben, erfolgten Untersuchungen an Systemaufbauten mit zwei Membranlagen und dazwischen angebrachten Funktionsmaterialien. Hierfür wurde ein einheitlicher Aufbau gewählt, bei dem die beiden äußeren Decklagen jeweils aus Polyester-PVC-Membranen bestanden (Verseidag Duraskin B1915). Als abstandsbildende und wärmedämmende Funktionsstoffe wurden zwei unterschiedliche Wabenstrukturen, ein Glasfasergespinnst und ein akustisch wirksames Polyestervlies (siehe Tabelle 5-10) ausgewählt.

Der Projektpartner Wacotech aus Herford produziert, überwiegend für den Einsatz im Verglasungsbereich, unterschiedliche transluzente Wärmedämmungen. Da sich diese Materialien jedoch auch für den Einsatz bei textilen Systemen eignen, wurden sie im Projekt näher untersucht. Dafür stellte der Projektpartner dem ILEK in Material und Zellengröße unterschiedliche Wabenstrukturen und ein transluzentes Glasfasergespinnst zur Verfügung (siehe Abbildung 5.8).

Im Rahmen des Forschungsprojekts ARAKO wurde gemeinsam mit dem Projektpartner Groz-Beckert ein Akustikvlies entwickelt und hergestellt, welches das bewertete Schalldämmmaß textiler Hüllen deutlich verbessert. Dieses wurde in die Messreihen zur Ermittlung der thermischen Eigenschaften einbezogen [24].

Die einzelnen Aufbauten, Materialien und Versuchsergebnisse werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

Tabelle 5-10: Übersicht der in der Hotbox untersuchten dreilagigen Aufbauten mit Funktionsmaterialien

Lagenaufbau	Lage 1 (Kaltseite)	Funktionswerkstoff	Lage 2 (Warmseite)
1. Wabenaufbau I	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915	Wabenstruktur Wacotech Wavecore PET150-18/S	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915
2. Wabenaufbau II	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915	Wabenstruktur Wacotech TIMax CA 40-FR	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915
3. Glasfasergespinnst	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915	Glasfasergespinnst Wacotech TIMax GL-PlusF	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915
4. Akustikvlies	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915	ARAKO PES- Akustikvlies	Polyester-PVC Membran Verseidag Duraskin B1915

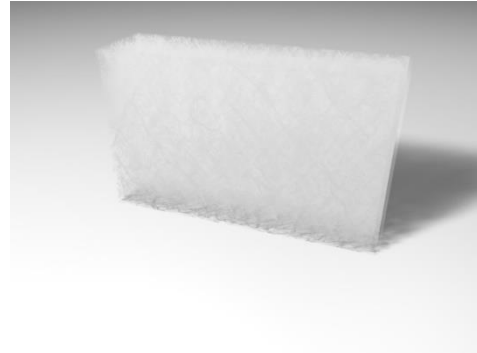
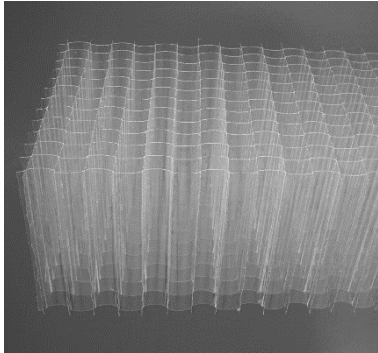
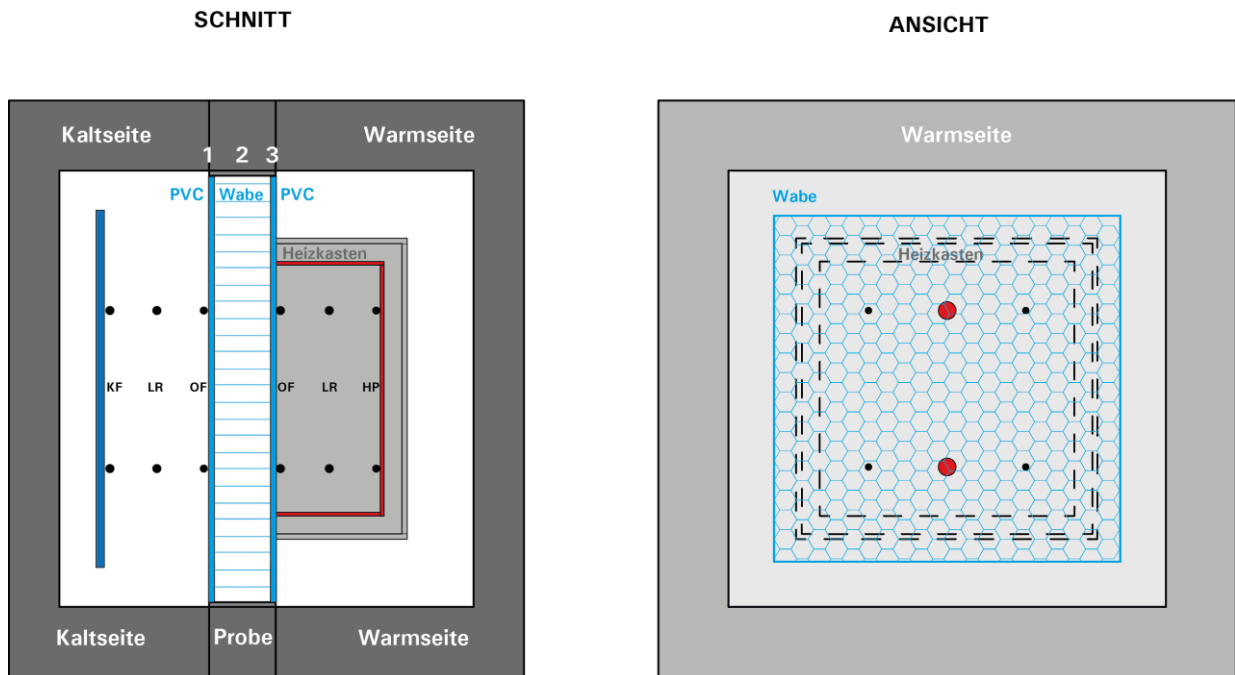


Abbildung 5.8: Exemplarische Abbildung einer Wabenstruktur (linkes Bild) und eines Glasfasergespinnstes (rechtes Bild) der Firma Wacotech

### 5.3.1 Zweilagiger textiler Aufbau mit Funktionsmaterialien: Wabenaufbau 1 Wacotech Wavecore PET150-18/S

Der Wabenaufbau 1 wurde mit dem Material Wacotech Wavecore PET150-18/S ausgeführt. Die Abmessungen der Wabendurchgänge betragen ca. 9 x 9 mm. Die Stege zwischen den einzelnen Zellen weisen eine Dicke von ungefähr 0,3 mm auf. Die Materialdicke beträgt 160 mm, so dass die Gesamtdicke des dreilagigen Systems ungefähr 10 mm weniger beträgt als bei den textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterial. Das Material der Wabe im Aufbau I besteht aus Polyethylenterephthalat (PET). Der Lagenaufbau ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

Um auch für diesen Aufbau den Einfluss des Temperaturniveaus bestimmen zu können, wurden vier Messungen durchgeführt, bei denen das Temperaturniveau auf der Warmseite der Membrane zwischen 18,06 °C und 32,94 °C lag bei einem nahezu einheitlichen Temperaturgefälle zwischen den Warmseiten- und den Kaltseitenoberflächen von ca. 20 K (Tabelle 5-11).



- Temperaturfühler
- Wärmeflussplatte

Abbildung 5.9: Versuchsaufbau Wabenaufbau I

Tabelle 5-11: Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten zweilagigen Aufbauten mit Funktionsmaterial Wacotech Wavecore PET150-18/S

Nr.	Warm OF [°C]	Kalt OF [°C]	Delta T (OF) [K]	WFP [W/m²]	1/R-Wert [(m²K)/W]	U-Wert [W/m²K]
2.1	23,81	3,64	20,17	24,23	1,2	1,03
2.3	28,85	8,19	20,66	25,79	1,25	1,08
2.5	18,06	-1,91	19,97	23,23	1,16	0,98
2.6	32,94	13,06	19,88	27,3	1,37	1,15

Es ist zu erkennen, dass die jeweiligen Temperaturniveaus einen Einfluss auf die 1/R- sowie die U-Werte haben. Diese Temperaturabhängigkeit wird bei der Berechnungsmethode nach DIN nicht berücksichtigt, so dass Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem berechneten U-Wert (U-Wert nach DIN = 100 %) von bis zu ca. 23,7 % bestehen.

In Abbildung 5.10 werden Ergebnisse der Messungen und unterschiedlicher U-Wert-Berechnungsverfahren zusammenfassend grafisch dargestellt. Die Berechnung der U-Werte erfolgte einerseits nach DIN EN ISO 6946:2018 unter Verwendung der Bemessungswerte der Wärmeübergangswiderstände (Tabelle 3-1) und der Wärmedurchlasswiderstände von ruhenden Luftschichten (als Standardverfahren bezeichnet) sowie andererseits nach DIN EN ISO 6946:2018 unter Verwendung des messwertbasierten Wärmedurchlasswiderstandes der Membranlagen

und Luftschichten sowie der Berechnung der Wärmeübergangswiderstände an den Übergängen von Membran zu Luftraum (messwertbasiertes Verfahren) nach Anhang C der DIN EN ISO 6946:2018 unter Anwendung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten sowie Oberflächentemperaturen der Membranen. Zudem finden sich dort die mit dem Layer Tool berechneten Vergleichswerte. Es ist zu erkennen, dass das Standardverfahren den geringsten U-Wert beschreibt und somit von den Ergebnissen aus Messungen und Simulationen deutlich abweicht. Bei der messwertbasierten Anwendung der DIN EN ISO 6946:2018 ergibt sich hingegen eine deutlich höhere Genauigkeit.

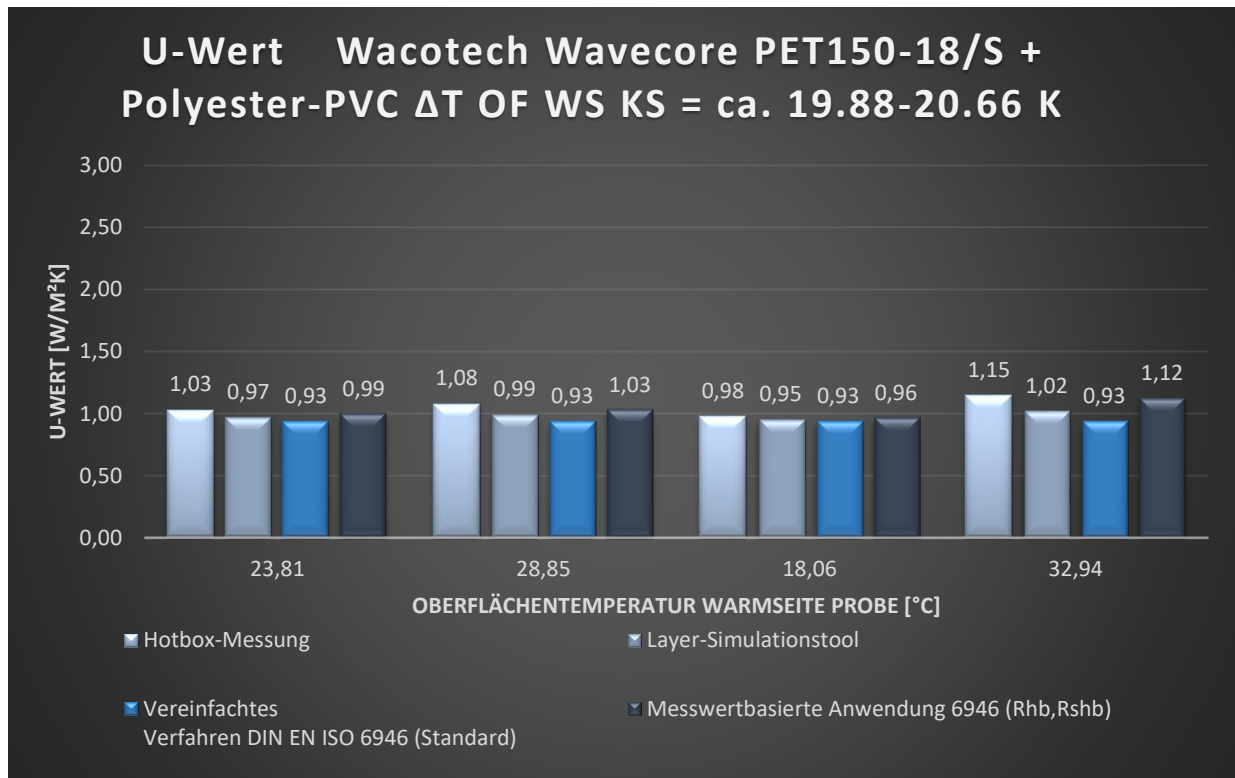
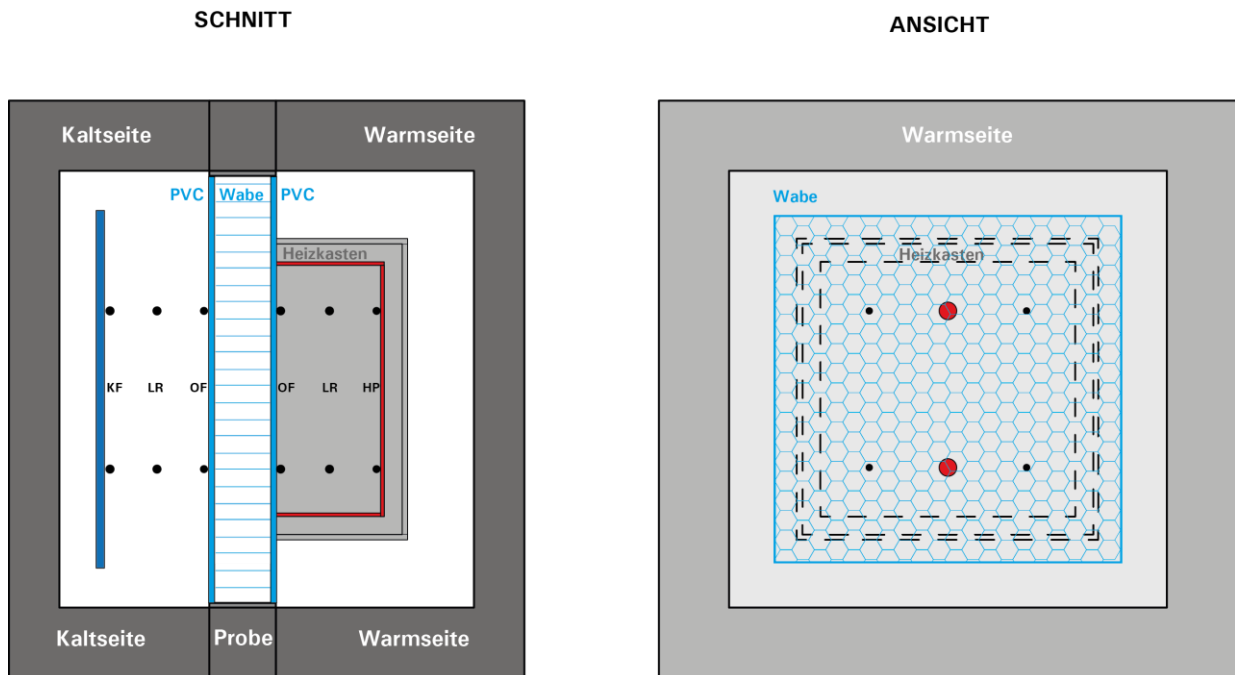


Abbildung 5.10: Grafische Darstellung der U-Werte für den Wabenaufbau I

### 5.3.2 Zweilagiger textiler Aufbau mit Funktionsmaterialien: Wabenaufbau 2 Wacotech Timax CA 40-FR

Der zweite untersuchte Wabenaufbau unterscheidet sich vom Wabenaufbau I lediglich durch die eingesetzte Wabe. Hierbei handelt es sich um die Wabe TIMax CA 40-FR desselben Herstellers Wacotech. Die auf beiden Seiten verwendeten Polyester-PVC-Membranen sind mit den zuvor verwendeten identisch. Das Material der Wabe im Aufbau II besteht aus Cellulose-Acetat (CA). Die Lochmaße der Wabe betragen ca. 6 x 6 mm, bei einer Stegdicke von ca. 0,1 mm und einer Wabenhöhe von ca. 160 mm.

Für eine optimale Vergleichbarkeit wurden wiederum insgesamt vier Messungen detailliert ausgewertet, bei denen die Temperaturen auf den Membranoberflächen der Warmseiten zwischen ca. 17,27 °C und 33,54 °C lagen. Die Temperaturunterschiede zwischen den Warmseiten- und den Kaltseitenoberflächen betragen nahezu einheitlich ca. 20 K.



- Temperaturfühler
- Wärmeflussplatte

Abbildung 5.11: Versuchsanordnung Wabenaufbau II

In Tabelle 5-12 sind alle Ergebnisse aus den Hotbox-Messungen an diesem Wabenaufbau dargestellt. In Abbildung 5.12 werden Ergebnisse der Messungen und der unterschiedlichen U-Wert-Berechnungsverfahren zusammenfassend grafisch dargestellt. Die Berechnung der U-Werte erfolgte einerseits nach DIN EN ISO 6946:2018 unter Verwendung der Bemessungswerte der Wärmeübergangswiderstände (Tabelle 3-1) und der Wärmedurchlasswiderstände von ruhenden Luftschichten nach Abbildung 3.1 (als Standardverfahren bezeichnet) sowie andererseits unter Verwendung des messwertbasierten Wärmedurchlasswiderstandes der Membranlagen und Luftschichten mit Einbeziehung der Wärmeübergangswiderstände an den Übergängen von Membran zu Luftraum (messwertbasiertes Verfahren) nach Anhang C der DIN EN ISO 6946:2018 unter Anwendung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten sowie Oberflächentemperaturen der Membranen. Zudem finden sich dort die mit dem Layer Tool berechneten Vergleichswerte.

Tabelle 5-12: Übersicht der in der Hotbox untersuchten zweilagigen Aufbauten mit Funktionsmaterial Wacotec TIMax CA 40-FR + Polyester-PVC

Nr.	Warm OF [°C]	Kalt OF [°C]	Delta T (OF) [K]	WFP [W/m²]	1/R-Wert [(m²K)/W]	U-Wert [W/m²K]
3.2	17,27	-2,05	19,32	15,3	0,79	0,71
3.3	25,37	5,57	19,8	17,11	0,86	0,77
3.4	29,71	10,34	19,37	17,77	0,92	0,8
3.5	33,54	14,16	19,38	18,77	0,97	0,85

Es ist zu erkennen, dass das Standardverfahren den jeweils größten U-Wert beschreibt und somit von den Ergebnissen aus Messungen und Simulationen deutlich abweicht. Bei der messwertbasierten Anwendung der DIN EN ISO 6946 ergibt sich hingegen eine deutlich höhere Genauigkeit.

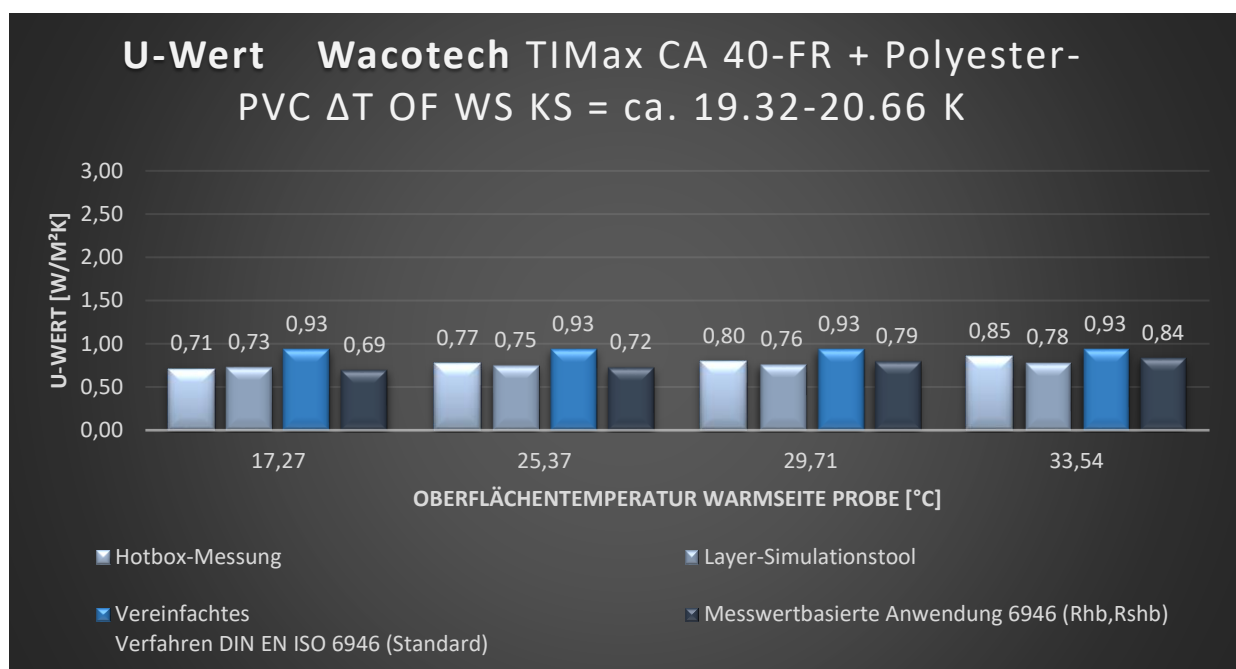
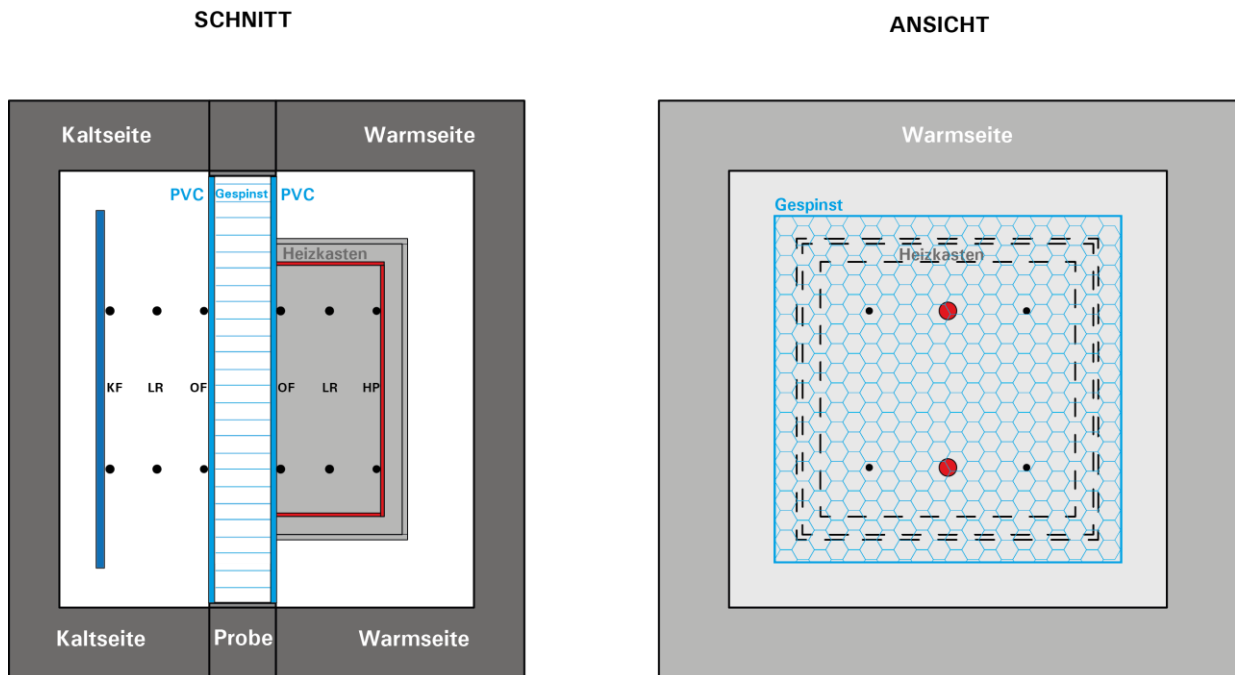


Abbildung 5.12: Grafische Darstellung der U-Werte für den Wabenaufbau II

### 5.3.3 Zweilagiger textiler Aufbau mit Funktionsmaterialien: Glasfasergespinnst Wacotech TIMax GL-PlusF

Der Aufbau mit Glasfasergespinnst wurde mit dem Material Wacotech TIMax GL-PlusF (Dicke ca. 110 mm); das zwischen den beiden Polyester-PVC-Membranen angeordnet war, ausgeführt.

Es wurden wiederum insgesamt vier Messungen detailliert ausgewertet, bei denen die Temperaturen auf den Membranoberflächen der Warmseiten zwischen ca. 17,43 °C und 31,57 °C lagen. Die Temperaturunterschiede zwischen den Warmseiten- und den Kaltseitenoberflächen betragen nahezu einheitlich ca. 22 K. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 5.13 dargestellt.



- Temperaturfühler
- Wärmeflussplatte

Abbildung 5.13: Versuchsaufbau für die Probe mit Glasfasergespinst

In Tabelle 5-13 sind alle Ergebnisse aus den Hotbox-Messungen an diesem Versuchsaufbau dargestellt.

In Abbildung 5.14 werden Ergebnisse der Messungen und unterschiedlicher U-Wert-Berechnungsverfahren zusammenfassend grafisch dargestellt. Die Berechnung der U-Werte erfolgte einerseits nach DIN EN ISO 6946:2018 unter Verwendung der Bemessungswerte der Wärmeübergangswiderstände (Tabelle 3-1) und der Wärmedurchlasswiderstände von ruhenden Luftschichten nach Abbildung 3.1 (als Standardverfahren bezeichnet) sowie andererseits unter Verwendung des messwertbasierten Wärmedurchlasswiderstandes der Membranlagen und Luftschichten sowie der Einbeziehung der Wärmeübergangswiderstände an den Übergängen von Membran zu Luftraum (messwertbasiertes Verfahren) nach Anhang C der DIN EN ISO 6946:2018 unter Anwendung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten sowie Oberflächentemperaturen der Membranen. Zudem finden sich dort die mit dem Layer Tool berechneten Vergleichswerte sowie Messergebnisse, die mit einem U-Wert-Mess- und Auswertesystem der Firma greenTEG AG ermittelt wurden.

Tabelle 5-13: Übersicht der in der Hotbox untersuchten zweilagigen Aufbauten mit Funktionsmaterial aus Glasfasergespinnst Wacotec TIMax GL-PlusF und Polyester-PVC-Membranen

Nr.	Warm OF [°C]	Kalt OF [°C]	Delta T (OF) [K]	WFP [W/m²]	1/R-Wert [(m²K)/W]	U-Wert [W/m²K]
4.1	17,43	-4,25	21,68	22,86	1,18	0,97
4.2	24,19	2,15	22,04	25,89	1,32	1,06
4.4	26,38	4,85	21,53	27,54	1,44	1,11
4.5	31,57	11,18	20,39	33,19	1,63	1,22

In Abbildung 5.14 ist zu erkennen, dass alle betrachteten U-Wert-Mess- und -Berechnungsverfahren zu U-Werten führen, die geringe Abweichungen von den gemessenen U-Werten zeigen. Die Ursache hierfür liegt nach Ansicht der Autoren in dem bei dieser Probe veränderten Verhältnis von Wärmeleitungsanteilen zum Strahlungswärmetransport zwischen der Kalt- und der Warmseite der Probe. Der Wärmestrahlungsaustausch zwischen der Warm- und der Kaltseite spielt eine geringere Rolle bei der Wärmeübertragung als bei den vorherigen Proben (Wabenaufbau I und II). Aus diesem Grund ist die Änderung des U-Wertes bei unterschiedlichen Oberflächentemperaturverhältnissen geringer ausgeprägt (max. ca. 18,44 %).

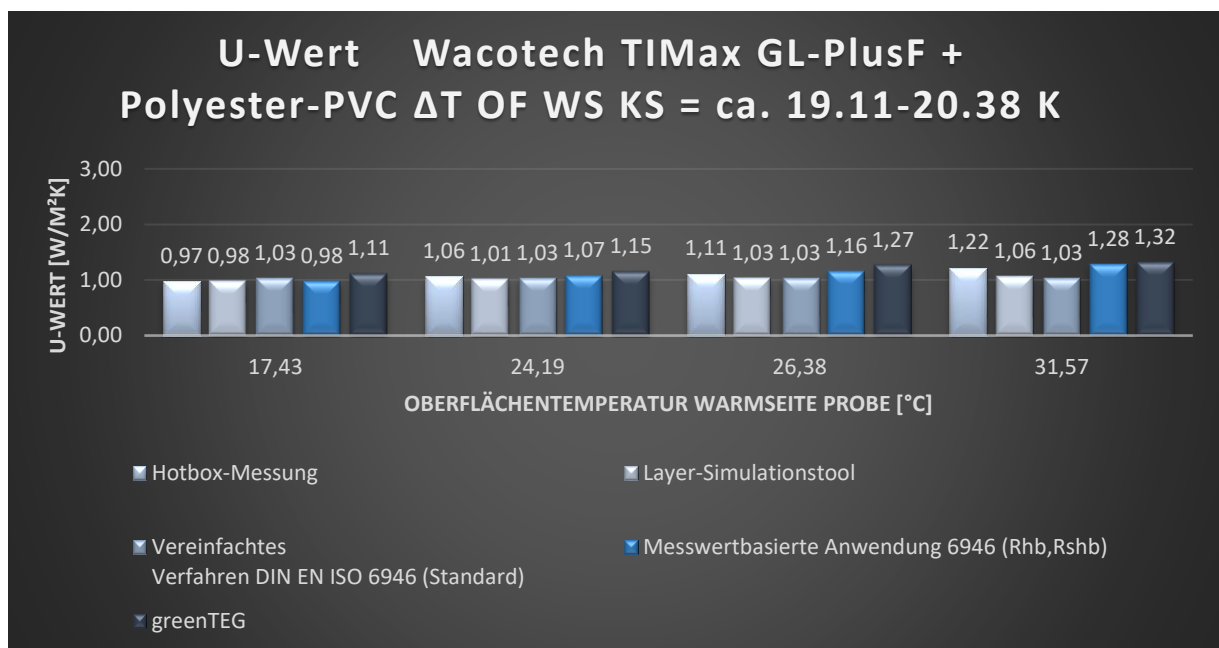


Abbildung 5.14: Grafische Darstellung der U-Werte für den Versuchsaufbau mit Glasfasergespinnst

### 5.3.4 Zweilagiger textiler Aufbau mit Funktionsmaterialien: PES-Akustikvlies ARAKO

Bei dieser Probe wurde ein spezielles, im Rahmen eines ILEK-Forschungsprojekts entwickeltes Akustikvlies als Funktionslage zwischen den beiden Außenmembranen eingesetzt. Bei dem Akustikvlies handelte es sich um einen gradierten Verbundvliesstoff aus Polyester mit zwei Vlieslagen in spiegelsymmetrischer Anordnung und einer Gesamtdicke von ca. 150 mm. Das Vlies bestand aus dichtem Filz mit hoher flächenbezogener Masse auf der einen Seite



und einem immer offeneren bis zu watteartigen Bereich auf der anderen Seite [24]. Das Flächengewicht des Aufbaus bestehend aus zwei Vliesschichten lag bei 4,5 kg/m<sup>2</sup>. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.15 dargestellt.

Es wurden wiederum insgesamt vier Messungen detailliert ausgewertet, bei denen die Temperaturen auf den Membranoberflächen der Warmseiten zwischen ca. 20,31 °C und 35,14 °C lagen. Die Temperaturunterschiede zwischen den Warmseiten- und den Kaltseitenoberflächen betragen nahezu einheitlich ca. 20 bis 21 K.

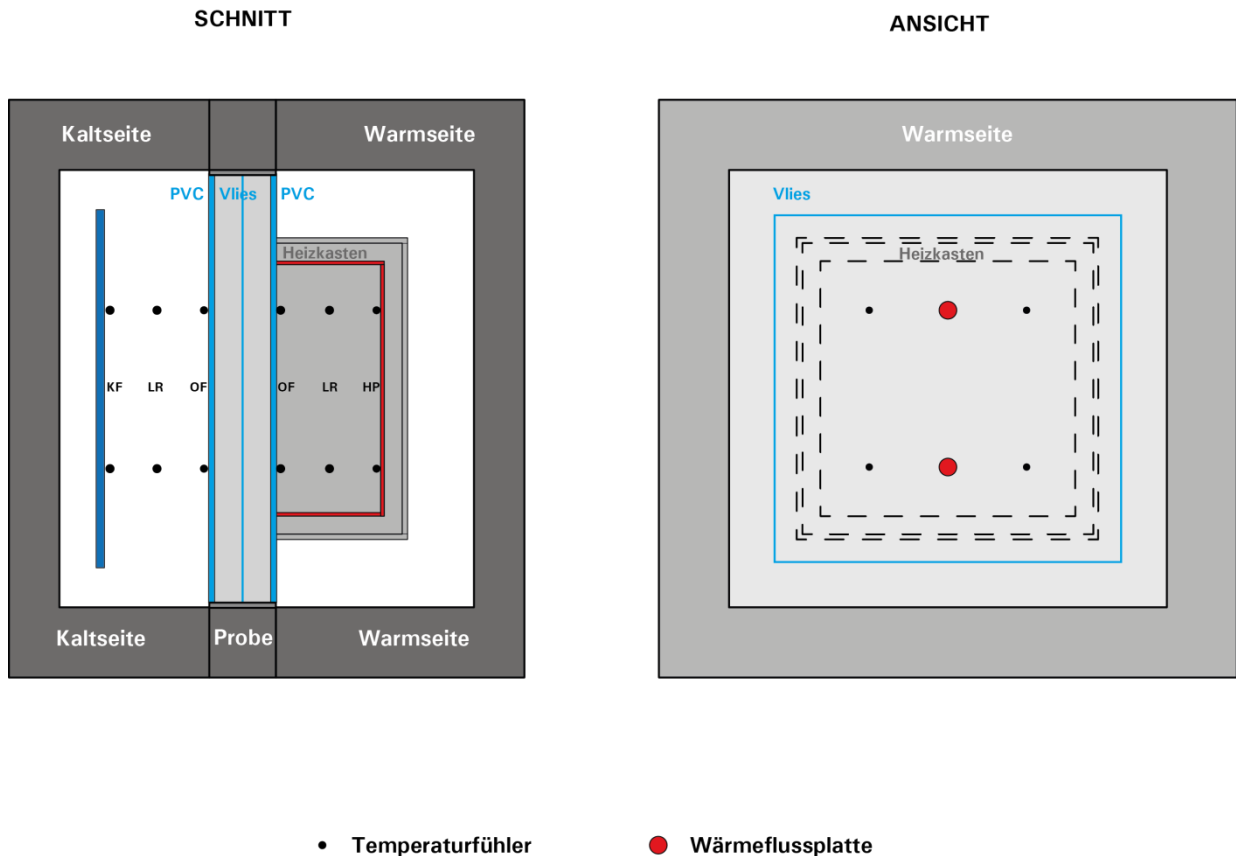


Abbildung 5.15: Versuchsaufbau mit Akustikvlies

In Tabelle 5-14 sind die Ergebnisse der Hotbox-Messungen für diesen Lageraufbau zusammengestellt. Auf Grund der großen Dämmwirkung des Vlieses in zweifacher Anordnung sind die 1/R- und die U-Werte klein im Vergleich zu den vorausgehend beschriebenen Proben.

Tabelle 5-14: Auswertungsergebnisse Akustikvlies

Nr.	Warm OF [°C]	Kalt OF [°C]	Delta T (OF) [K]	WFP [W/m <sup>2</sup> ]	1/R-Wert [(m <sup>2</sup> K)/W]	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
5.1	20,31	-0,15	20,46	8,44	0,43	0,39
5.2	24,63	4,46	20,17	8,77	0,45	0,42
5.3	30,23	9,19	21,04	9,71	0,48	0,44
5.4	35,14	13,98	21,16	10,22	0,5	0,47

In Abbildung 5.16 sind die U-Werte aus den Hotbox-Messungen, den Simulationen und den Berechnungen nach DIN EN ISO 6946:2018 (Standardverfahren und messwertbasiertes Verfahren) zusammenfassend dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Standardverfahren den geringsten U-Wert beschreibt und somit von den Ergebnissen aus Messungen und Simulationen deutlich abweicht. Bei der messwertbasierten Anwendung der DIN EN ISO 6946:2018 ergibt sich hingegen eine deutlich höhere Genauigkeit.

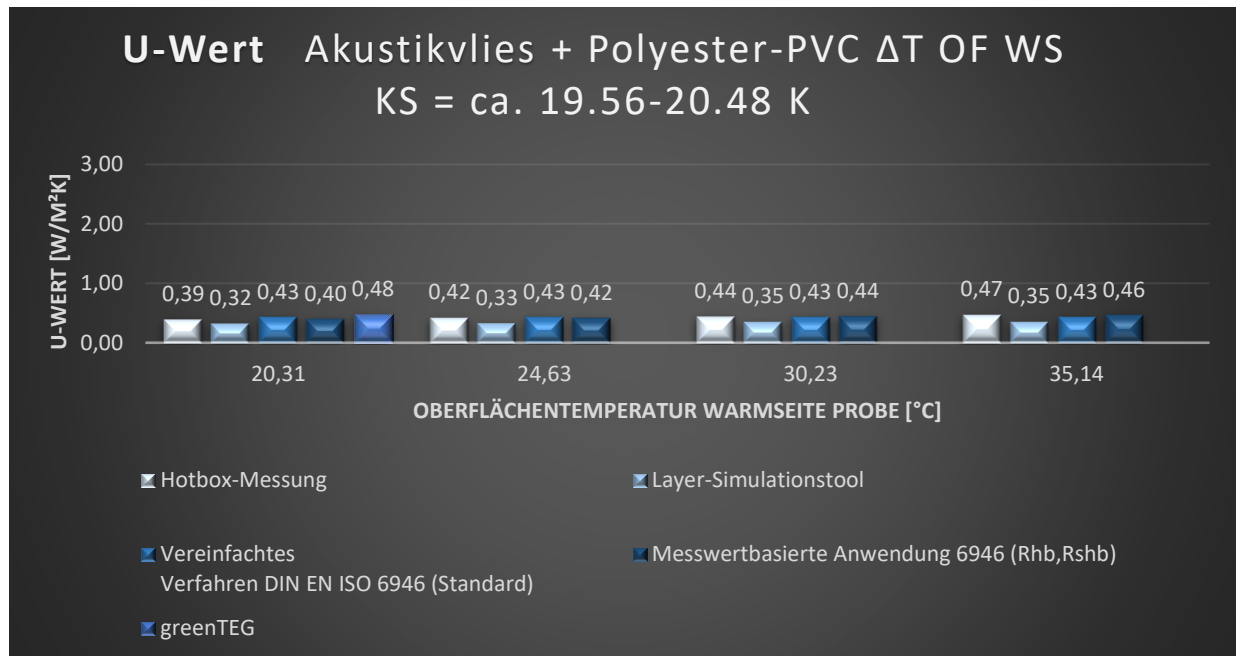


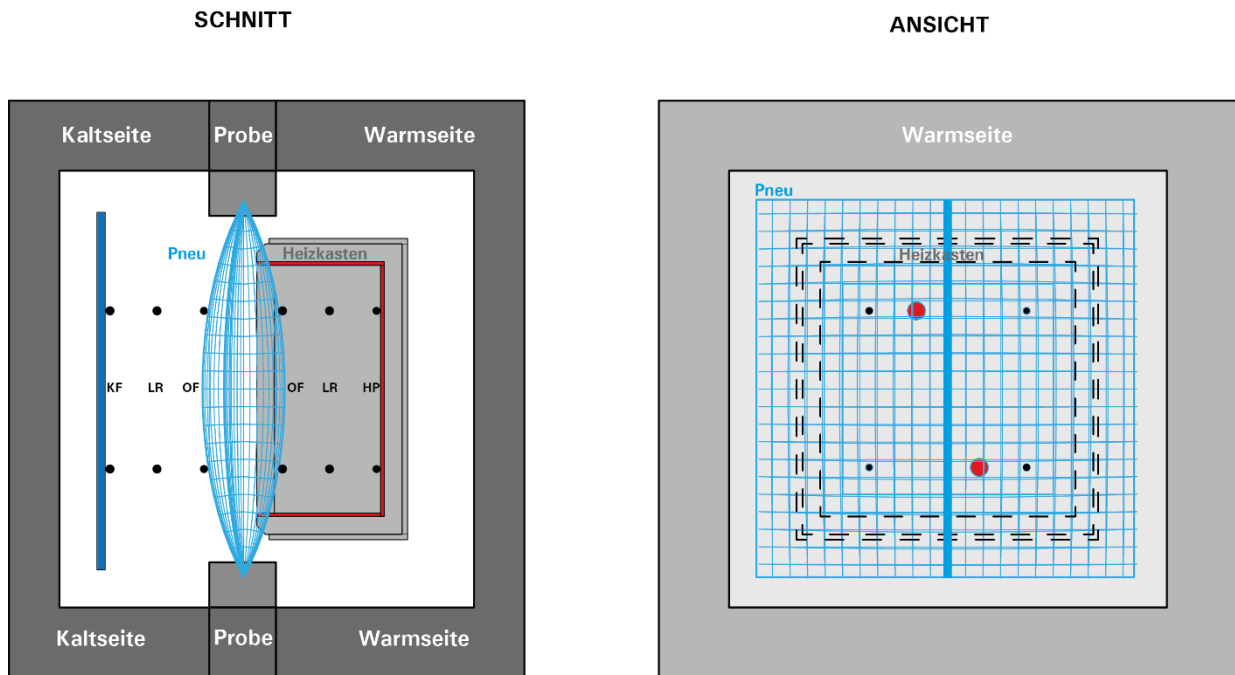
Abbildung 5.16: Zusammenfassung der U-Werte für den Aufbau mit Akustikvlies

#### 5.4 Dreilagiges pneumatisches Kissen aus ETFE-Folien

Sowohl am IBP als auch am ILEK wurden dreilagige Pneukissen wärmetechnisch vermessen. Die Probenanordnung für die Messung im geregelten Heizkasten findet sich in nachfolgender Abbildung 5.17, der Lagenaufbau ist in Tabelle 5-15 dokumentiert.

Tabelle 5-15: In der Hotbox untersuchtes dreilagiges ETFE-Kissen

Lagenaufbau	Lage 1	Zwischenraum	Lage 2	Zwischenraum	Lage 3
1. ETFE-Kissen	ETFE-Folie (Novofol 250 $\mu$ m Standart silber 50% Dekor 9212 16 mm Punkte )	Luftschicht	ETFE-Folie (AGC 150 $\mu$ m transparent )	Luftschicht	ETFE-Folie (AGC 150 $\mu$ m transparent )



- Temperaturfühler
- Wärmeflussplatte
- Schweißnaht Pneu

Abbildung 5.17: Versuchsaufbau ETFE-Kissen

Für die messtechnische Erfassung des Pneu-Prüflings musste die Hotbox umgebaut werden, da die vorausgehend beschriebenen Proben ebene Außenoberflächen aufwiesen, der Pneu dagegen eine doppelt gekrümmte Oberflächengeometrie hatte. Um einen luftdichten Abschluss zwischen dem Pneu und dem Messkasten der Hotbox zu erzielen, war eine maßgeschneiderte Abdichtung erforderlich. In Abstimmung mit der Firma Seele wurde ein Prüfling entwickelt, der in seinen Abmessungen für den Einbau in die Hotbox optimiert war. Basierend auf dessen geometrischen Daten konnten am ILEK Formfrästeile zur Dichtung hergestellt werden (siehe Abbildung 5.18), die beim Einbau des Pneus zum Einsatz kamen.

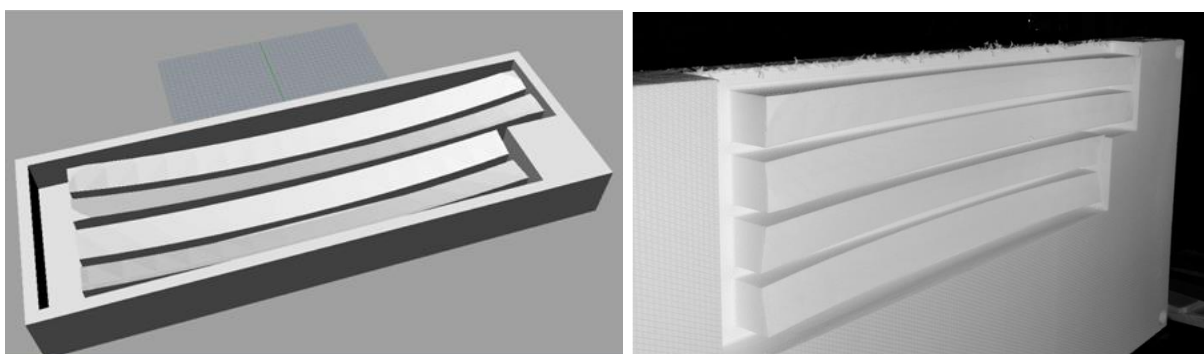


Abbildung 5.18: Screenshot der Formfrästeile zur Einpassung des Pneus in die Hotbox (linkes Bild) und fertig hergestelltes Formfrästeil (rechtes Bild)

In Tabelle 5-16 sind die Ergebnisse der Hotbox-Messungen für den dreilagigen Kissenbau zusammengestellt. Wie bei den zwei- und dreilagigen Membranproben bereits festgestellt wurde, führt auch beim Pnekissen eine Erhöhung der Oberflächentemperaturen, bei gleichbleibender Temperaturdifferenz zwischen der Warm- und der Kältoberfläche der Folie, zu einer Erhöhung des 1/R- sowie des U-Wertes in signifikanter Weise. Diese Temperaturabhängigkeit wird bei der Berechnungsmethode nach DIN (Standardverfahren) nicht berücksichtigt, so dass Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem berechneten U-Wert (U-Wert nach DIN = 100 %) von bis zu ca. 25 % entstehen. In Abbildung 5.19 sind die ermittelten Messwerte sowie die berechneten Werte für den U-Wert dargestellt.

Tabelle 5-16: Auswertungsergebnisse für das dreilagige ETFE-Kissen

Nr.	Warm OF [°C]	Kalt OF [°C]	Delta T (OF) [K]	WFP [W/m²]	1/R-Wert [(m²K)/W]	U-Wert [W/m²K]
1.10	18,97	8,59	10,38	28,11	2,71	1,88
1.5	20,57	0,04	20,53	61,81	3,01	2,05
1.4	26,2	4,96	21,24	68,98	3,26	2,21
1.3	29,81	9,37	20,44	70,47	3,44	2,34

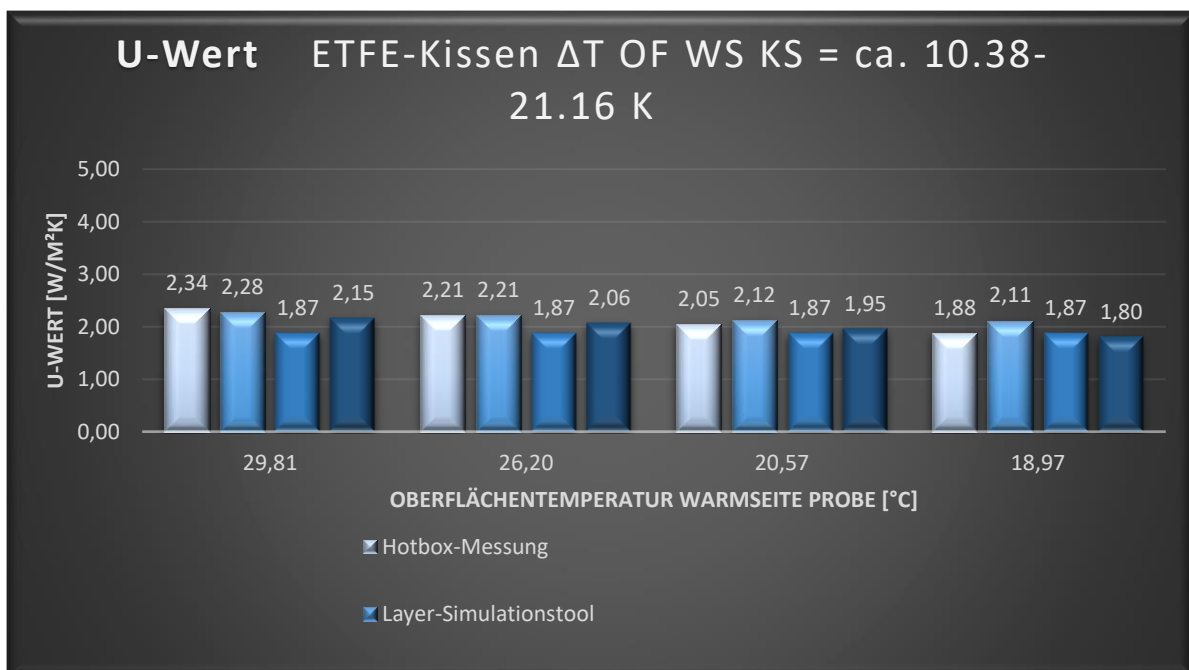


Abbildung 5.19: Zusammenfassung der U-Werte für den Versuchsaufbau ETFE-Kissen

## 5.5 Interpretation und Zusammenfassung der Ergebnisse

Erkennbar ist aus den oben erläuterten Versuchen, dass für die parallel angeordneten Gewebe- und Folienproben mit Luftschichten zwischen den Einzellagen eine große Abhängigkeit des 1/R- sowie des U-Wertes vom Temperaturniveau besteht. Der U-Wert ist bei diesen Proben keine konstante und temperaturunabhängige Größe, sondern steigt mit zunehmender Oberflächentemperatur, auch wenn die Differenz der Temperaturen der Probenoberflächen konstant gehalten werden. Dies bedeutet, dass für einen beispielhaft betrachteten Wintertag

(Außentemperatur 0 °C und Innentemperatur 20 °C) sich ein niedrigerer U-Wert ergibt als für einen beispielhaften Sommerfall (Außentemperatur 40 °C und Innentemperatur 20 °C).

## 6 Versuchsdurchführung im Dachprüfstand

Um die wärmetechnischen Kennwerte der Membranfassadenaufbauten unter instationären Bedingungen ermitteln zu können, wurden die Gebäudehüllen im direkten Austausch mit dem Außenklima im In-situ-Dachprüfstand des ILEK getestet. Ziel der Messungen mit diesem Prüfstand war die messtechnische Erfassung der außenklimaabhängigen Wärmeströme durch die Mehrlagenaufbauten unter wechselnden Wetterbedingungen. Die Untersuchungen im Dachprüfstand erfolgten an zwei- und dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionswerkstoffe sowie an zweilagigen textilen Aufbauten mit Funktionswerkstoffen (Kapitel 6.2). In Tabelle 6-1 sind alle durchgeführten Versuche und Proben zusammengestellt.

Für die U-Werte, die nach unterschiedlichen Berechnungsweisen ermittelt wurden, gilt folgende Bezeichnungssystematik:

### U-Wert nach Messdatenauswertung:

Die Berechnung der U-Werte erfolgte unter Verwendung des gemessenen Wärmestroms der Wärmeflussensoren sowie der Lufttemperaturen der Lufträume innen und außen (vgl. Kapitel 3.6).

### U-Wert nach DIN EN ISO 6946:

Die Berechnung der U-Werte erfolgte nach DIN EN ISO 6946:2018 unter Verwendung der Bemessungswerte der Wärmeübergangswiderstände (Tabelle 3-1) und der Wärmedurchlasswiderstände von ruhenden Luftschichten nach **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** (als Standardverfahren bezeichnet).

### U-Wert nach vereinfachtem Berechnungsverfahren:

Die Berechnung der U-Werte erfolgte nach DIN EN ISO 6946:2018 Anhang D (vgl. Kapitel 3.5) unter Anwendung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten sowie Oberflächentemperaturen der Membranen.

### U-Wert nach modifiziertem Berechnungsverfahren:

Die Berechnung der U-Werte erfolgte nach DIN EN ISO 6946:2018 Anhang D (vgl. Kapitel 3.5) unter Anwendung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten sowie Oberflächentemperaturen der Membranen mit einem modifizierten Ansatz zur Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten durch Strahlung [6] entsprechend dem nachfolgend dargestellten Vorgehen:

$$h_r = C_{1,2} \cdot \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (39)$$

Mit

$C_{1,2}$  Strahlungsaustauschgrad

$T_{1,2}$  Temperatur der im Strahlungsaustausch stehenden Flächen 1,2 [K]

$$C_{1,2} = \frac{\sigma}{(1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2) - 1} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4] \quad (40)$$

$\sigma$  Stefan-Boltzmann-Konstante  $5,67 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)]$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  hemisphärische Emissionsgrade der begrenzenden Fläche [W/m<sup>2</sup>]

Die oberste Membranlage eines Dachaufbaus steht im Strahlungsaustausch mit der Atmosphäre. Um diesen zu bestimmen, wird der Emissionsgrad der Atmosphäre benötigt. Dieser kann mit einer empirischen Formel in Abhängigkeit von der Lufttemperatur am Boden bestimmt werden und ergibt sich nach [7] und [25] zu

$$\varepsilon_{Atm} = 0,92 * 10^{-5} * T_{Luft}^2 \quad [-] \quad (41)$$

Tabelle 6-1: Übersicht der im Dachprüfstand untersuchten Aufbauten [11] (HP: Heizplatte; 100 %  $\triangleq$  max. Heizleistung; 25 %  $\triangleq$  25 % Heizleistung)

Aufbau 1.0	Messnummer	Auswertungsnummer	Messtag	Uhrzeit	Leistung Heizplatte
2 lagig	1	1.0.1.1	26.07.17	0:00-6:00	100 % HP
PES-PVC Typ III / Verseidag / Typ B4915 Luftschicht: 1 x 25 mm	2	1.0.2.1	28.07.17	0:00-6:00	100 % HP
<b>Aufbau 2.1</b>					
3 lagig	1	2.1.1.1	15.02.17	5:00-6:40	100 % HP
PES-PVC Typ III / Verseidag / Typ B4915			15.-16.2.17	16:00	25 % HP
Luftschicht: 2 x 85 mm	2	2.1.3.1	18.02.17	18:00-22:00	100 % HP
<b>Aufbau 2.2</b>					
3 lagig	1	2.2.1.1	11.03.17	3:45-6:45	100 % HP
PES-PVC Typ III / Verseidag / Typ B1915	Auswertung	2.2.1.2	12.03.17	4:45-6:45	
Luftschicht: 2 x 85 mm	Auswertung	2.2.1.3	12.03.17	15:45-18:45	
	2	2.2.2.1	14.03.17	3:00-6:00	25 % HP
	Auswertung	2.2.2.2	16.03.17	13:00-16:00	
	3	2.2.3.1	23.03.17 19:00	24.03.17 6:00	100 % HP
	Auswertung	2.2.3.2	24.03.17	1:00- 4:00	
	Auswertung	2.2.3.3	24.03.17	11:00- 14:00	
			29.-31.03.17	14:30	25 % HP
<b>Aufbau 3.1</b>					
3 lagig	1	3.1.1.1	08.02.17 23:30	9.2 2:30	100 % HP
Glas-PTFE Typ II / Verseidag / B18089		3.1.1.2	09.02.17	6:30- 9:30	
Luftschicht: 2 x 85 mm	2	3.1.2.1	10.02.17	0:00- 3:00	100 % HP
		3.1.2.2	10.02.17	10:00- 13:00	
	3	3.1.3.1	12.02.17	8:00- 10:45	25 % HP
		3.1.3.2	13.02.17	2:30- 5:30	
	4	3.1.4.1	14.2	5:00- 7:00	100 % HP
<b>Aufbau 4.0</b>					

2 lagig mit Funktionsmaterial	1	4.0.1.1	21.04.17 23:00	22.4 6:00	100 % HP
PES-PVC Typ III / Verseidag / B1915	2	4.0.2.1	25.04.17	6:00- 13:00	100 % HP
Zwischenlage: 160 mm Wabenstruktur (Wacotech TI-Max CA 40-FR)	3	4.0.3.1	10.05.17	14:00- 18:00	25 % HP
	4	4.0.4.1	16.05.17 22:00	15.5 5:00	100 % HP
	5	4.0.5.1	18.05.17	10:00- 12:00	25 % HP
	6	4.0.6.1	24.05.17 20:30	25.5 5:30	100 % HP
	7	4.0.7.1	27.05.17	8:00- 12:00	25 % HP
<b>Aufbau 4.1</b>					
PES-PVC Typ III / Verseidag / B1915	1	4.1.1.1	13.07.17 11:00	14.07.17 8:30	100 % HP
Zwischenlage: 160 mm Wabenstruktur (Wacotech TI-Max CA 40-FR)	2	4.1.2.1	17.07.17 10:00	18.07.17 11:30	25 % HP
	3	4.1.3.1	20.07.17 20:30	21.07.17 8:00	100 % HP
<b>Aufbau 5.0</b>					
2 lagig mit Funktionsmaterial	1	5.0.1.1	23.08.17	7:00- 14:00	100 % HP
PES-PVC Typ III / Verseidag / B1915	2	5.0.2.1	25.08.17	5:00- 8:00	25 % HP
Zwischenlage: 160 mm Glasfasergespinnst (TIMax GL-Plus)	3	15:00	28.-30.08.17	8:00	25 % HP
	4	5.0.4.1	05.09.17	0:00- 6:00	100 % HP
	5	5.0.5.1	21.09.17	0:00- 5:00	100 % HP
		5.0.5.2	21.09.17	10:00- 13:00	
	6	5.0.6.1	24.09.17	19:00- 24:00	25 % HP

Aus dem umfangreichen Messprogramm werden nachfolgend zwei Versuche ausführlich vorgestellt. Es handelt sich dabei um die Messung 2.1.3.1 am dreilagigen PES-PVC-Membranaufbau mit zwei Luftschichten und einer Dicke von 85 mm sowie um die Messung 4.0.1.1 am zweilagigen PES-PVC-Membranaufbau mit einer 160 mm dicken Wabenstruktur zwischen den Membranen.





Abbildung 6.1: Dachprüfstand, Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart [11]

### 6.1 Dreilagiger textiler Aufbau mit Luftzwischenräumen

Der Lagenaufbau sowie die Positionen der Sensoren sind in Abbildung 6.2 dargestellt. Je Membranlage wurden zwei Thermoelmente an der Ober- und Unterseite der Membrane angebracht. Damit die Position der einzelnen Thermoelmente sichergestellt werden konnte, wurden diese mit der Membrane vernäht. Zusätzlich befanden sich zwei Thermoelmente an der Heizplatte sowie zur Messung der Innenlufttemperatur ein weiteres Thermoelement im Luftraum zwischen der Heizplatte und der unteren Membranlage. Bei diesem Aufbau wurden zwei Wärmeflussplatten verwendet: eine wurde an der Oberseite der untersten Lage, die andere auf der unteren Seite der oberen Membranlage angebracht. Der Dachversuchsstand ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

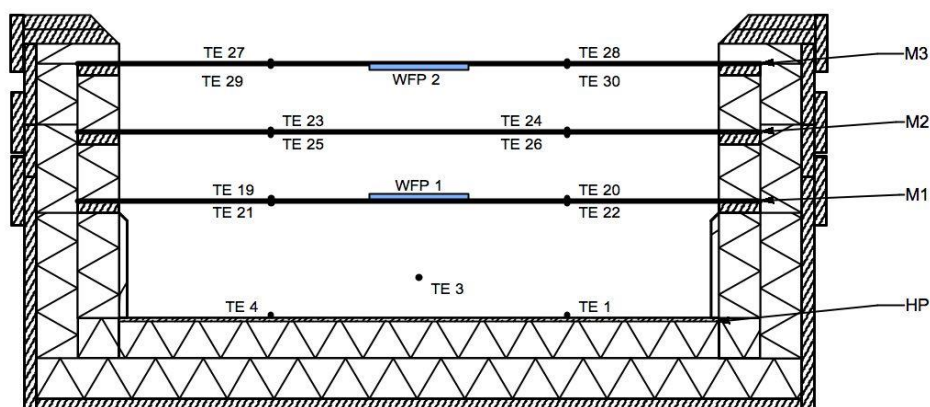


Abbildung 6.2: Schnitt durch den Dachprüfstand mit einem dreilagigen Aufbau ohne Funktionsmaterialien [11]

## 6.1.1 Darstellung der Messergebnisse

Nachfolgend dargestellt sind die Grafen der Messdaten für die Auswertungsnummer 2.1.3.1. nach Tabelle 6-1. Abbildung 6.10 zeigt die Verläufe der Wärmedurchgangskoeffizienten, ermittelt nach den unterschiedlichen, oben beschriebenen Verfahren. Für die Berechnung des messwertbasierten Wärmedurchgangskoeffizienten kam der Messwert des Wärmestroms der Wärmeflussplatte WP1 zum Ansatz. Es fällt auf, dass dieser dynamische Wärmedurchgangskoeffizient teilweise erheblich von den errechneten Werten abweicht. Hierbei spielt es keine Rolle, nach welchem der Verfahren dieser ermittelt wurde. Es besteht eine große Korrelation des dynamischen Wärmedurchgangskoeffizienten mit dem Bewölkungszustand. So ist beispielsweise ab ca. 20:00 Uhr am 18.2. eine deutliche Abnahme der Bewölkung festzustellen, welche zu einer deutlichen Vergrößerung des dynamischen Wärmedurchgangskoeffizienten führt (vgl. Abbildung 6.3 und Abbildung 6.6). Ursache hierfür dürfte die mit der Bewölkungsabnahme verbundene geringere Wärmerückstrahlung vom „kalten, klaren“ Himmel auf die obere Membranlage und damit verbunden der größere Wärmestrom nach außen sein. Während der U-Wert nach DIN EN ISO 6946 für den untersuchten Aufbau bei  $U=2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  liegt, steigt der aus den Messwerten bestimmte dynamische U-Wert auf bis zu  $U=3,55 \text{ W/m}^2\text{K}$  an und liegt damit deutlich höher.

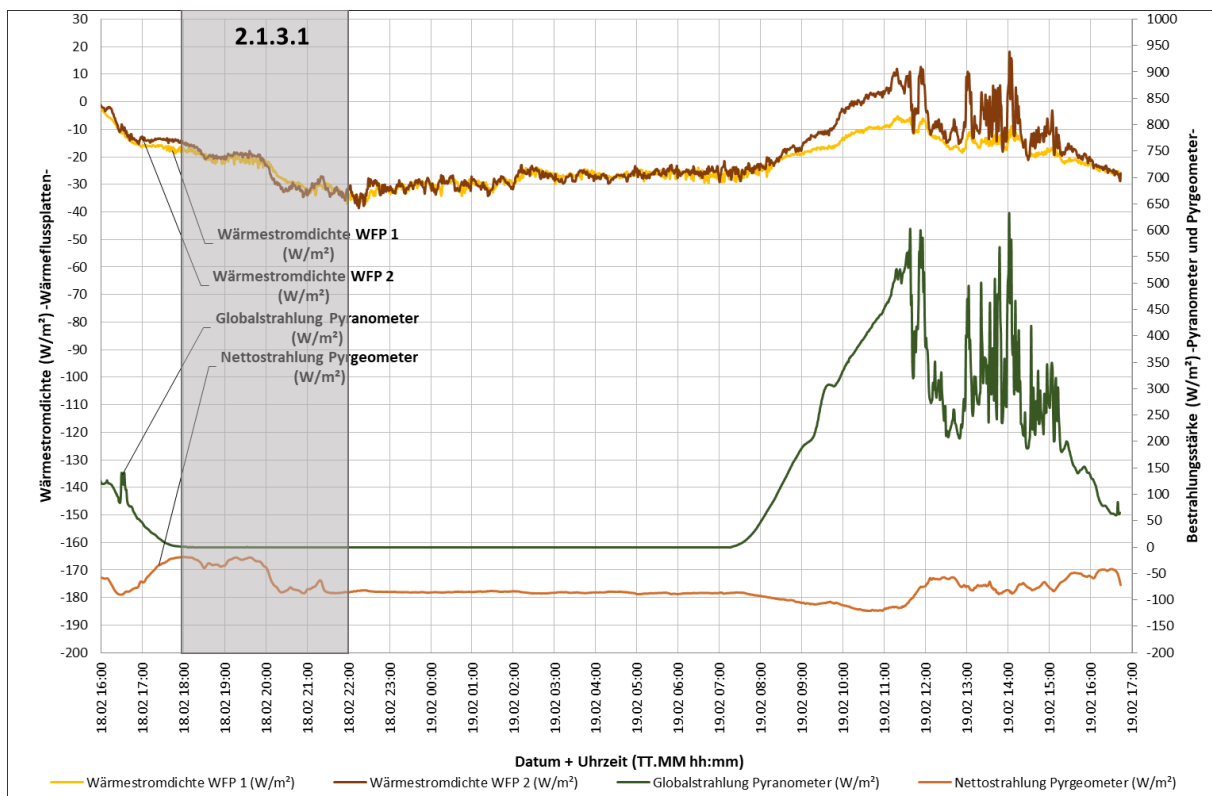


Abbildung 6.3: Wärmestromdichtenverlauf, Auswertung 2.1.3.1, dreilagig ohne Funktionsmaterialien [11]

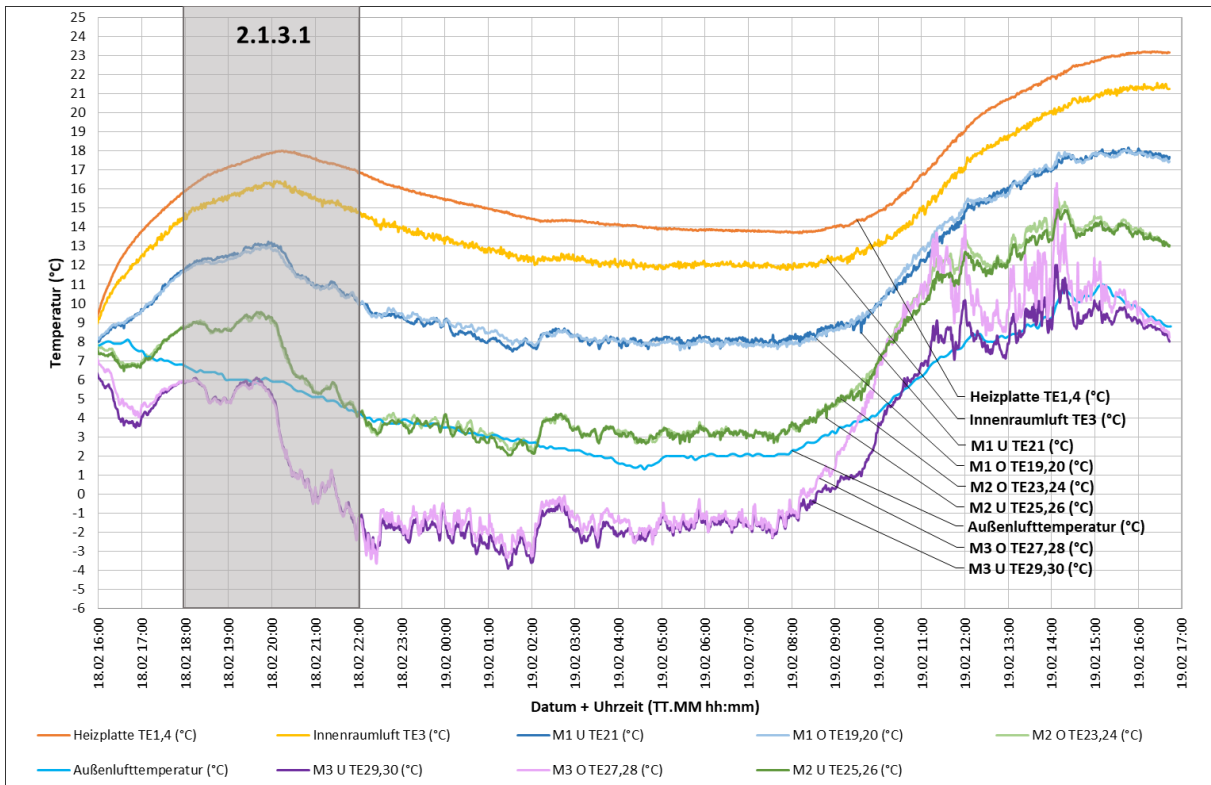


Abbildung 6.4: Temperaturverlauf, Auswertung 2.1.3.1, dreilagig ohne Funktionsmaterialien [11]

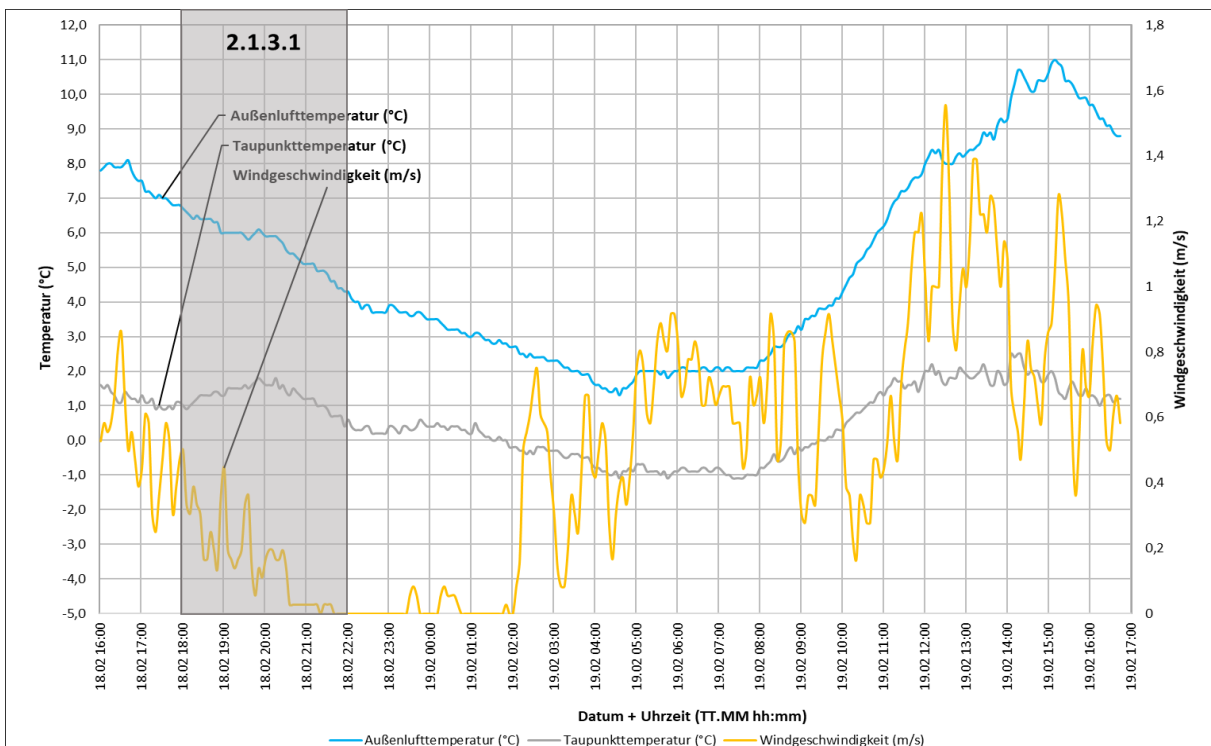


Abbildung 6.5: Verlauf der klimatischen Bedingungen, Auswertung 2.1.3.1, dreilagig ohne Funktionsmaterialien [11]

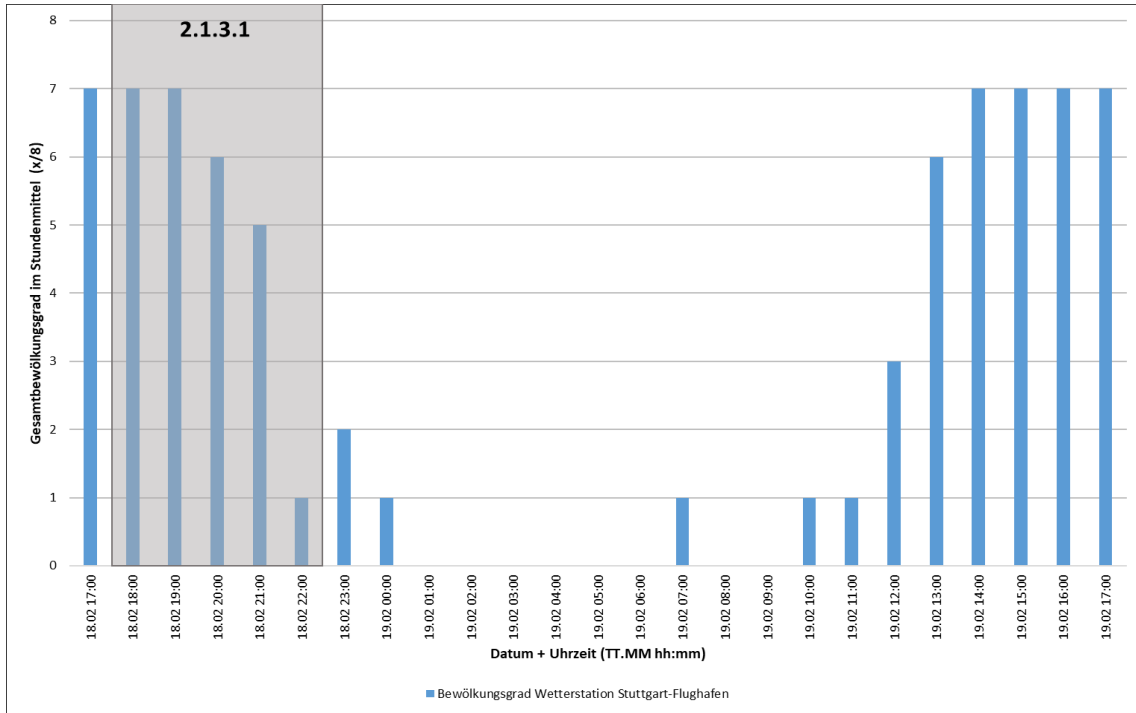


Abbildung 6.6: Verlauf des Bewölkungsgrades Wetterstation Stuttgart-Flughafen, Auswertung 2.1.3.1, dreilagig ohne Funktionsmaterialien [11]

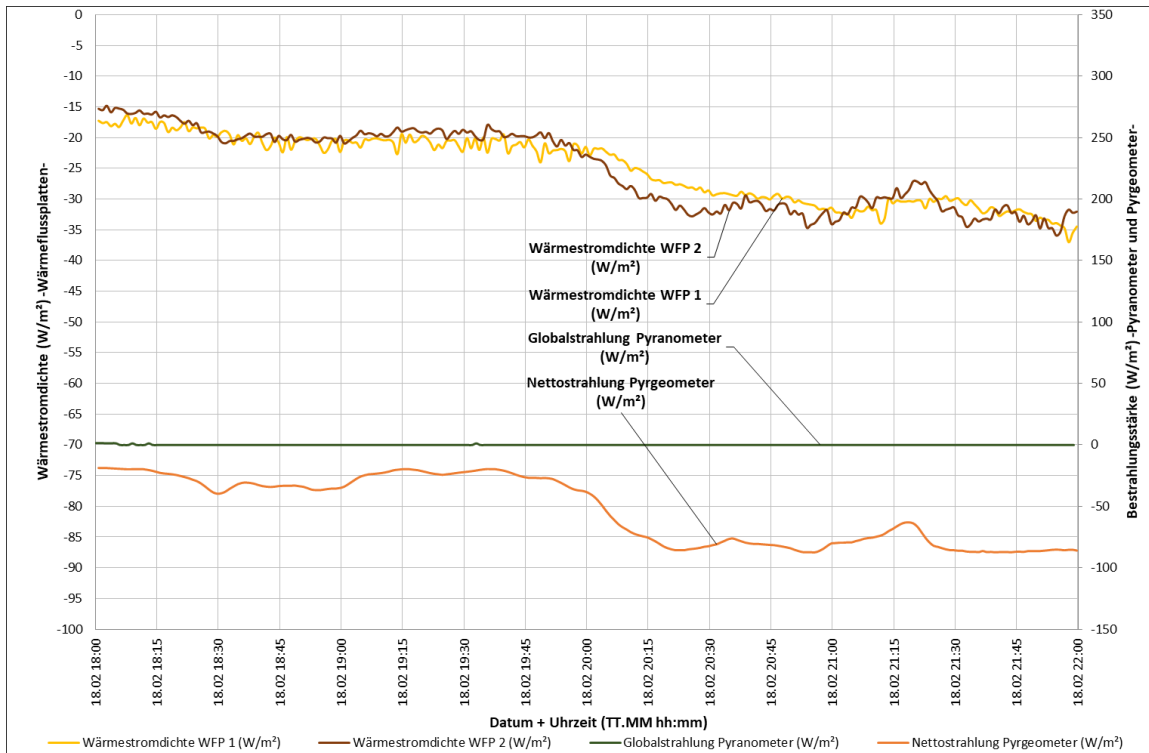


Abbildung 6.7: Auswertung 2.1.3.1 18.02. 18:00-22:00, Verlauf der Wärmestromdichten [11]

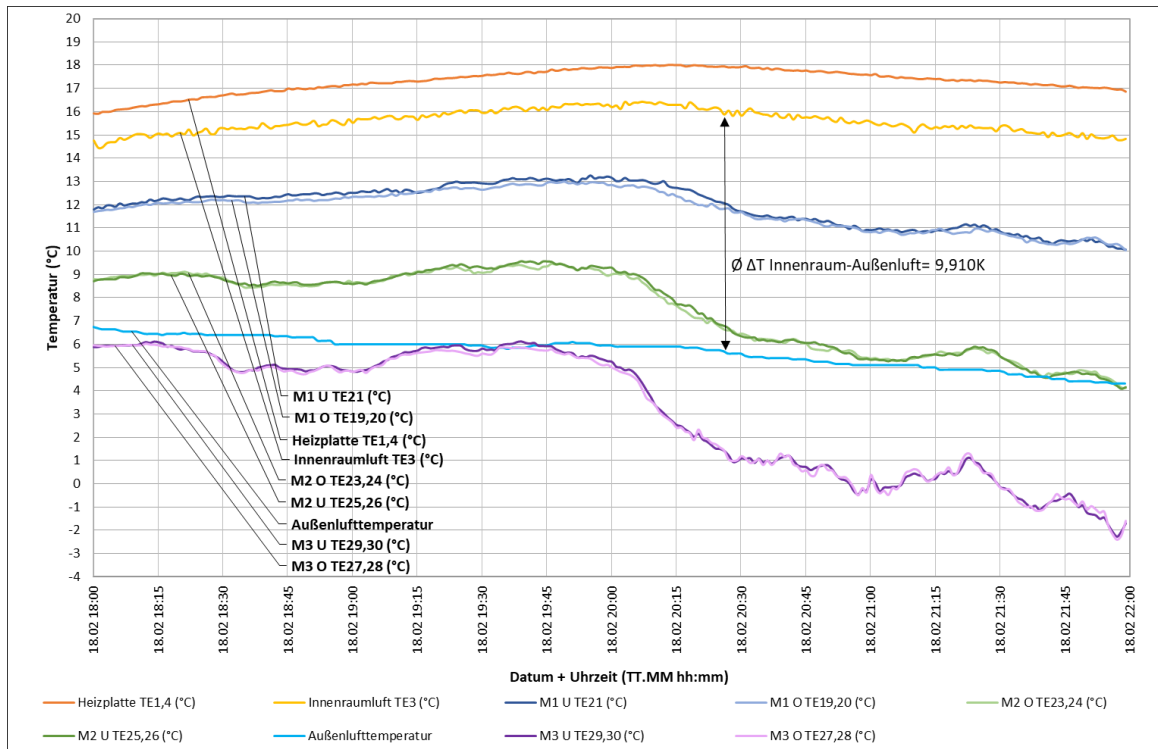


Abbildung 6.8: Auswertung 2.1.3.1 18.02. 18:00-22:00, Verlauf der Temperaturen [11]

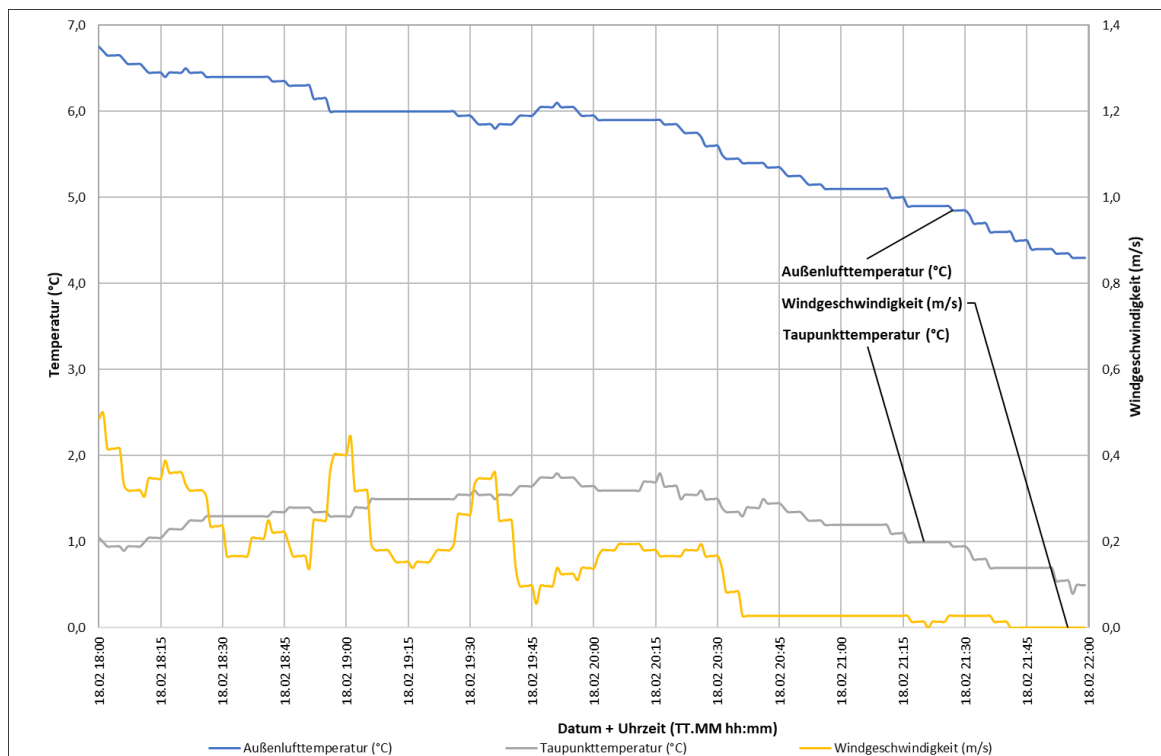


Abbildung 6.9: Auswertung 2.1.3.1 18.02. 18:00-22:00, Verlauf der klimatischen Bedingungen [11]

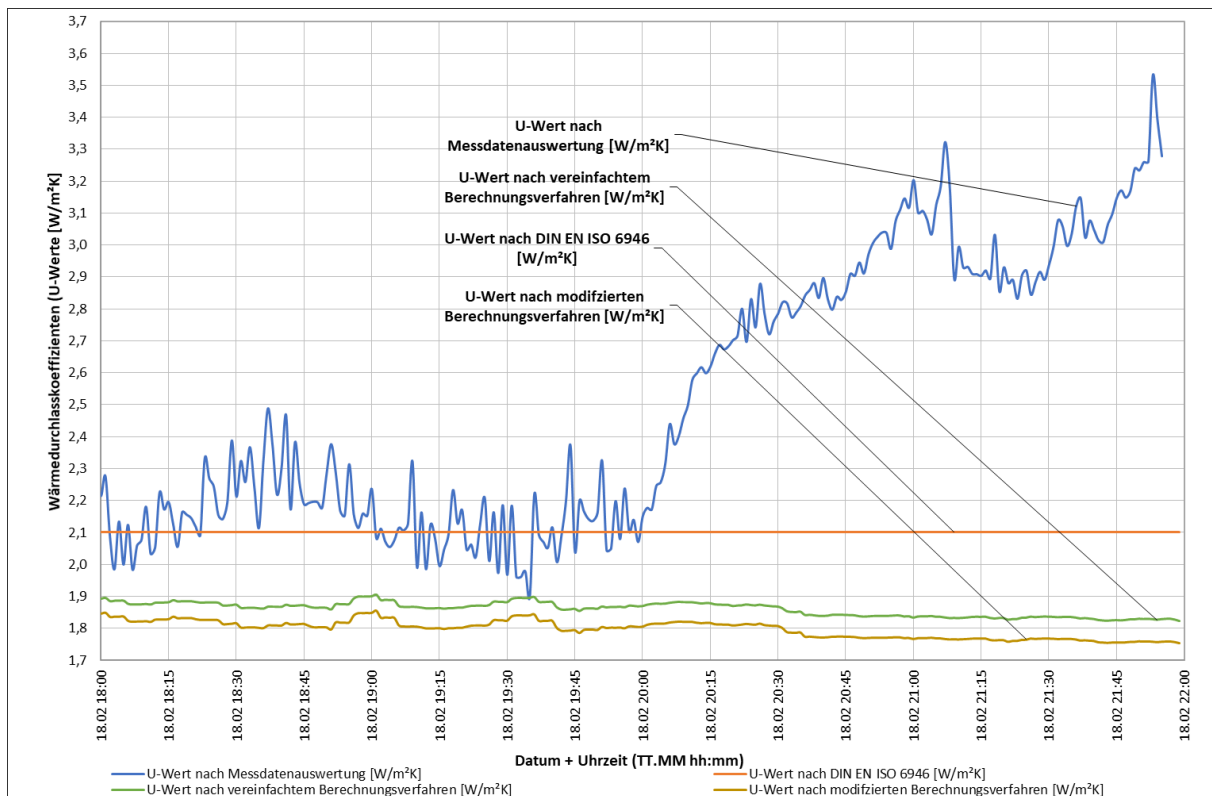


Abbildung 6.10: Auswertung 2.1.3.1 18.02. 18:00-22:00, Verlauf der U-Werte [11]

## 6.2 Zweilagiger textiler Aufbau mit Funktionsmaterialien

Der Lagenaufbau sowie die Positionen der Sensoren sind in Abbildung 6.11 dargestellt. Je Membranlage wurden zwei Thermoelemente an der Ober- und Unterseite der Membrane angebracht. Damit die Position der einzelnen Thermoelemente sichergestellt werden konnte, wurden diese mit der Membrane vernäht. Zusätzlich befanden sich zwei Thermoelemente an der Heizplatte sowie zur Messung der Innenlufttemperatur ein weiteres Thermoelement im Luftraum zwischen der Heizplatte und der unteren Membranlage. Bei diesem Aufbau wurden wiederum zwei Wärmeflussplatten verwendet: eine wurde an der Oberseite der untersten Lage, die andere auf der unteren Seite der oberen Membranlage angebracht. In Abbildung 6.12 ist die obere Membranlage sowie die Wabenstruktur vor dem Schließen des Messkastens zu sehen.



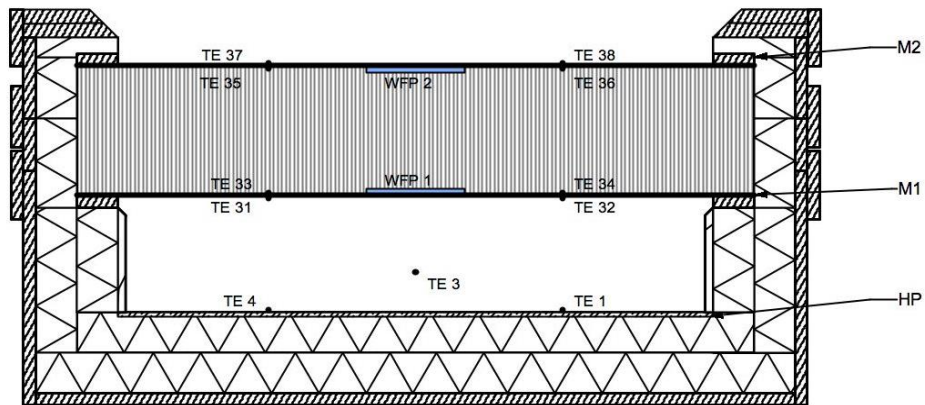


Abbildung 6.11: Schnitt durch den Dachprüfstand mit einem zweilagigen Aufbau mit Funktionsmaterial [11]

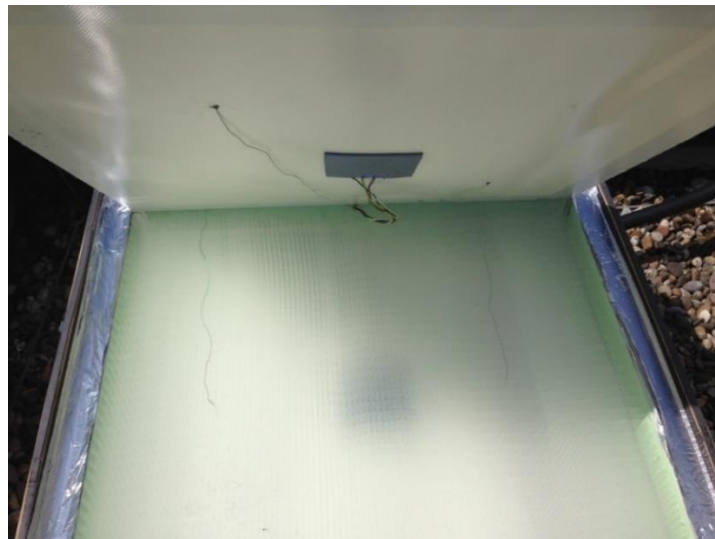


Abbildung 6.12: Geöffneter Dachprüfstand bei Versuchsaufbau 4 [11]

### 6.2.1 Darstellung der Messergebnisse

Nachfolgend dargestellt sind die Grafen der Messdaten für die Auswertungsnummer 4.0.1.1. nach Tabelle 6-1. Abbildung 6.20 zeigt den Verlauf des messwertbasierten, dynamischen Wärmedurchgangskoeffizienten. Für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten kam der Messwert des Wärmestroms der Wärme fluxplatte WP1 zum Ansatz. Es fällt auf, dass wiederum eine große Korrelation des Verlaufs des Wertes für den Wärmedurchgang mit dem Bewölkungszustand besteht. So ist beispielsweise ab ca. 01:30 Uhr am 22.4. eine deutliche Zunahme der Bewölkung festzustellen, welche zu einer deutlichen Verringerung des Wärmedurchgangskoeffizienten führt. Ursache hierfür dürfte die mit der Bewölkungszunahme verbundene größere Wärmerückstrahlung vom Himmel auf die obere Membrananlage und damit verbunden der geringere Wärmestrom nach außen sein.

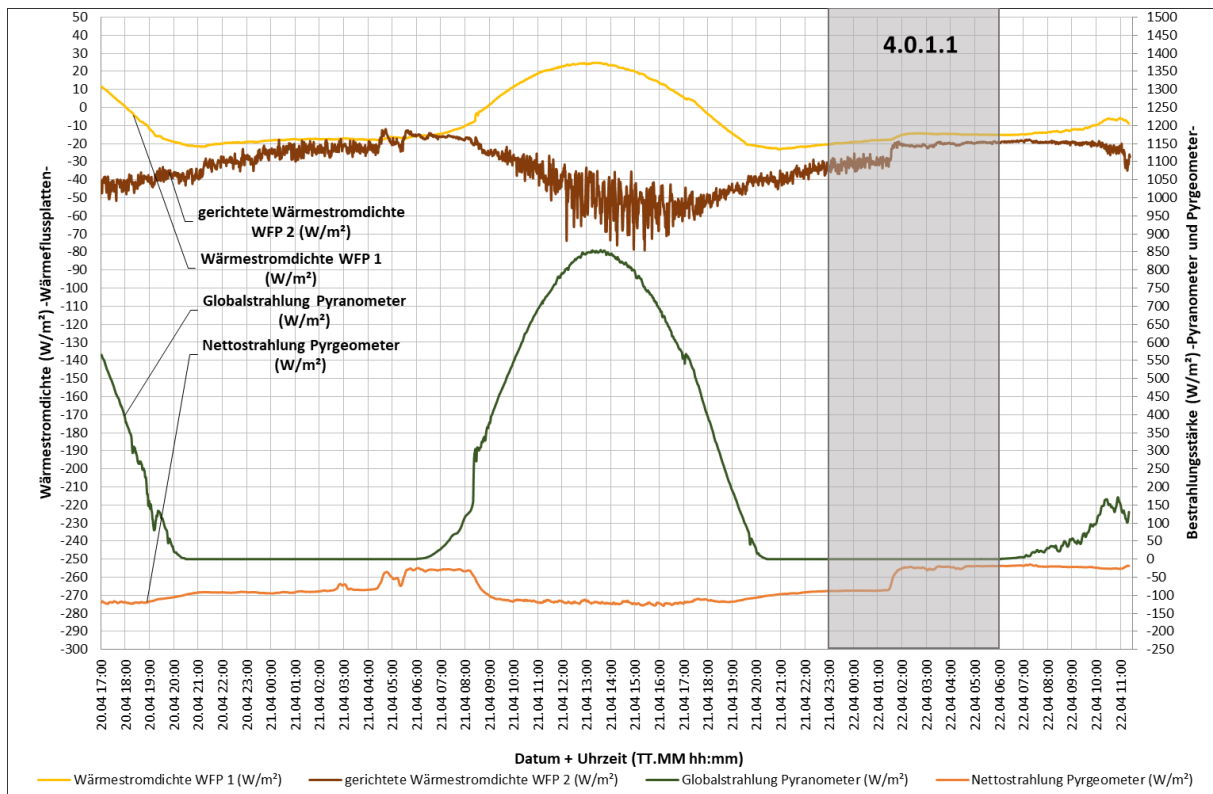


Abbildung 6.13: Verlauf der Wärmestromdichten [11]

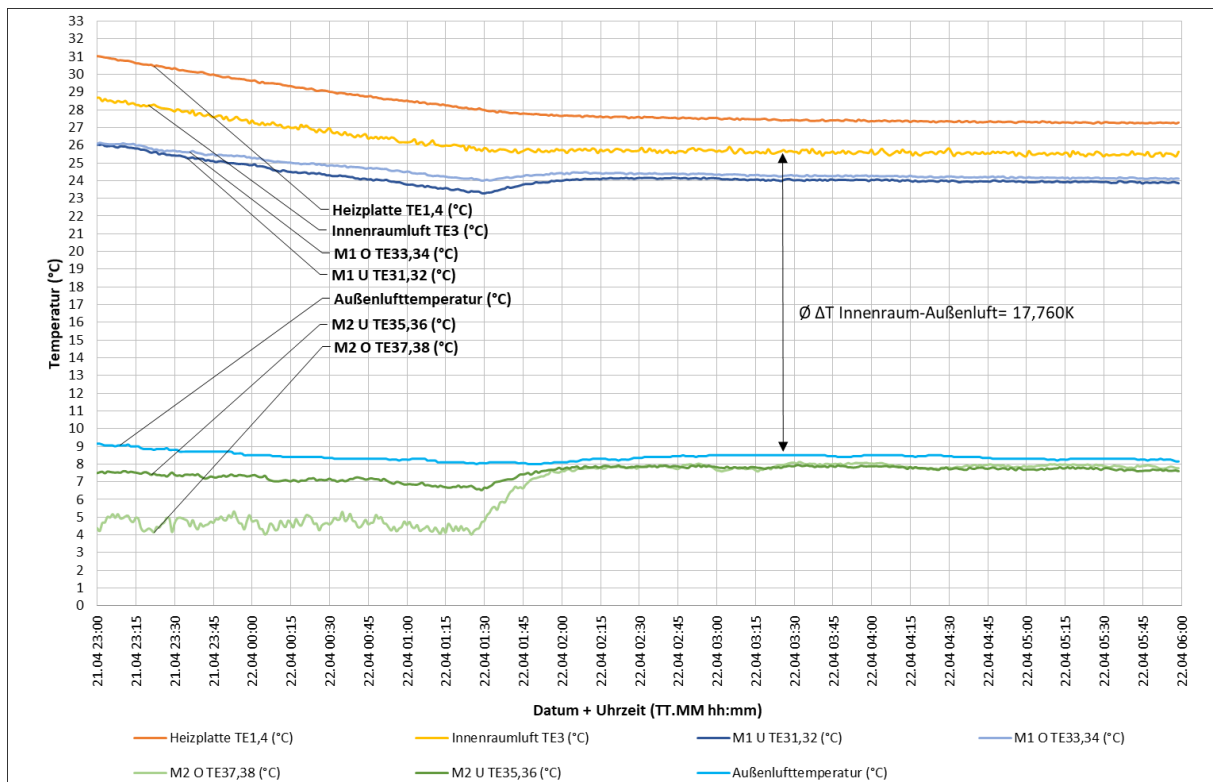


Abbildung 6.14: Verlauf der Temperaturen [11]



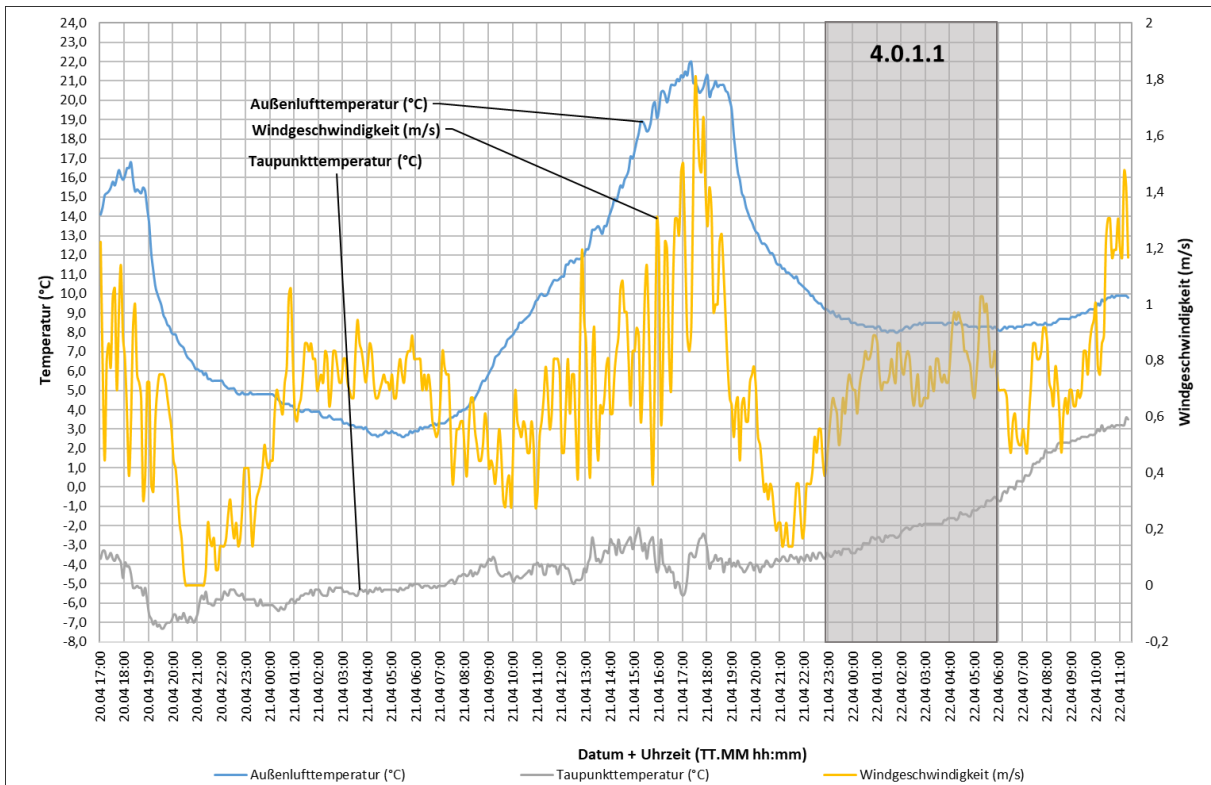


Abbildung 6.15: Verlauf der klimatischen Bedingungen [11]

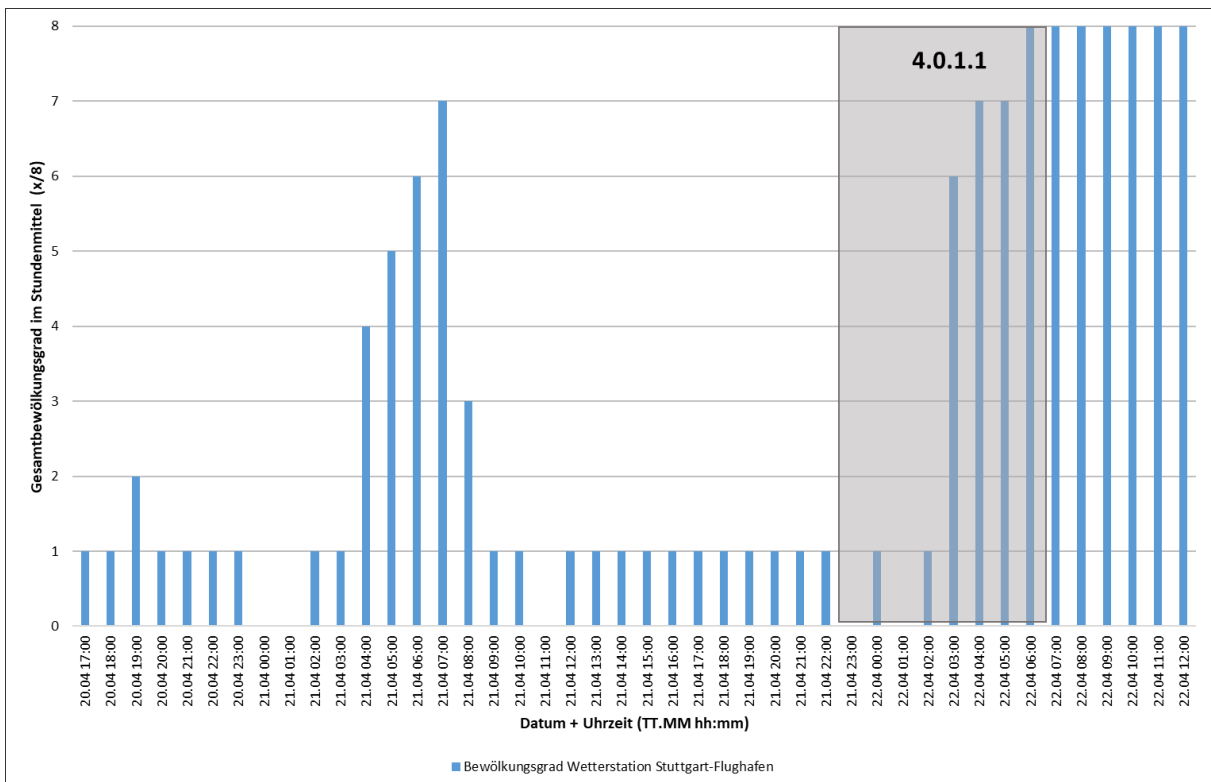


Abbildung 6.16: Verlauf des Bewölkungsgrades Wetterstation Stuttgart-Flughafen [11]

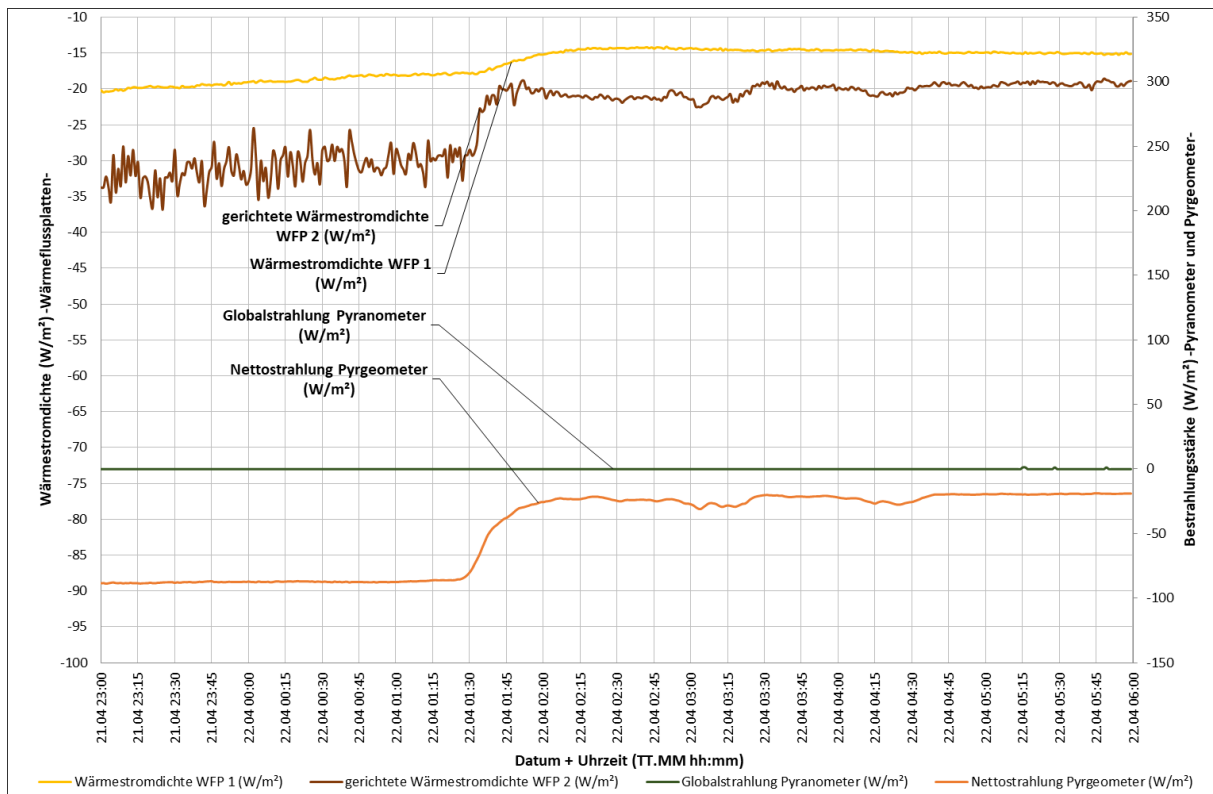


Abbildung 6.17: Auswertung 4.0.1.1 21.04 23:00-22.04 6:00 Verlauf der Wärmestromdichten [11]

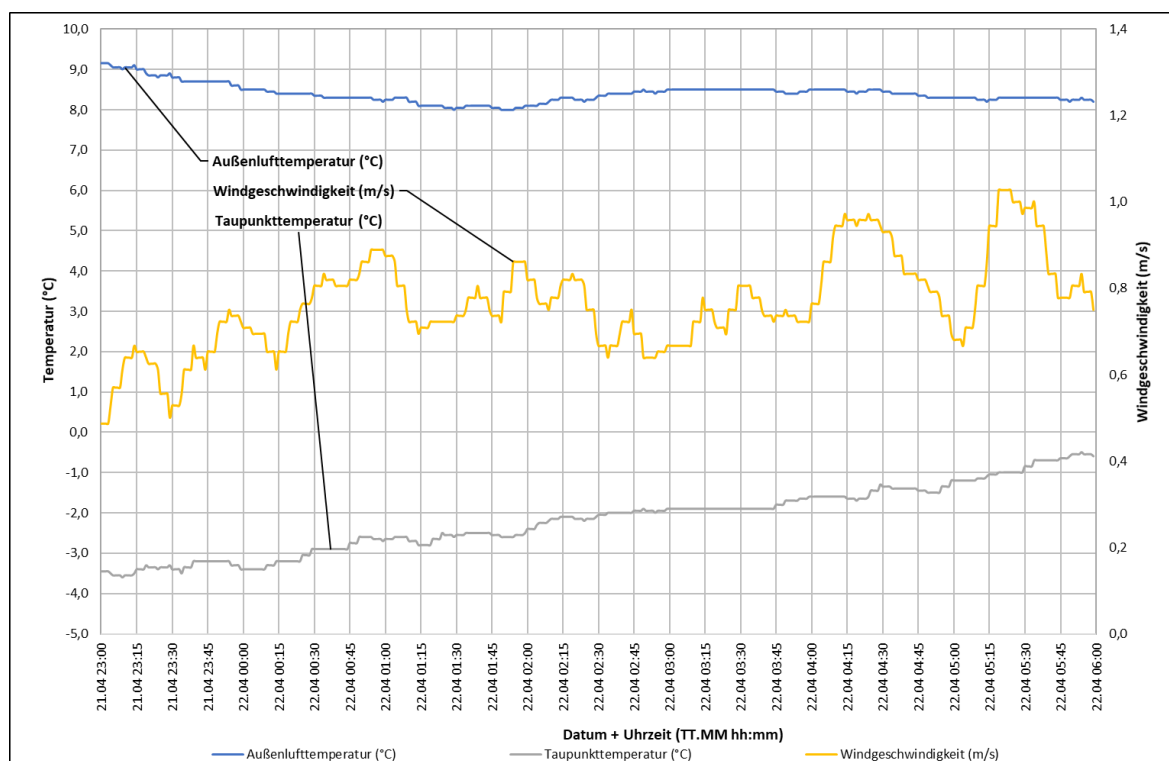


Abbildung 6.18: Auswertung 4.0.1.1 21.04 23:00-22.04 6:00 Verlauf der Temperaturen [11]

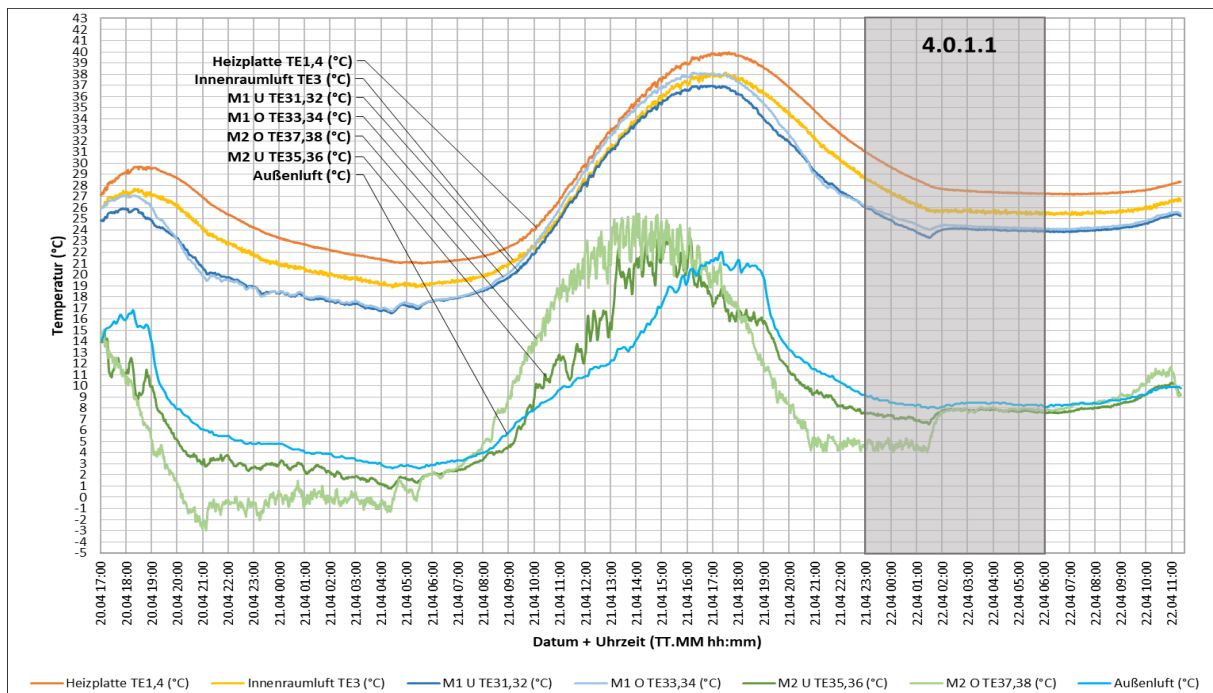


Abbildung 6.19: Auswertung 4.0.1.1 21.04 23:00-22.04 6:00 Verlauf der klimatischen Bedingungen [11]

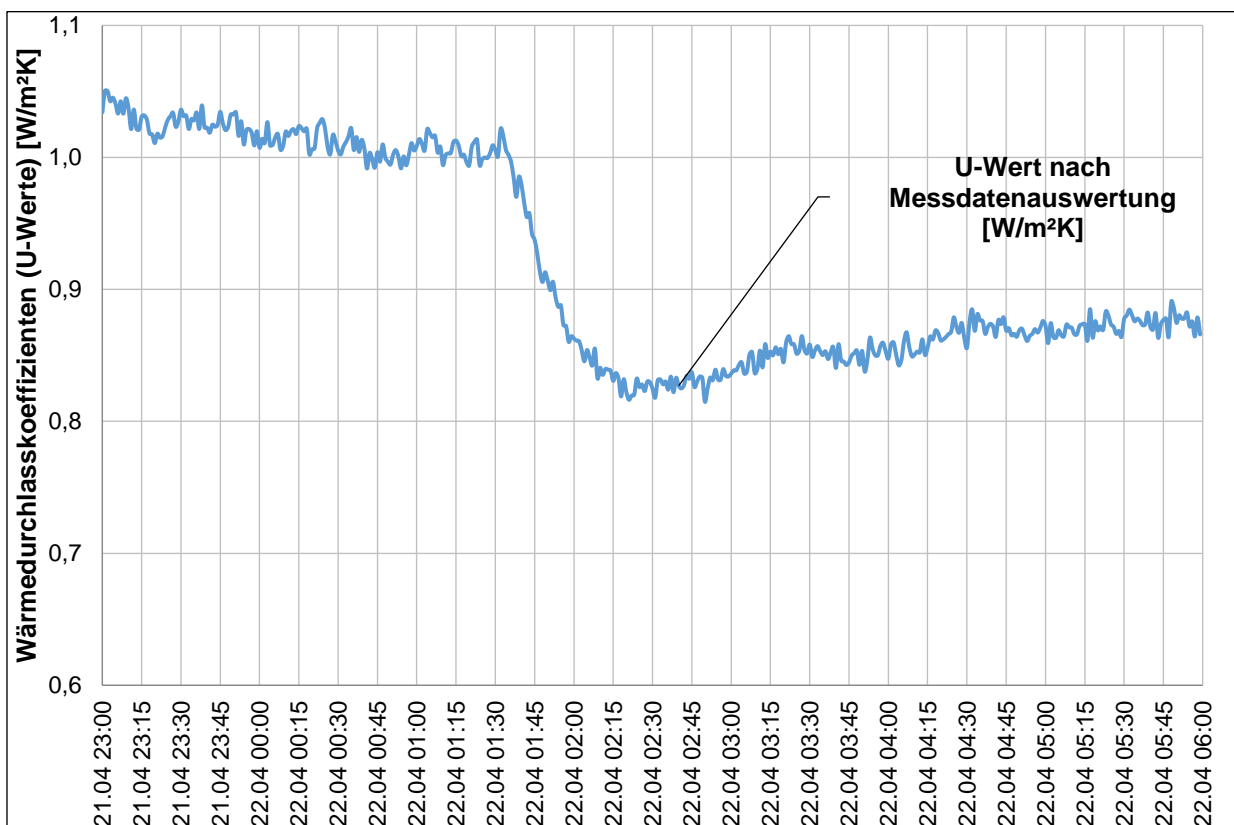


Abbildung 6.20: Auswertung 4.0.1.1 21.04 23:00-22.04 6:00 Verlauf des U-Wertes [11]

## 7 Versuchsdurchführung im Aktivhaus B10

Wärmestrommessungen unter unterschiedlichen Witterungsbedingungen konnten auch an dem in Kapitel 4.3 beschriebenen Forschungsgebäude Aktivhaus B10 (Standort: Bruckmannweg 10, 70191 Stuttgart) durchgeführt werden. Sie bezogen sich sowohl auf die Vakuumverglasung als auch auf die Profilsysteme und erstreckten sich über zwei Zeiträume von ungefähr vier Wochen im Winter (Ende Dezember 2016 bis Ende Januar 2017) sowie von ca. zwei Wochen im Sommer (Juni 2016). Im Winter konnten bei der Ermittlung der dynamischen U-Werte auch besonders kalte Tage mit niedrigen Außentemperaturen berücksichtigt werden. Auf der Basis des gemessenen Wärmestroms der Wärmeflussplatten sowie der Oberflächentemperaturen der beiden Glas- bzw. Profilsseiten konnte der Wärmedurchlasswiderstand für die Verglasung sowie für das Profil ermittelt werden. Die Wärmeübergangswiderstände auf der Außen- sowie auf der Innenseite wurden bestimmt nach Anhang C der DIN EN ISO 6946 unter Verwendung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit für außen und innen und der mittleren thermodynamischen Temperatur der Oberflächen und der Umgebung.

### 7.1 Winter-Intervall 1

Das erste Messintervall im Winter erstreckte sich vom 21.12.2016 bis zum 30.12.2016. Zur Ermittlung der Wärmedurchgangswerte für die Verglasungen sowie für die Rahmen unter näherungsweise stationären Bedingungen wurde der Zeitraum vom 24.12.2016, 23:00 Uhr bis zum 25.12.2016, 1:00 Uhr gewählt. Für diesen Zeitraum konnten für die Verglasung 1 ein Wärmedurchgangswert von  $0,52 \text{ W/m}^2\text{K}$  und für die Verglasung 2 ein Wert von  $0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$  ermittelt werden. Der Hersteller gibt einen U-Wert von  $0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$  an. Der Wärmedurchgangswert für den Rahmen 1 (Sky-Frame) betrug  $1,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ , der für den Rahmen 2 ermittelte Wert lag bei  $1,44 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

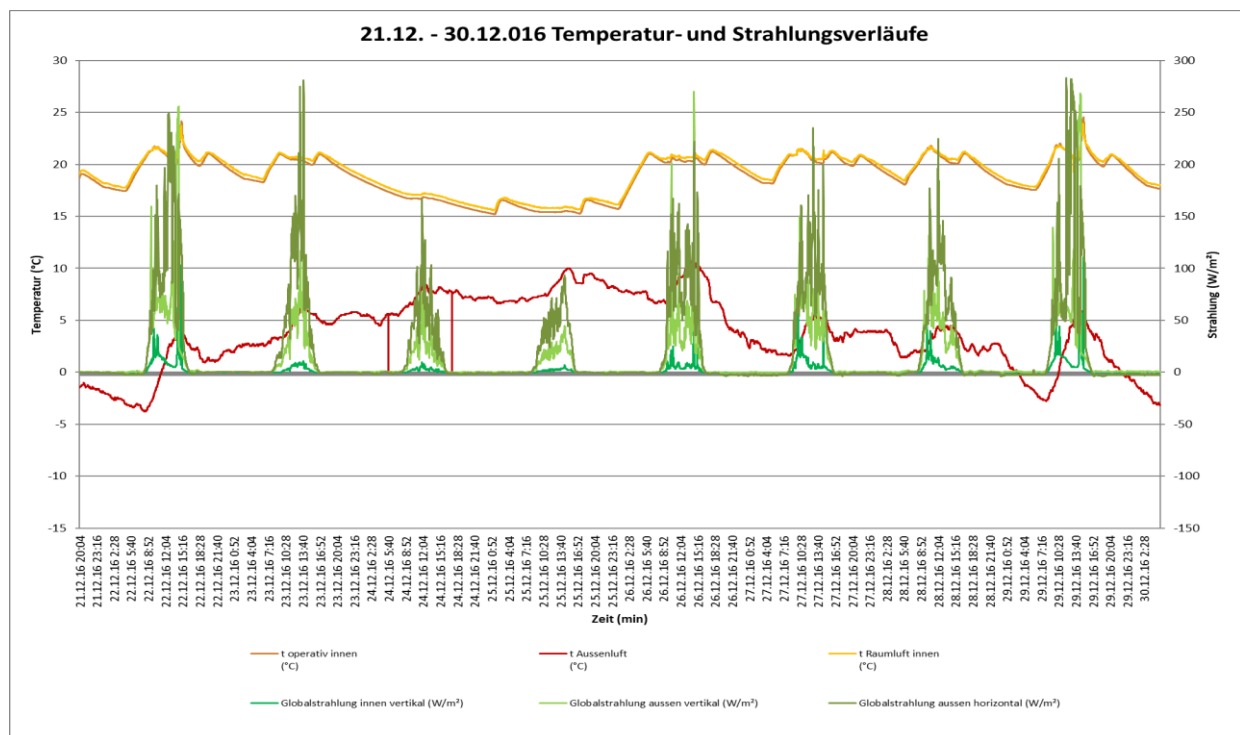


Abbildung 7.1: Temperatur- und Strahlungsverläufe 21.12.-30.12.2016

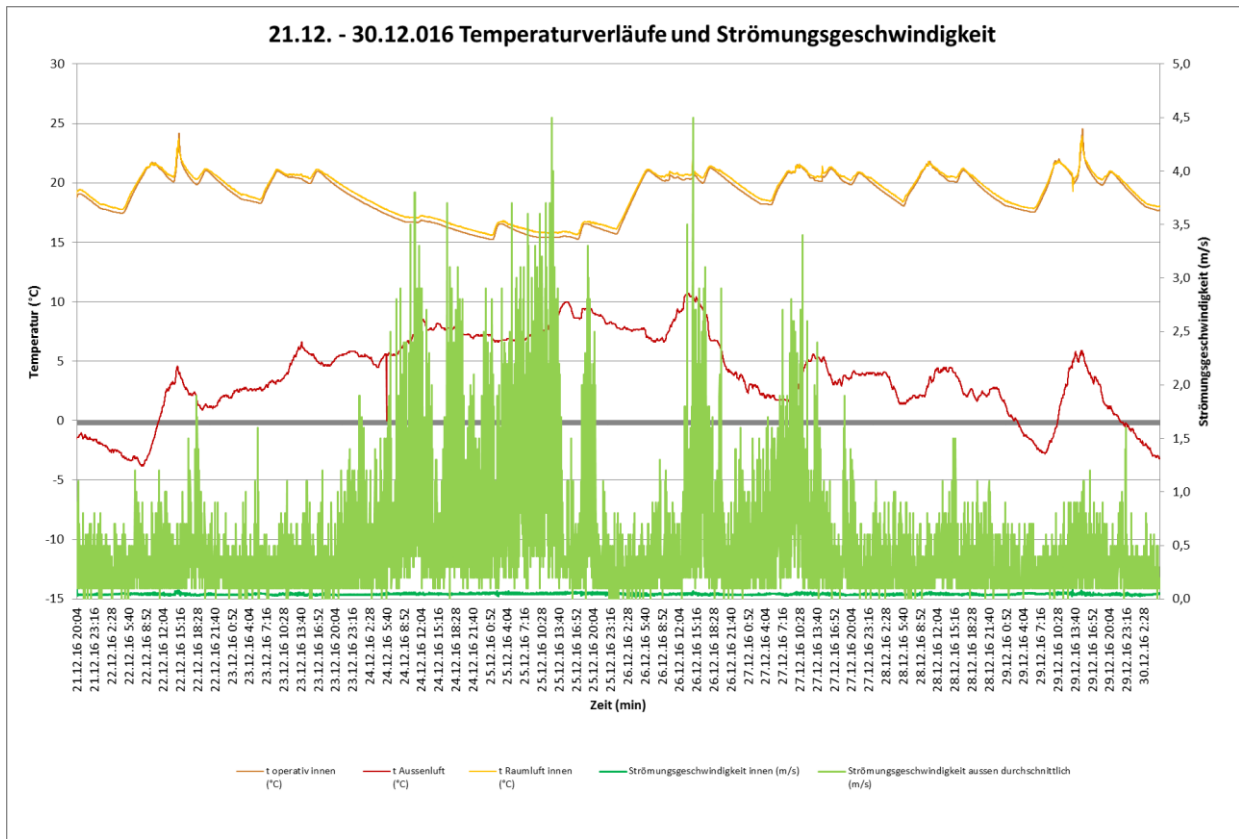


Abbildung 7.2: 21.12.-30.12.2016 Temperaturverläufe und Strömungsgeschwindigkeiten

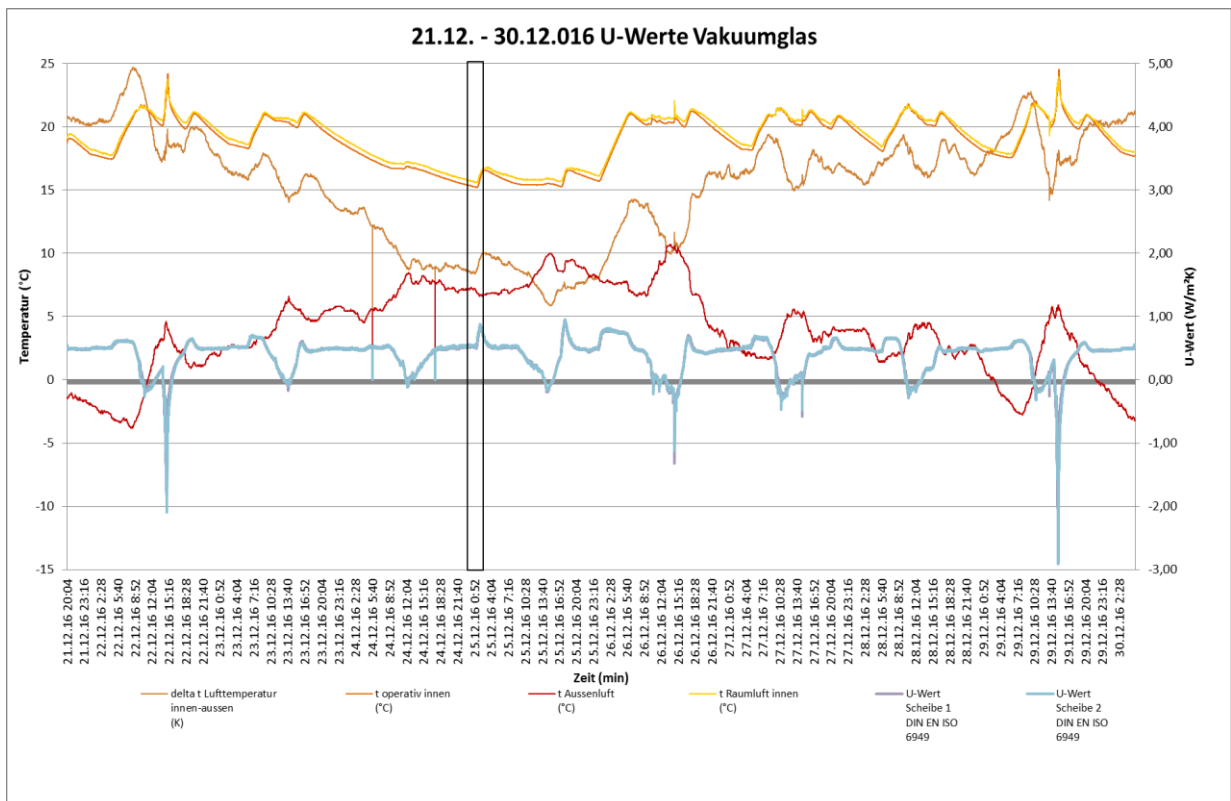


Abbildung 7.3: U-Werte Vakuumglas 21.12.-30.12.2016

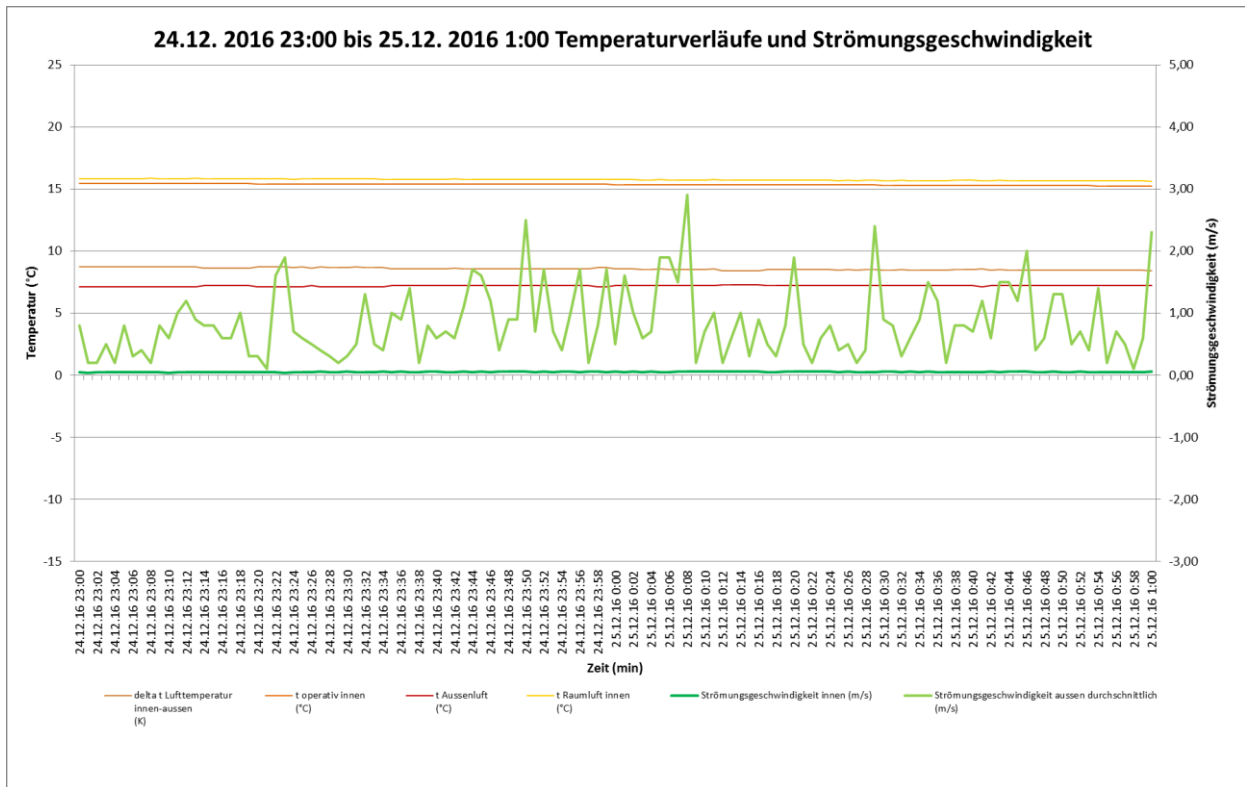


Abbildung 7.4: 24.12.2016 23:00 bis 25.12.2016 1:00 Temperaturverläufe und Strömungsgeschwindigkeiten

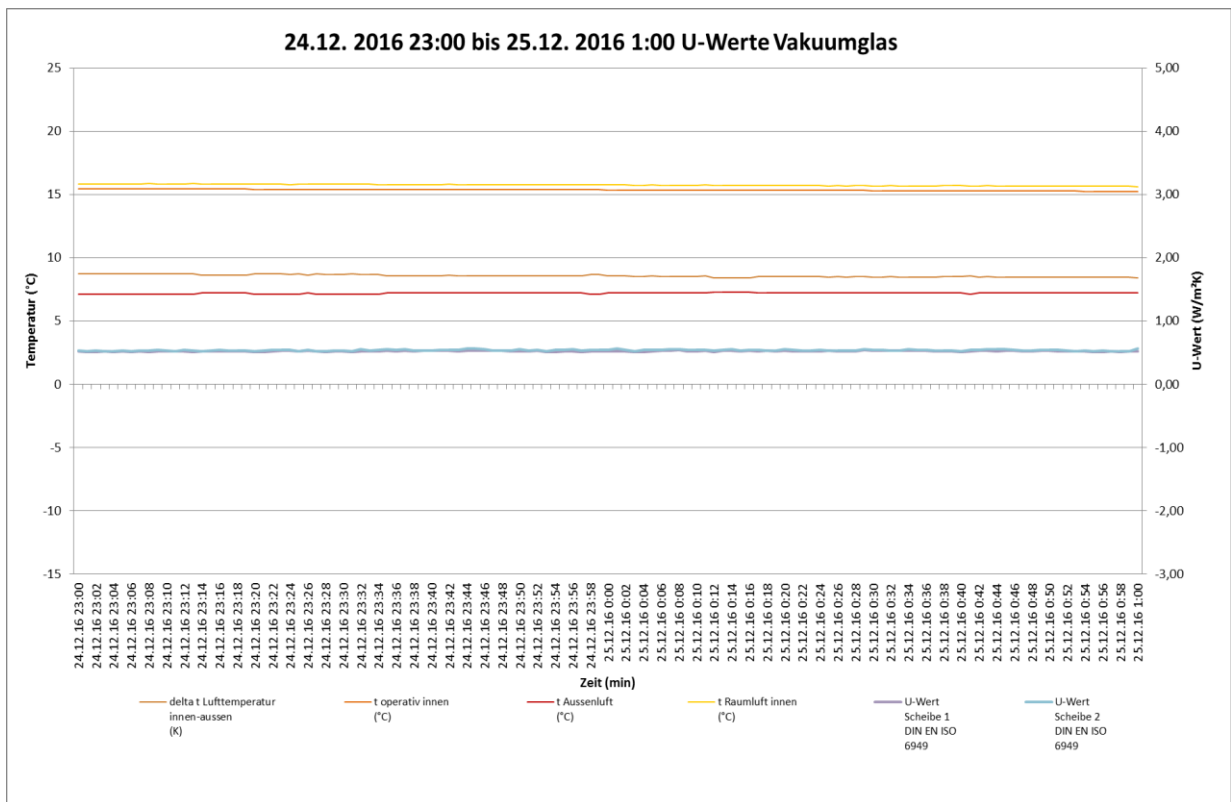


Abbildung 7.5: U-Werte Vakuumglas 24.12.2016 23:00 bis 25.12.2016 1:00

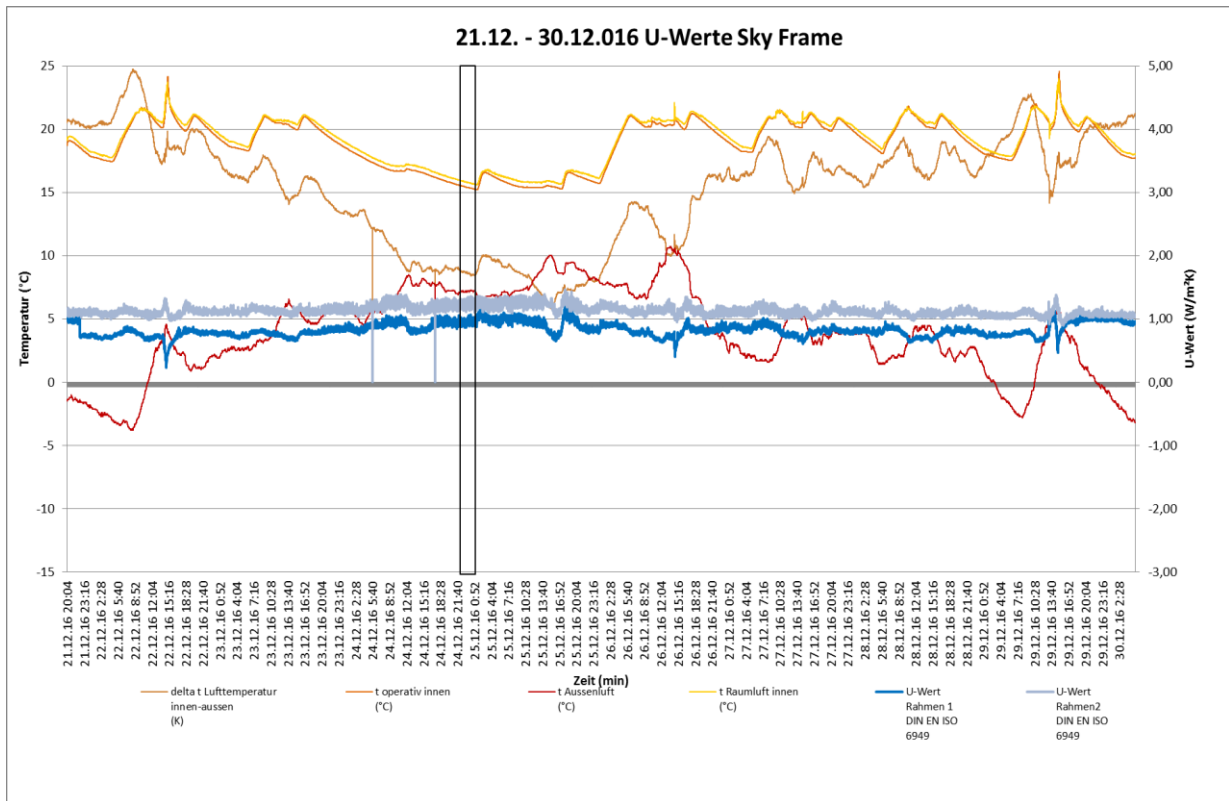


Abbildung 7.6: U-Werte Sky-Frame 21.12.-30.12.2016

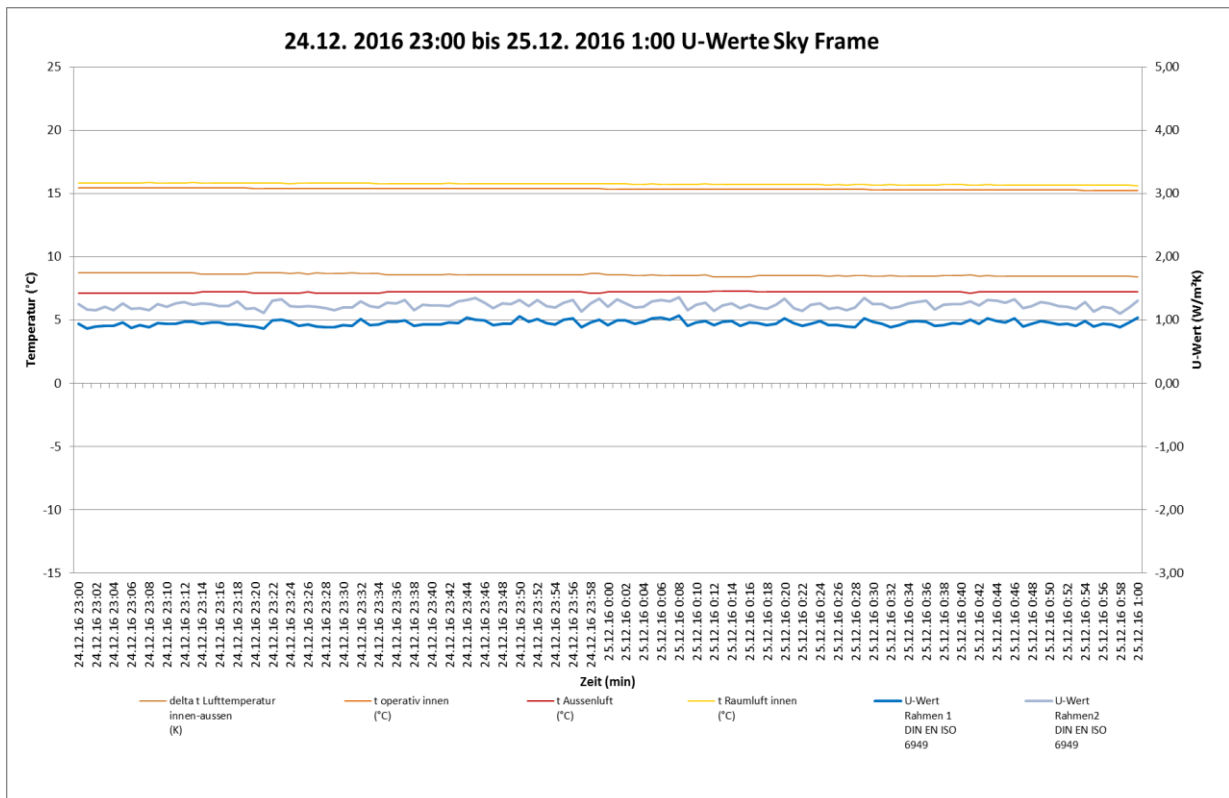


Abbildung 7.7: U-Werte Sky-Frame 24.12.2016 23:00 bis 25.12.2016 1:00



## 7.2 Winter-Intervall 2

Das zweite Messintervall im Winter erstreckte sich vom 5.1.2017 bis zum 9.1.2017. Zur Ermittlung der Wärmedurchgangswerte für die Verglasungen sowie die Rahmen unter näherungsweise stationären Bedingungen wurde der Zeitraum vom 7.1.2017, 23:00 Uhr bis zum 8.1.2017, 0:30 Uhr gewählt. Für diesen Zeitraum konnten für die Verglasung 1 ein Wärmedurchgangswert von  $0,49 \text{ W/m}^2\text{K}$  und für die Verglasung 2 ein Wert von  $0,49 \text{ W/m}^2\text{K}$  ermittelt werden. Der Hersteller gibt einen U-Wert von  $0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$  an. Der Wärmedurchgangswert für den Rahmen 1 betrug  $1,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ , der für den Rahmen 2 ermittelte Wert lag bei  $1,34 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

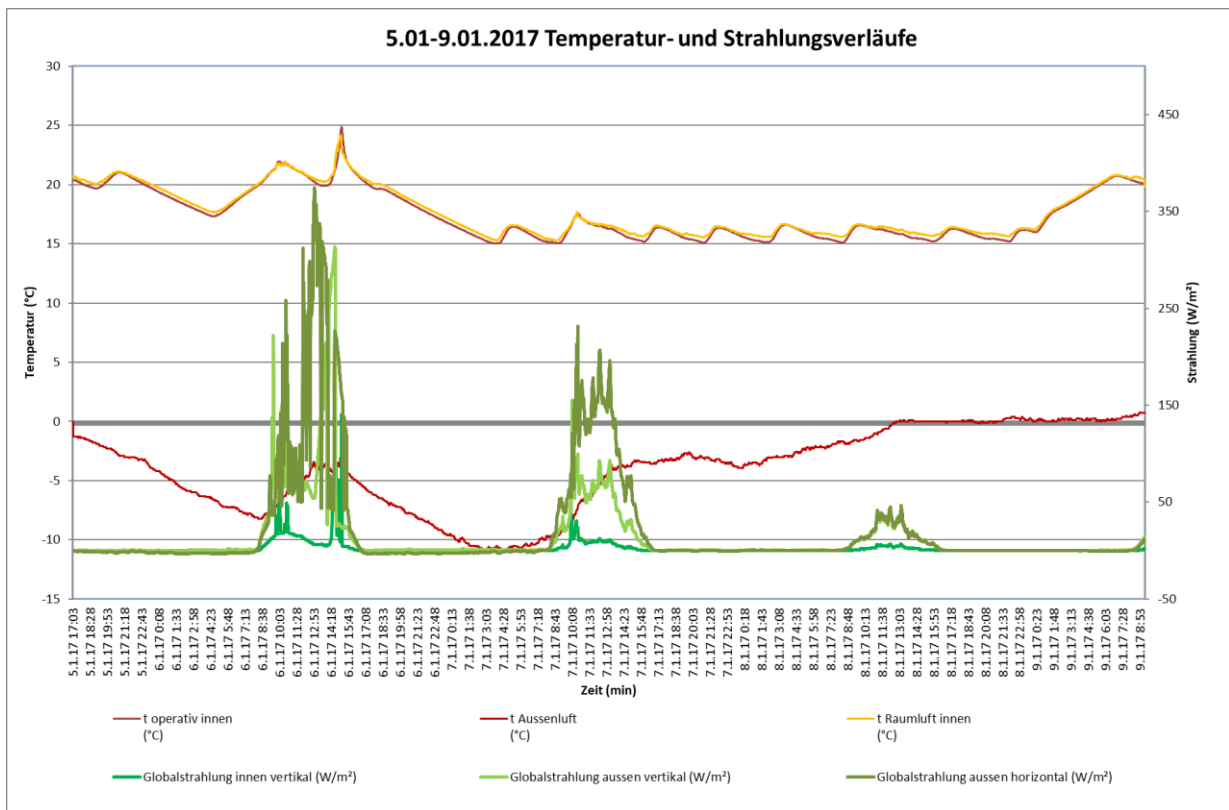


Abbildung 7.8: Temperatur- und Strahlungsverläufe 5.1.-9.1.2017



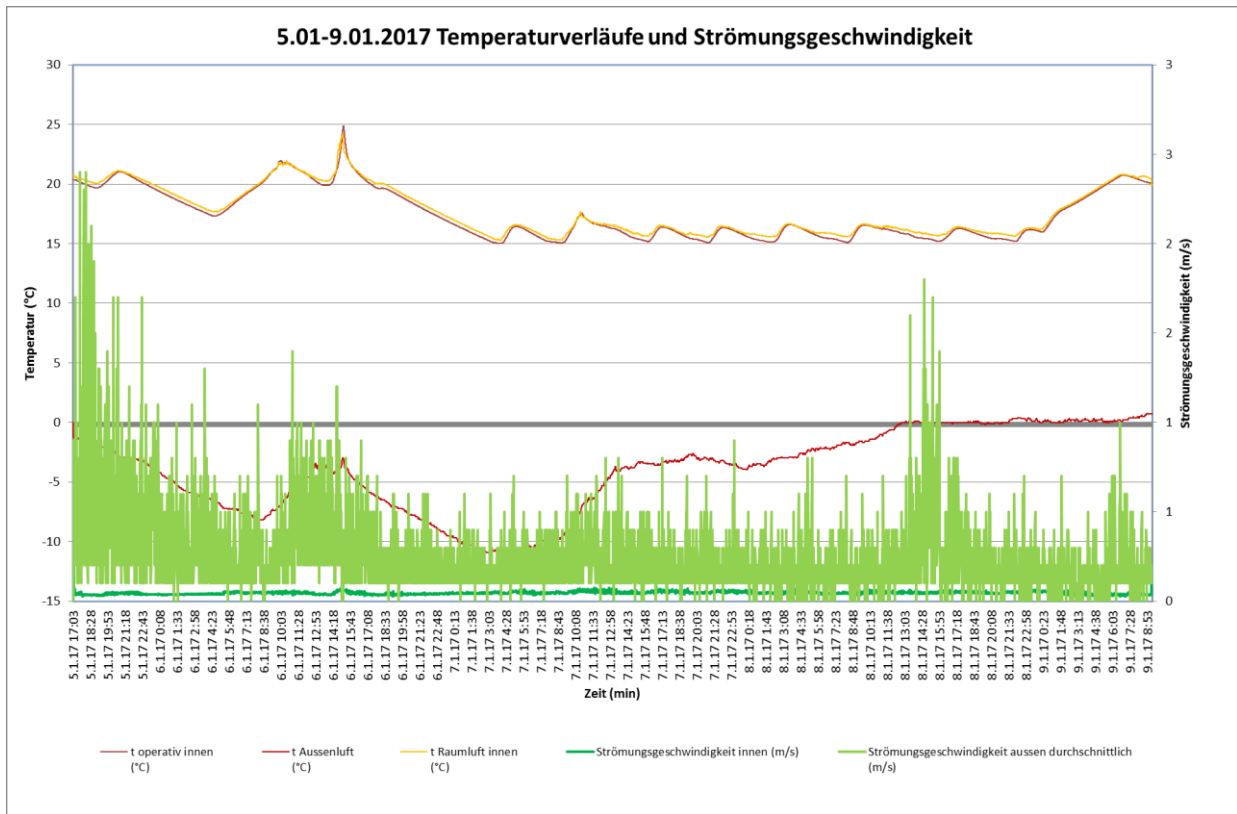


Abbildung 7.9: 5.1.-9.1.2017 Temperaturverläufe und Strömungsgeschwindigkeiten

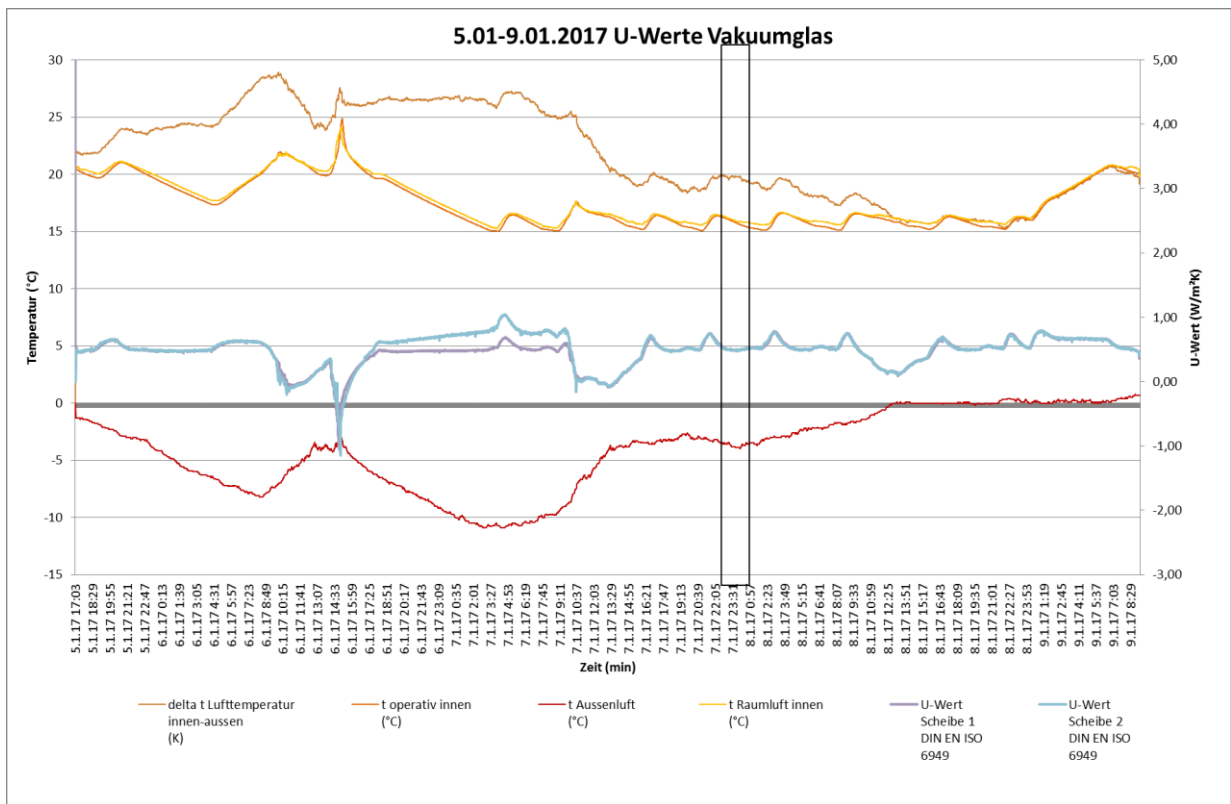


Abbildung 7.10: U-Werte Vakuumglas 5.1.-9.1.2017

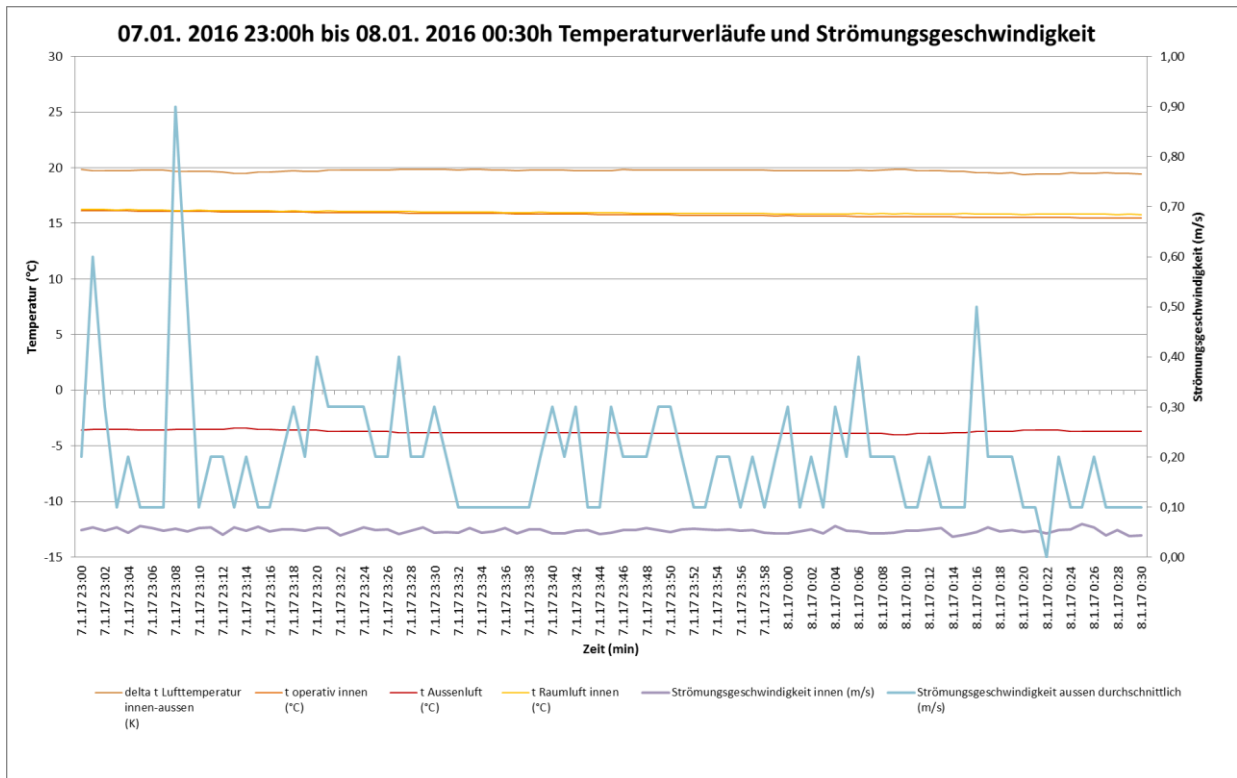


Abbildung 7.11: 7.1.2017 23:00 bis 8.1.2017 0:30 Temperaturverläufe und Strömungsgeschwindigkeiten

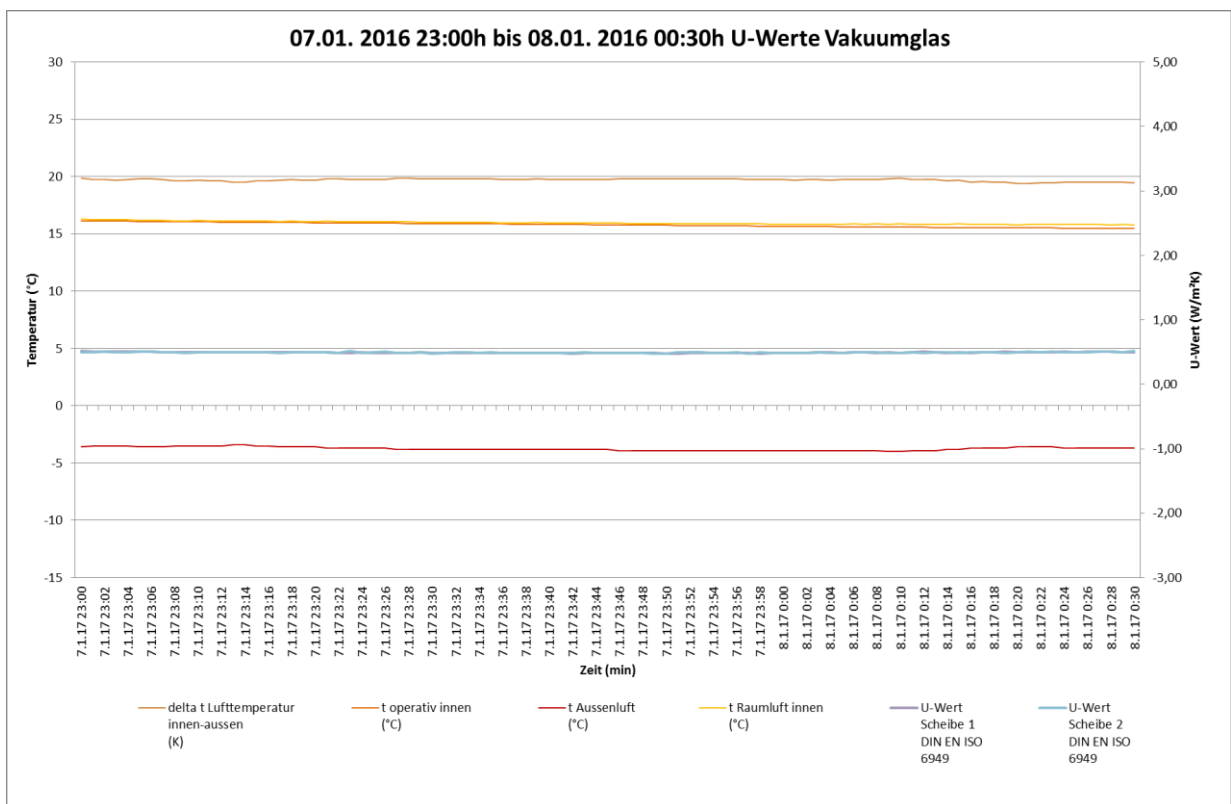


Abbildung 7.12: U-Werte Vakuumglas 7.1.2016 23:00 bis 8.1.2016 0:30

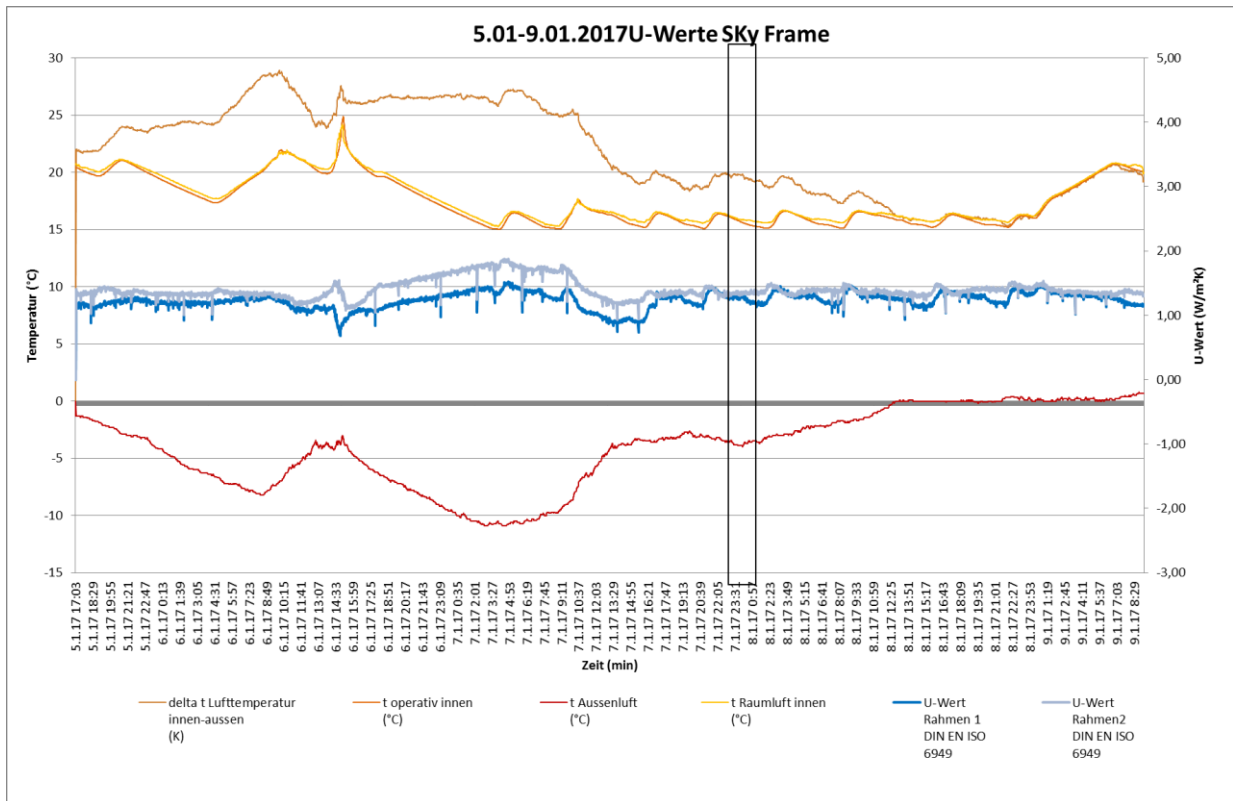


Abbildung 7.13: U-Werte Sky-Frame 5.1.-9.1.2017

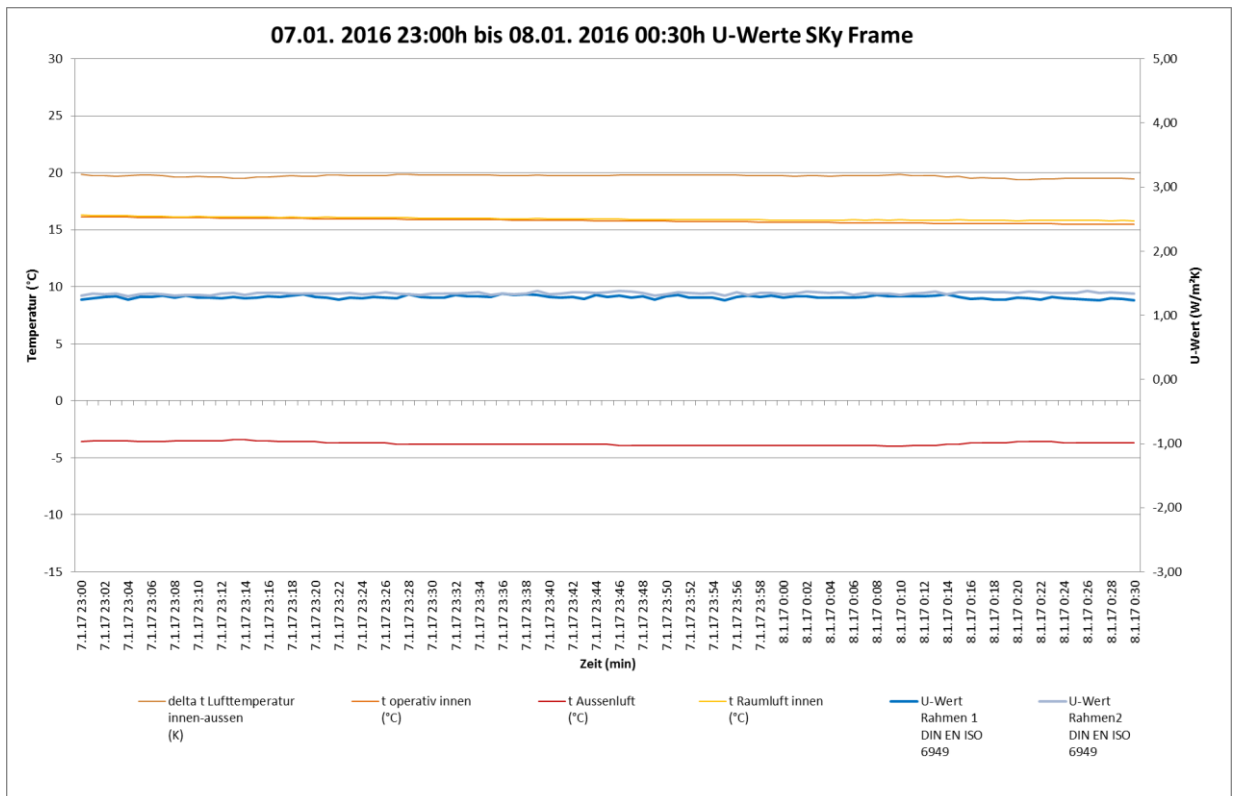


Abbildung 7.14: U-Werte Sky-Frame 7.1.2016 23:00 bis 8.1.2016 0:30

### 7.3 Winter-Intervall 3

Das dritte Messintervall im Winter erstreckte sich vom 16.1.2017 bis zum 19.1.2017. Zur Ermittlung der Wärmedurchgangswerte für die Verglasungen sowie die Rahmen unter näherungsweise stationären Bedingungen wurde der Zeitraum vom 18.1.2017, 19:00 Uhr bis zum 19.1.2017, 1:00 Uhr gewählt. Für diesen Zeitraum konnten für die Verglasung 1 ein Wärmedurchgangswert von  $0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$  und für die Verglasung 2 ein Wert von  $0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$  ermittelt werden. Der Hersteller gibt einen U-Wert von  $0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$  an. Der Wärmedurchgangswert für den Rahmen 1 betrug  $1,02 \text{ W/m}^2\text{K}$ , der für den Rahmen 2 ermittelte Wert lag bei  $1,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

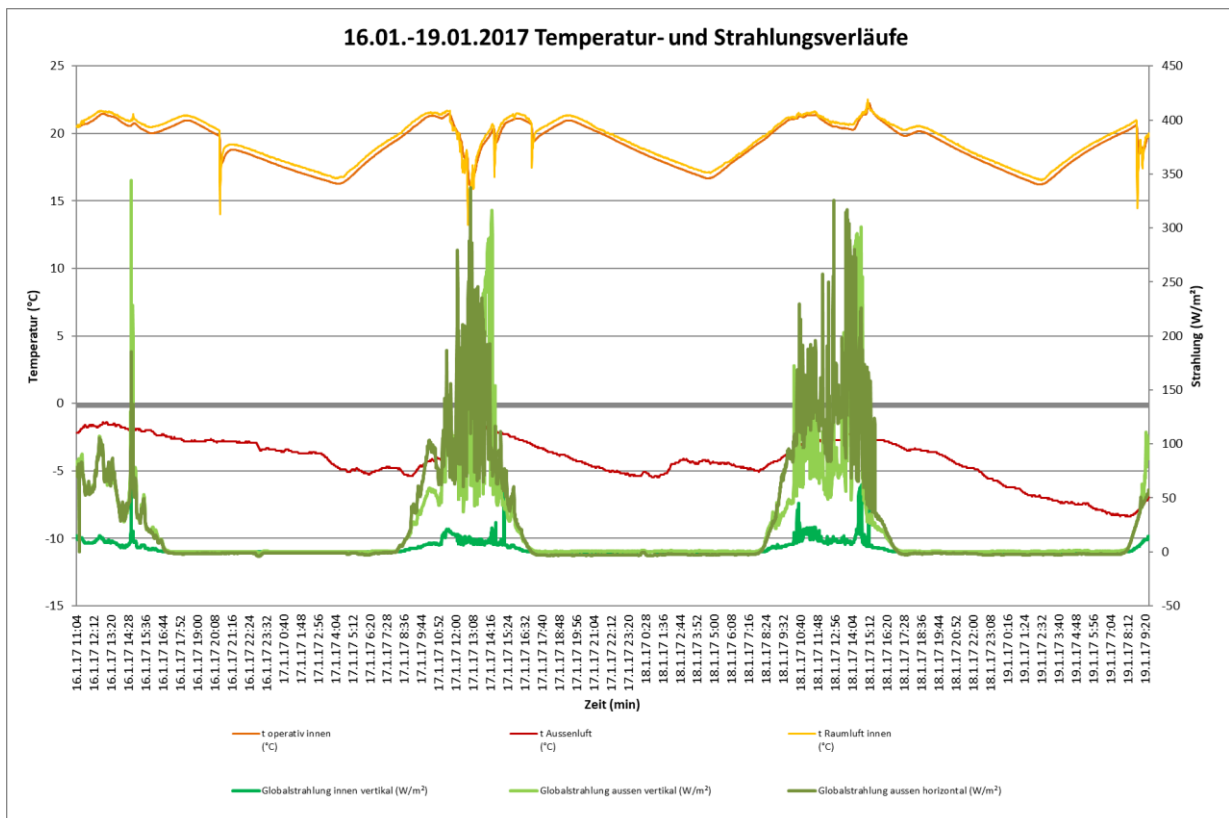


Abbildung 7.15: Temperatur- und Strahlungsverläufe 16.1.-19.1.2017

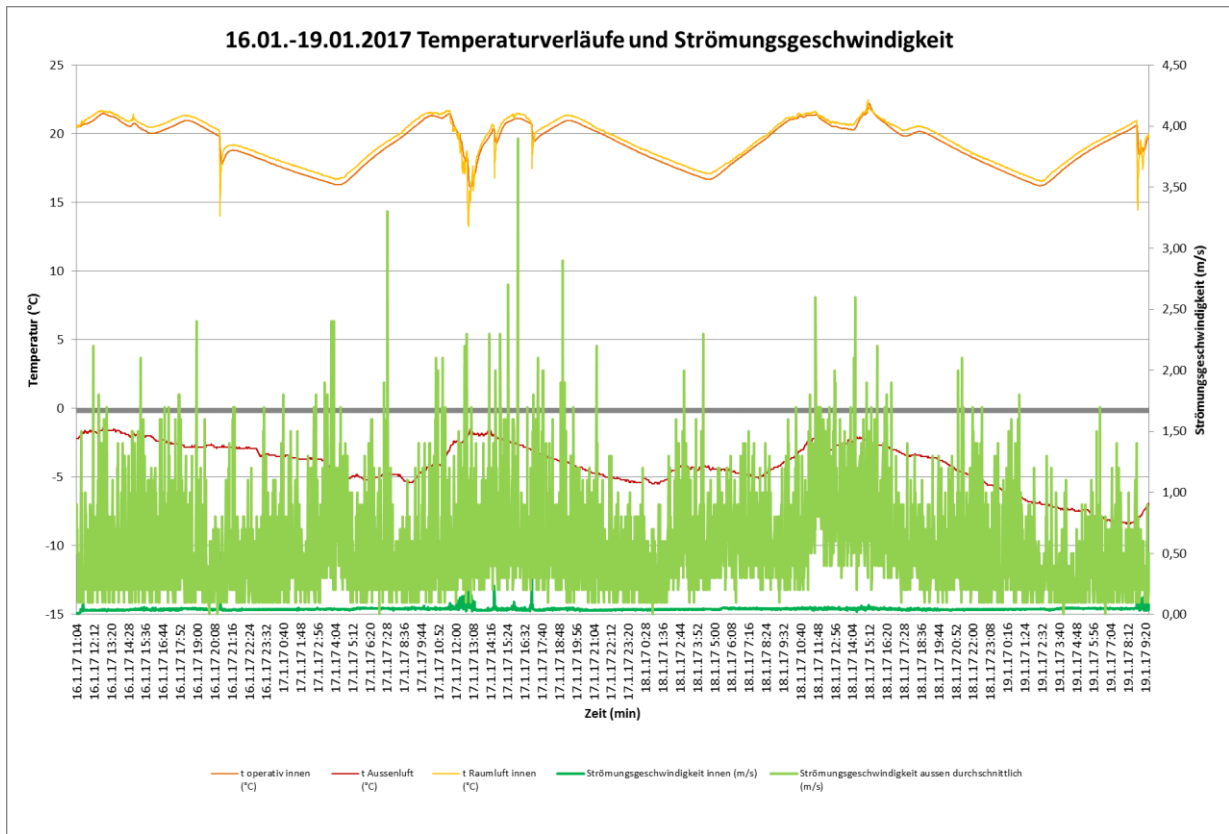


Abbildung 7.16: Temperaturverlauf und Strömungsgeschwindigkeiten 16.1.-19.1.2017

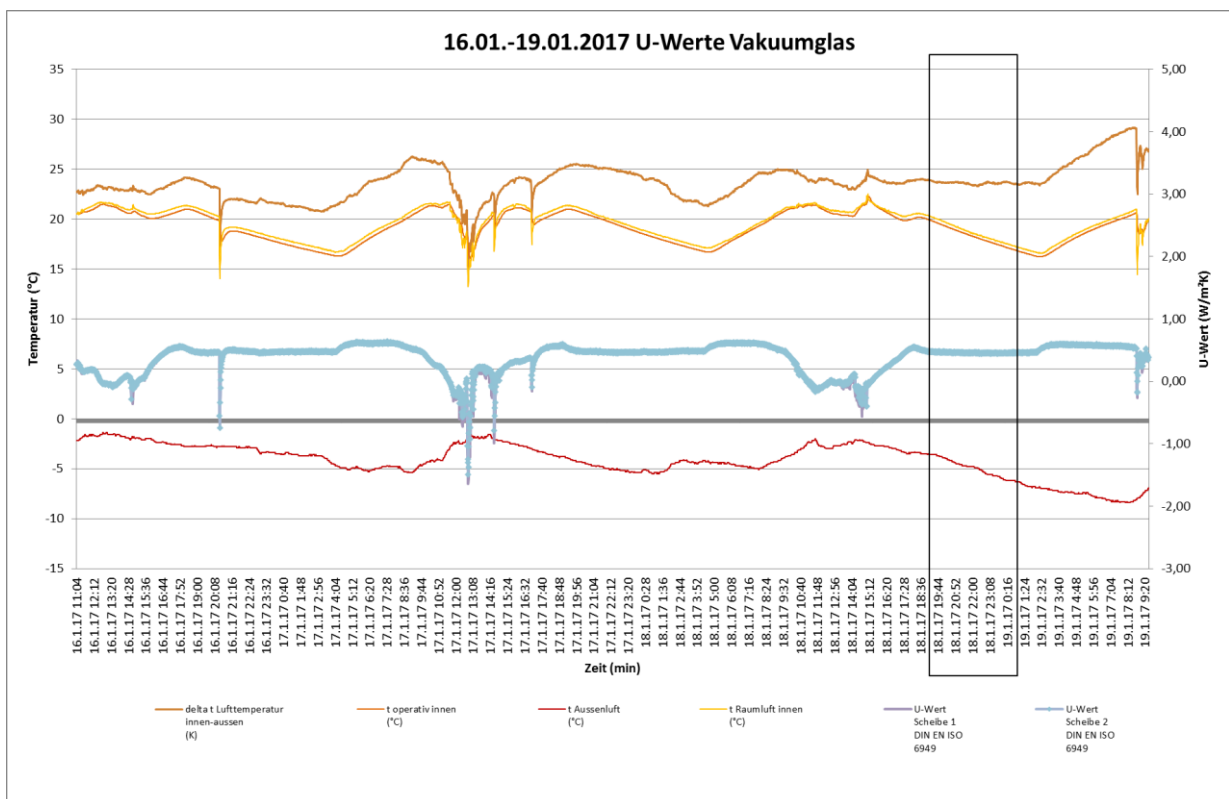


Abbildung 7.17: U-Werte Vakuumglas 16.1.-19.1.2017

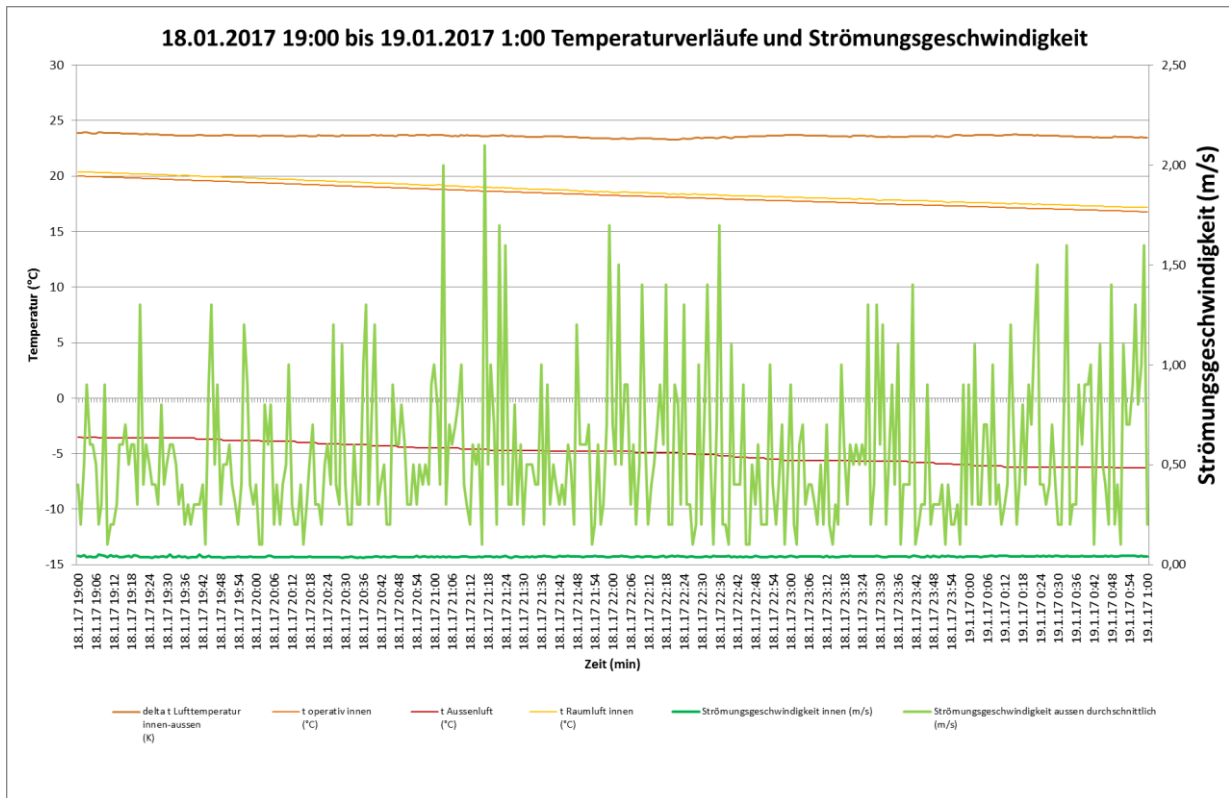


Abbildung 7.18: Temperaturverläufe und Strömungsgeschwindigkeiten 18.1.2017 19:00 bis 19.1.2017 1:00

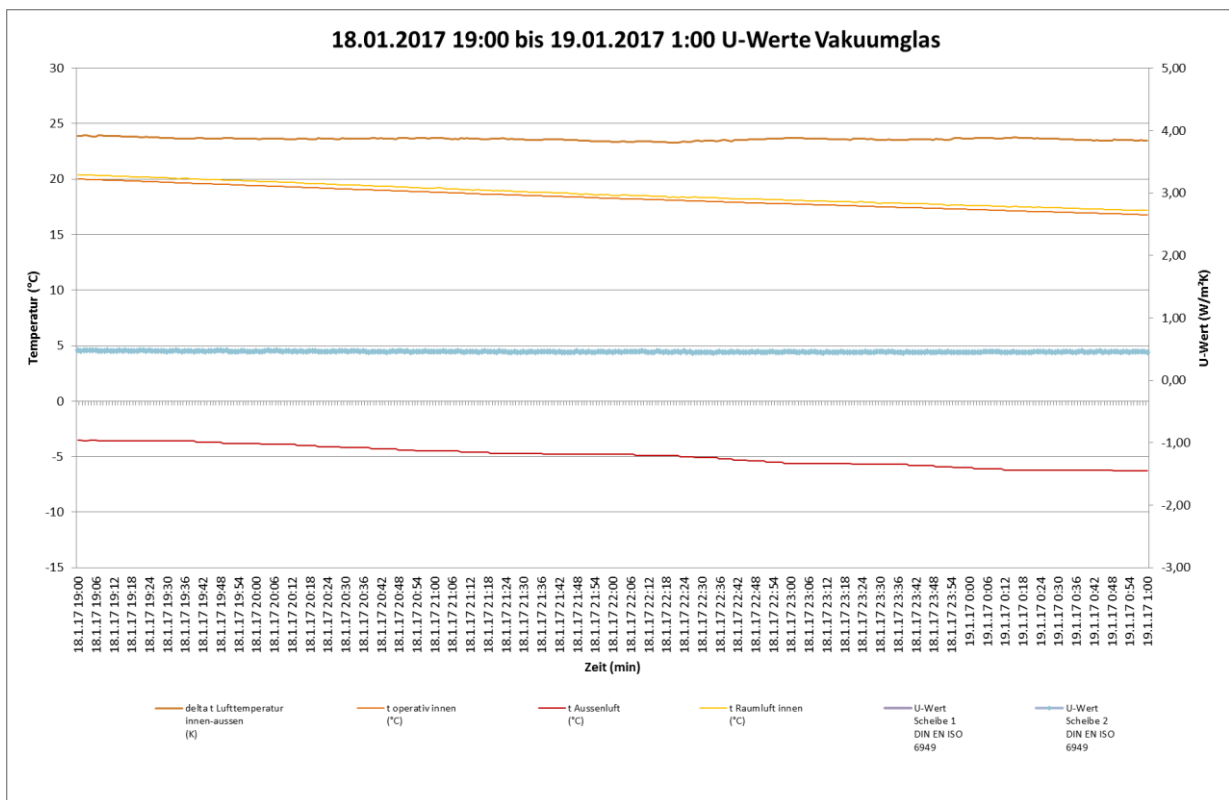


Abbildung 7.19: U-Werte Vakuumglas 18.1.2017 19:00 bis 19.1.2017 1:00

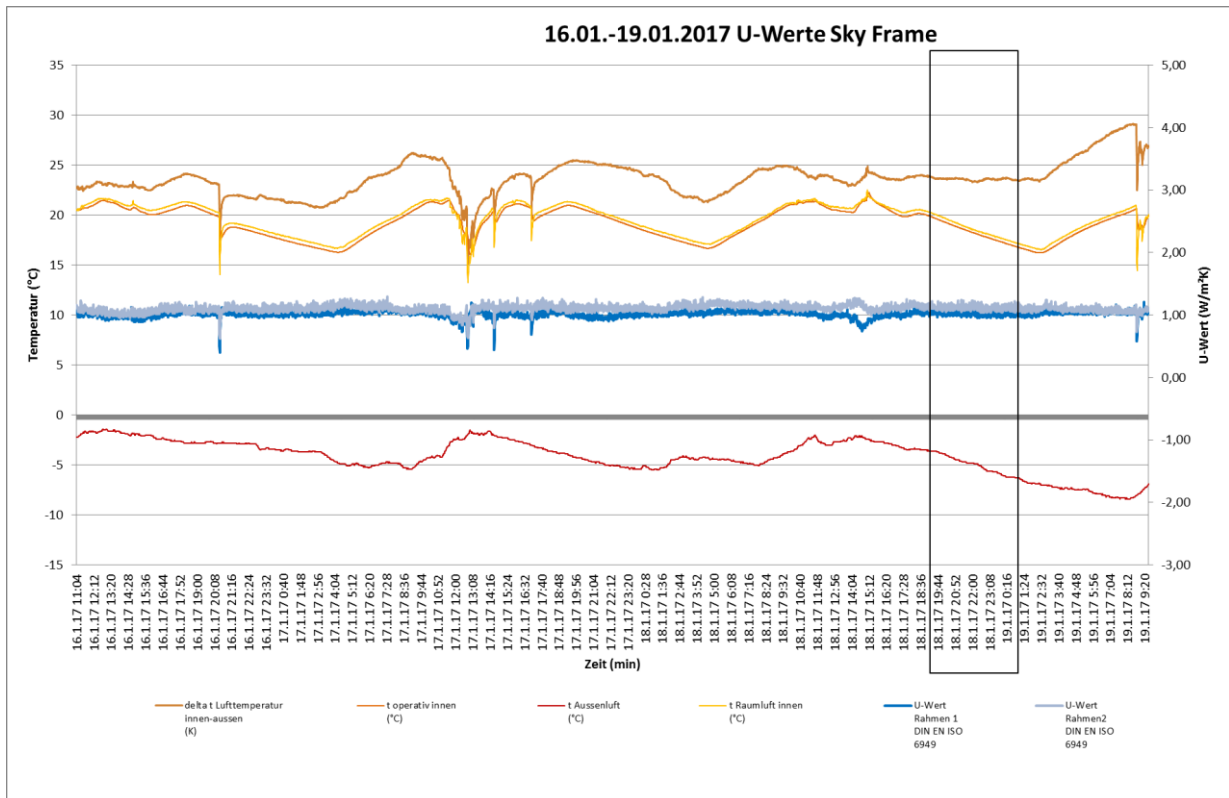


Abbildung 7.20: U-Werte Sky-Frame 16.1.-19.1.2017

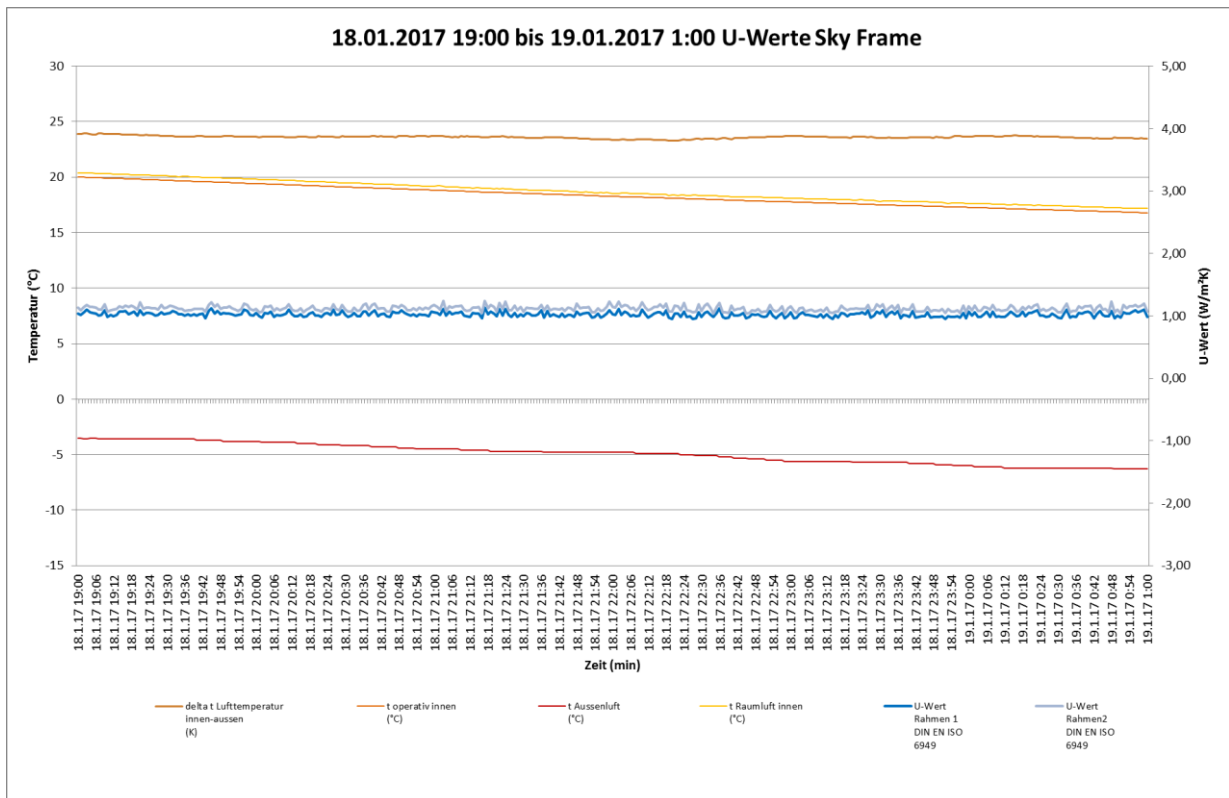


Abbildung 7.21: U-Werte Sky-Frame 18.1.2017 19:00 bis 19.1.2017 1.00



## 7.4 Sommer-Intervall

Das sommerliche Messintervall erstreckte sich vom 9.6.2016 bis zum 15.6.2016. Zur Ermittlung der Wärmedurchgangswerte für die Verglasungen unter näherungsweise stationären Bedingungen wurde der Zeitraum vom 11.6.2016, 21:00 Uhr bis zum 12.6.2016; 3:00 Uhr gewählt. Zur Ermittlung der Wärmedurchgangswerte für die Rahmenprofile unter näherungsweise stationären Bedingungen wurde der Zeitraum vom 12.6.2016, 1:00 Uhr bis zum 12.6.2016, 6:00 Uhr gewählt. Für den genannten Zeitraum konnten für die Verglasung 1 ein Wärmedurchgangswert von  $0,61 \text{ W/m}^2\text{K}$  und für die Verglasung 2 ein Wert von  $0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$  ermittelt werden. Die Herstellerangabe für den U-Wert liegt bei  $0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Der Wärmedurchgangswert für den Rahmen 1 betrug  $1,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ , der für den Rahmen 2 ermittelte Wert lag bei  $1,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

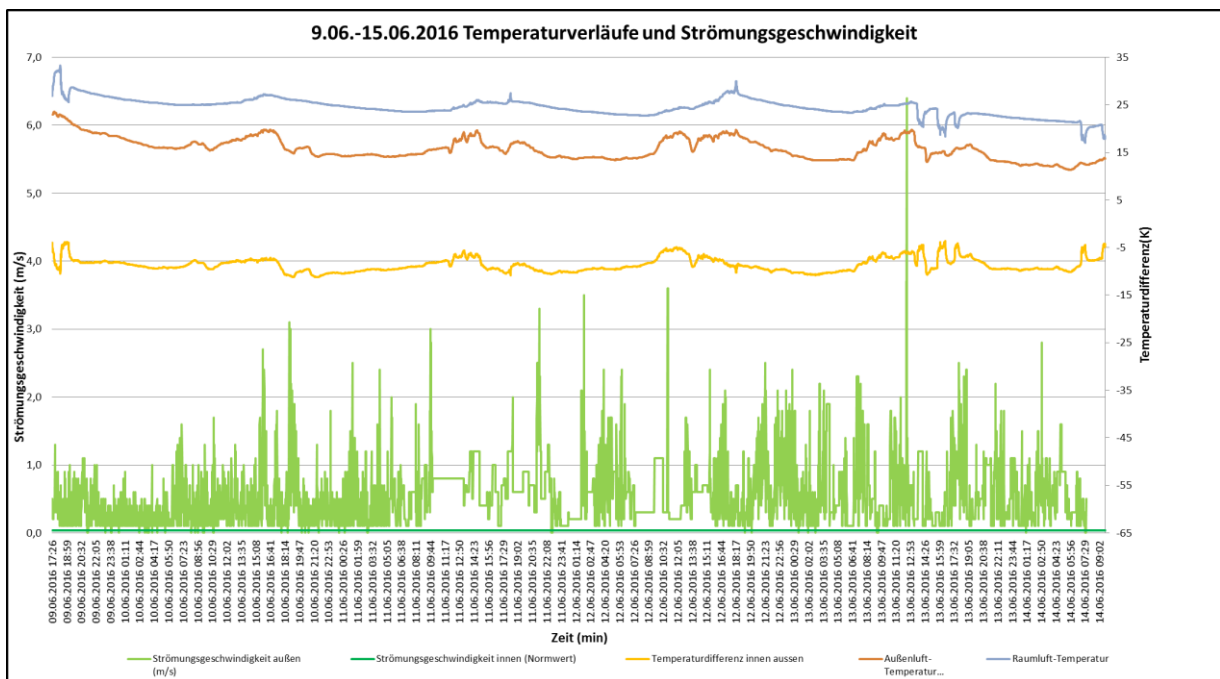


Abbildung 7-22: Temperaturverläufe und Strömungsgeschwindigkeiten 9.6.-15.6.2016



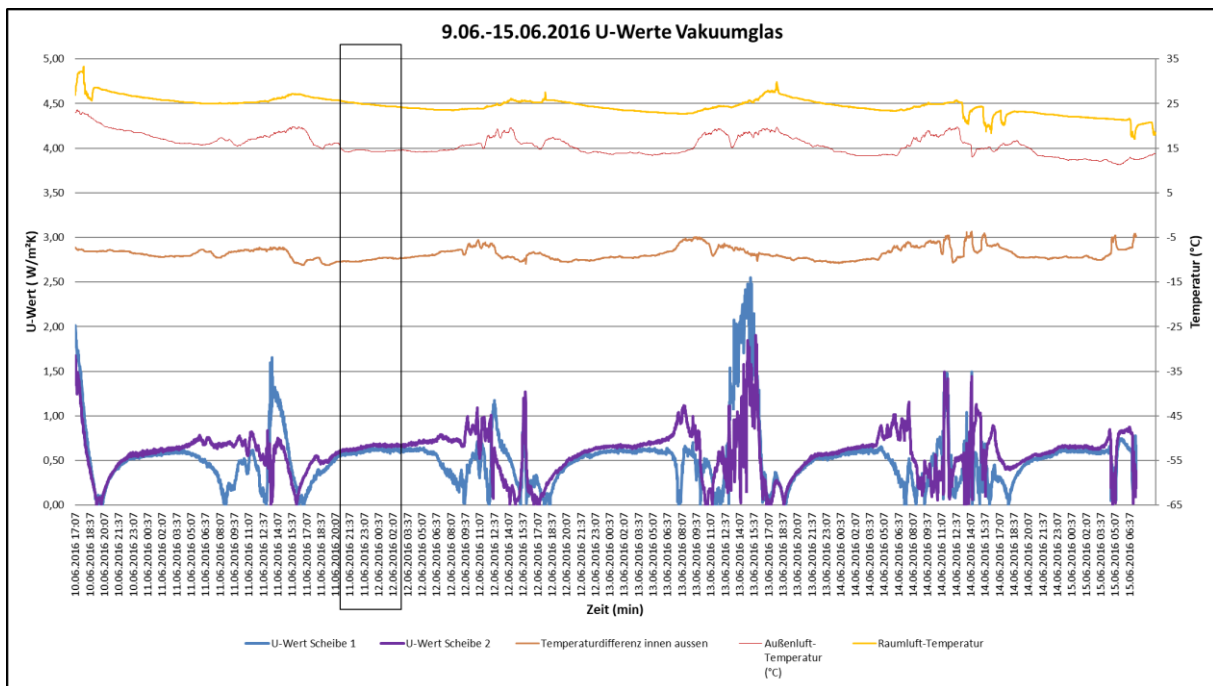


Abbildung 7-23: U-Werte Vakuumglas 9.6.-15.6.2016

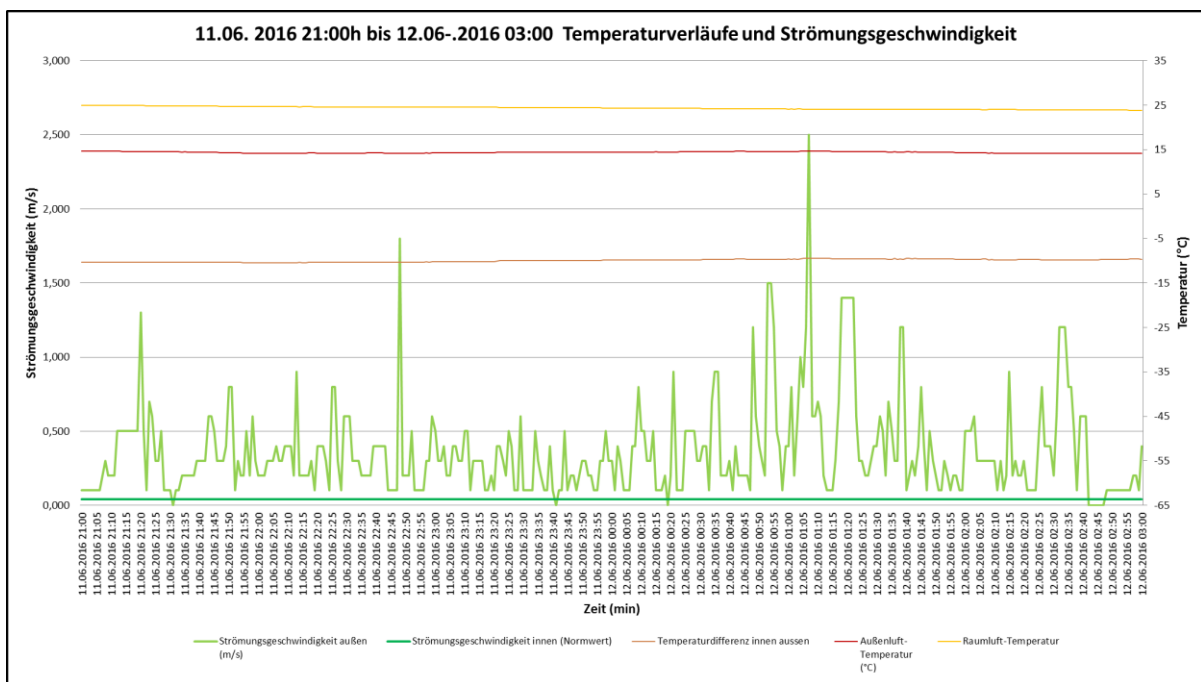


Abbildung 7-24: Temperaturverläufe und Strömungsgeschwindigkeiten 11.6.2016 21:00 bis 12.6.2016 3:00

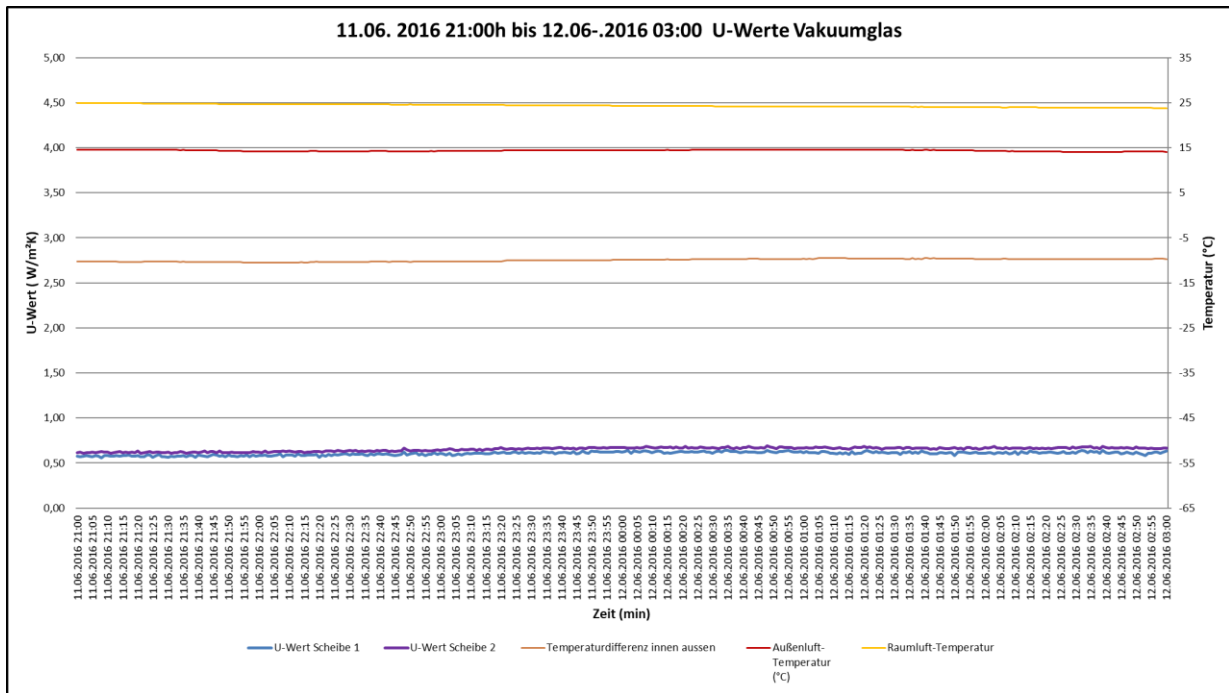


Abbildung 7-25: U-Werte Vakuumglas 11.6.2016 21:00 bis 12.6.2016 3:00

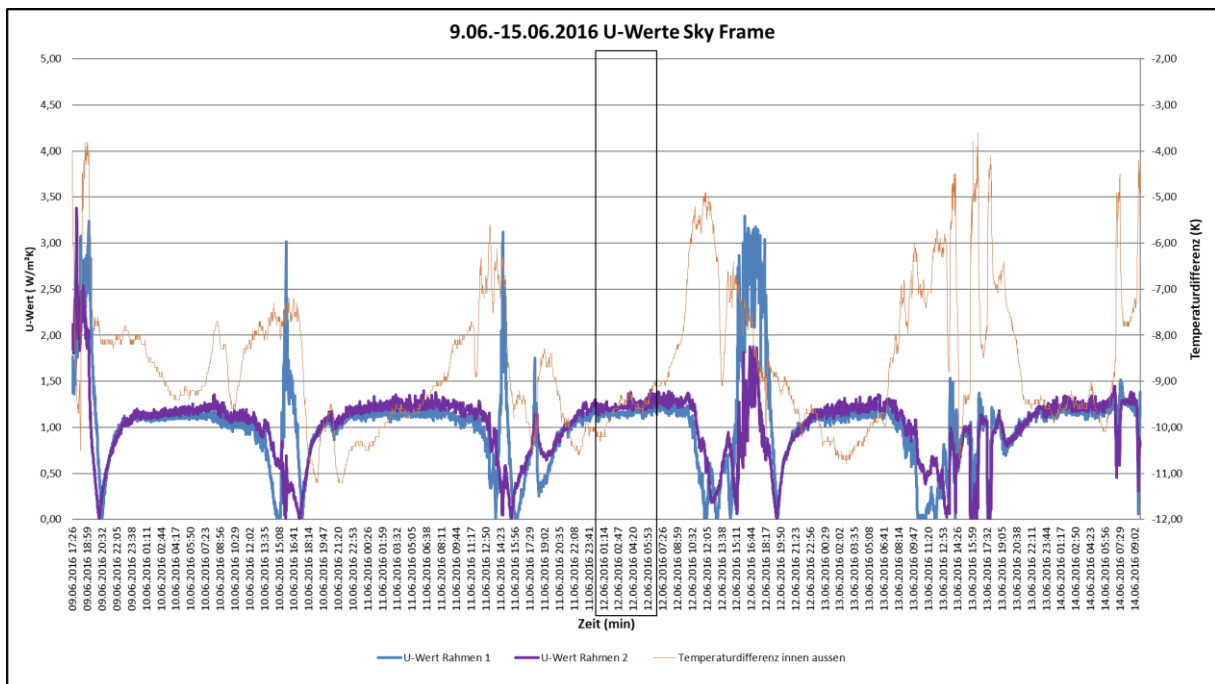


Abbildung 7-26: U-Werte Sky-Frame 9.6.-15.6.2016

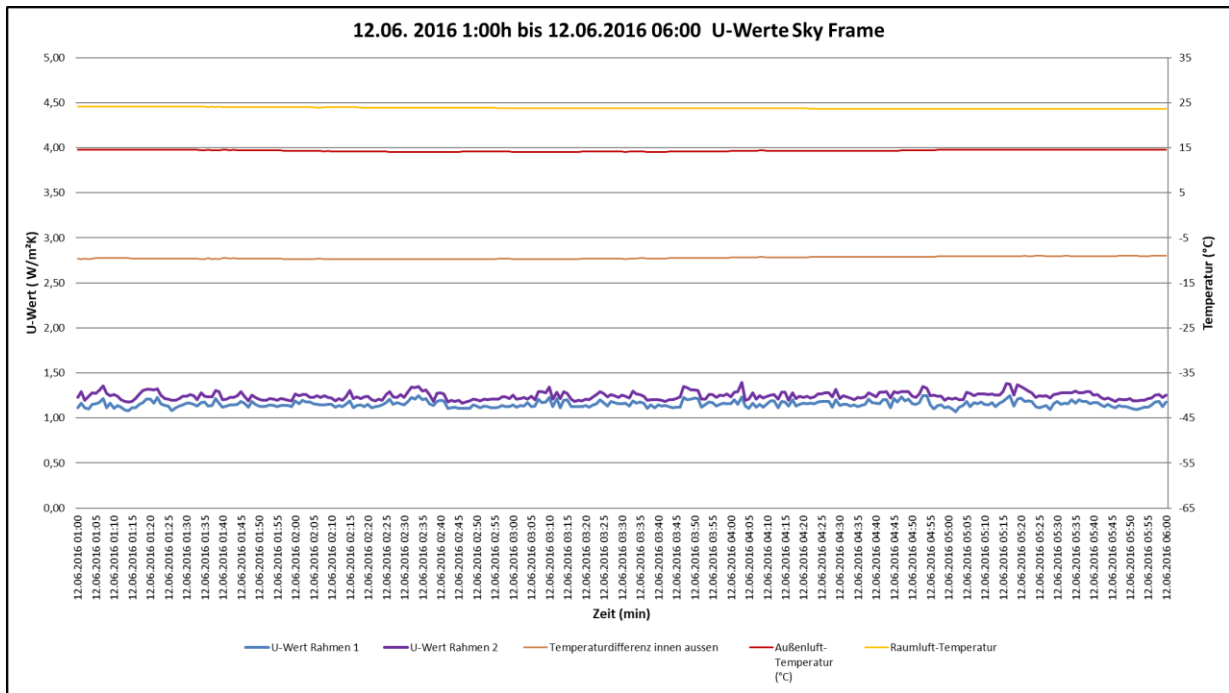


Abbildung 7-27: U-Werte Sky-Frame 12.6.2016 1:00 bis 12.6.2016 6:00

## 7.5 Interpretation und Zusammenfassung der Ergebnisse

Für die ausgewählten nächtlichen Auswertungszeiträume mit näherungsweise unveränderten Temperaturdifferenzen zwischen der Außen- und der Innenlufttemperatur ergeben sich für die Vakuumverglasungen und für die Rahmenprofile die in nachfolgender Tabelle dargestellten Werte. Die maximale Abweichung vom Mittelwert der gemessenen U-Werte liegt bei 23,58 % für die Verglasung 2 im Sommerfall.

Tabelle 7-1: Abweichung vom Mittelwert von U [%] Intervall 1 bis 4

	Scheibe 1	Scheibe 2	Rahmen 1	Rahmen 2
Mittelwert des U-Wertes [W/m²K)	0,52	0,53	1,16	1,29
Abweichung vom Mittelwert von U [%] Winter-Intervall 1	0,87	3,99	0,55	12,18
Abweichung vom Mittelwert von U [%] Winter-Intervall 2	5,22	6,55	11,04	4,25
Abweichung vom Mittelwert von U [%] Winter-Intervall 3	12,26	13,04	11,40	13,09
Abweichung vom Mittelwert von U [%] Sommer-Intervall	16,60	23,58	0,19	3,33

Für die Vakuumverglasungen ist in den oben dargestellten Diagrammen ersichtlich, dass die gemessenen U-Werte deutlichen Schwankungen im Tagesverlauf unterliegen. Wesentlichen Einfluss hierauf hat die Absorption der solaren Einstrahlung im Verglasungsaufbau während der Hellzeiten. Zudem ist eine Korrelation der nächtlich gemessenen U-Werte für die Verglasungen mit dem Verlauf der Innenraumtemperatur erkennbar, was auf instationäre Wärmeleitungseffekte hinweist. Die Schwankungen im U-Wert bei den vermessenen Rahmenprofilen sind deutlich geringer ausgeprägt als bei den Verglasungen, aber dennoch erkennbar. Diese korrelieren ebenfalls mit dem Verlauf der Innenraumtemperatur.

## 8 Versuchsdurchführung im Fassadenprüfstand

### 8.1 Elektrochrome Verglasungen

Die Elektrochromie bezeichnet die reversible Farbänderung bzw. Transmissionsänderung eines Materials infolge einer elektrochemischen Reaktion. Hierbei kann es sich um eine Oxidation (Abgabe von Ladungsträgern) oder eine Reduktion (Ionen- und Elektronenaufnahme) handeln. Elektrochrome Elemente ändern durch Anlegen einer elektrischen Gleichspannung ihre Absorptions-, Transmissions- oder Reflexionseigenschaften. Die Transmission im sichtbaren und im nahen Infrarot-Spektralbereich wird durch die erhöhte Absorption reduziert.

Ein typischer Aufbau eines elektrochromen Systems nach Granqvist [26] ist in Abbildung 8.1 dargestellt. Das Element besteht aus fünf Schichten, die auf Glas- oder Kunststoffsubstraten aufgebracht sind: transparente, elektrisch leitfähige Oxidschicht (transparent conducting oxide, TCO), kathodische elektrochrome Schicht, ionenleitende Schicht bzw. Elektrolyt, Gegenelektrode bzw. Ionenspeicherschicht oder komplementäre anodische elektrochrome Schicht, zweite transparente, elektrisch leitfähige Oxidschicht.

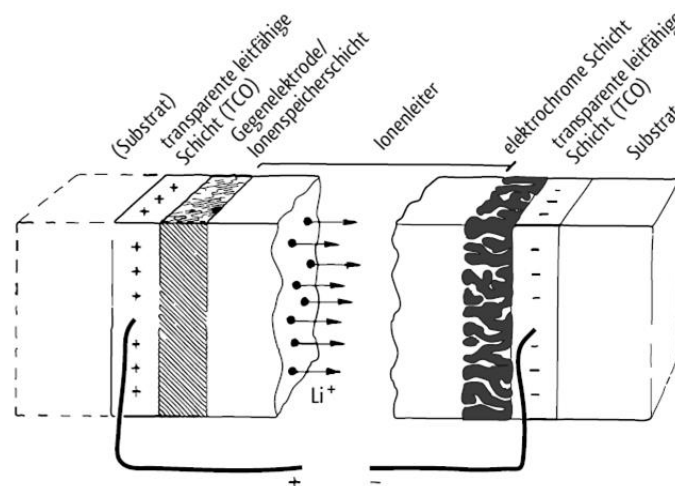


Abbildung 8.1: Typischer Aufbau eines elektrochromen Systems mit kathodischer Schicht [26]

Reine Dünnschichtaufbauten, die als Ionenleiter einen Feststoffelektrolyten enthalten und auf nur einem Glas- oder Kunststoffsubstrat aufgebracht sind, sind mit einigen Nachteilen behaftet. Ihre Herstellung ist recht aufwendig. Darüber hinaus kommt es beim Anlegen von Spannungen zwischen 1 - 3 V zu großen Feldstärken, die Schäden in der 100 - 300 nm dünnen Schicht verursachen können. Somit sind reine Dünnschichtsysteme nur für kleinflächige Produkte wie beispielsweise elektrochrome Kfz-Rückspiegel geeignet [27]. Für großflächige Produkte wird eine Kombination aus Dünnschicht- und Verbundtechnologie verwendet. Hierbei ist das System zwischen zwei Glas- oder Kunststoffsubstraten eingebettet und enthält als Ionenleiter eine Polymerfolie im Mikro- bis Millimeter-Dickenbereich. Durch diese Sandwichstruktur, die einen luftdichten Abschluss zur Umgebung ermöglicht, wird das System geschützt und somit seine Lebensdauer verlängert [27].

Wird eine elektrische Gleichspannung von maximal 5 V ([27], [28]) an die beiden TCO-Schichten angelegt, erfolgt ein Ionentransport von der Ionenspeicherschicht durch den Elektrolyten in die elektrochrome Schicht. Wird die Spannung umgepolt, wird ein Ionentransport zurück in die Ionenspeicherschicht angeregt und die elektrochrome Schicht entfärbt sich wieder. Auf diese Weise lässt sich die Energie- und Lichtdurchlässigkeit steuern [12]. Unterschiedlich stark eingefärbte Zwischenstufen entstehen, wenn die Spannungsversorgung während des Färbeprozesses unterbrochen wird [13]. Da der Elektrolyt nahezu keine Elektronen durchlässt, bleibt der jeweilige Zustand auch nach Abschalten der elektrischen Gleichspannung erhalten. Somit wird nur zum Schalten in einen anderen Transmissionszustand elektrische Energie benötigt [13].

In einem am ILEK geförderten Forschungsvorhaben wurden zwei elektrochrome Verglasungssysteme untersucht: ECONTROL® smart 55/10 der Firma EControl-Glas GmbH & Co. KG sowie SageGlass® classic des Herstellers Vetrotech Saint-Gobain International AG.

Abbildung 8.2 zeigt ein Beispiel für die Anwendung des ECONTROL®-Systems. Dieses wurde am Fassadenprüfstand des ILEK wärmetechnisch vermessen.



Abbildung 8.2: Anwendungsbeispiel der ECONTROL®-Verglasung: Fraunhofer IST Braunschweig [28]

Die ECONTROL® smart 55/10-Verglasung der Firma EControl-Glas GmbH & Co. KG bestand aus einer ca. 9 Millimeter dicken Verbundglasscheibe, die die Funktionsschichten enthielt (Verbundglasaufbau: 4 mm Floatglas / ionenleitfähiges Polymer und elektrochrome Beschichtung / 4 mm Floatglas) und die äußere Scheibe des Isolierglases darstellte. Der Zwischenraum der Isolierverglasung betrug 16 Millimeter und war mit Argongas gefüllt. Der inneren Abschluss der Verglasung wurde von einem Floatglas der Dicke von 4 Millimetern gebildet. Auf der nach außen gewandten Seite dieser Glasscheibe befand sich eine low-e-Beschichtung (Floatglas: ClimaGuard Premium 2 der Firma Guardian Glass, Emissionsgrad 0,037).

## 8.2 Eigenschaften der elektrochrome Verglasung:

Die bauphysikalischen Kennwerte der Verglasung ECONTROL® smart 55/10 wurden auf der Basis der Herstellerangaben und durch Berechnungen mit dem Programm Window 7.4.6 für die jeweiligen Schaltzustände der Verglasung ermittelt. Die Werte sind in Tabelle 8-1 dargestellt und [29] entnommen. Der Zustand maximaler Transmission der Verglasung wird als Stufe 0 und der Zustand minimaler Transmission als Stufe 4 bezeichnet.

Tabelle 8-1: Kennwerte der ECONTROL®-Verglasung für zwei extreme Schaltzustände (Quelle für CEN-Werte: EControl-Glas [26], NFRC-Werte basieren auf den Spektraldaten der EControl-Glas GmbH & Co. KG), Mittelwerte wurden abgerechnet mit den Programmen LBNL-Optics 5.1/Window 7.4.6

		U (W/m <sup>2</sup> K)	g	T <sub>vis</sub>	R <sub>vis</sub>	T <sub>sol</sub>	R <sub>sol</sub>
CEN	Stufe 0	1,10	0,41	0,55	-	-	-
	Stufe 4		0,10	0,10	-	-	-
NFRC	Stufe 0	1,40	0,41	0,54	0,13	0,35	0,20

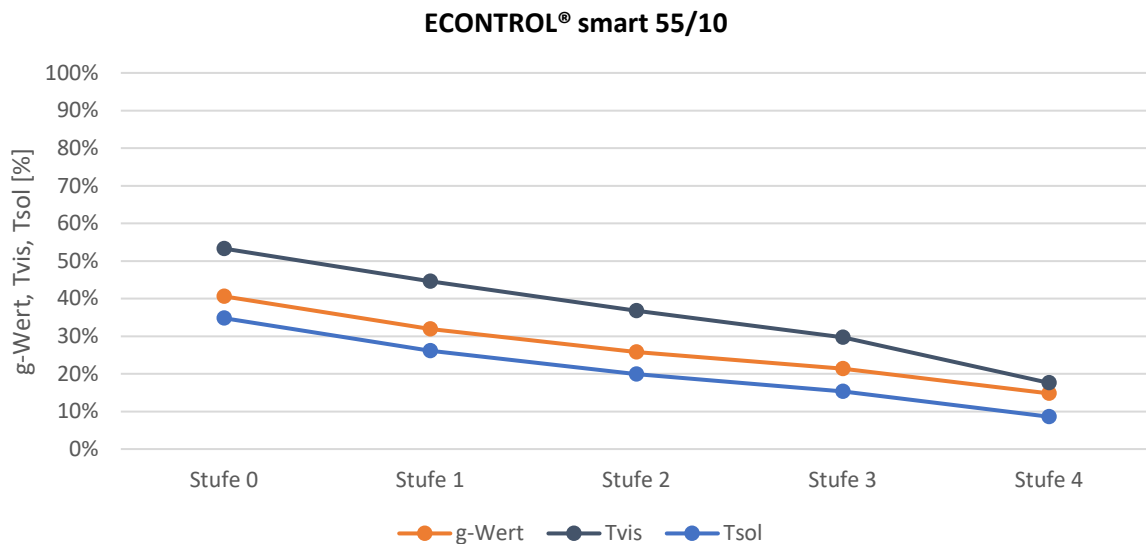


Abbildung 8.3: g-Wert, T<sub>vis</sub> und T<sub>sol</sub> der ECONTROL®-Verglasung in Abhängigkeit von der Schaltstufe (Quelle für CEN-Werte: EControl-Glas [28], NFRC-Werte basieren auf den Spektraldaten der EControl-Glas GmbH & Co. KG), Mittelwerte wurden berechnet mit den Programmen LBNL-Optics 5.1 sowie Window 7.4.6). Abbildung aus [29] entnommen.

## 8.3 Referenzverglasung mit invarianten Eigenschaften

Zusätzlich zu der adaptiven Verglasung wurde ein Zweifachisolierglas als Referenzverglasung untersucht. Die äußere Glasscheibe des Isolierglases bestand aus einer Floatglasscheibe (Planiclear des Herstellers Saint-Gobain Glass mit einer Dicke von 6 mm). Der Scheibenzwischenraum (12 mm) war mit Argongas gefüllt. Die Innenscheibe der Isolierverglasung bestand

aus einer Floatglasscheibe mit einer zusätzlichen low-e-Beschichtung auf der raumabgewandten Seite (Typ: Planitherm One des Herstellers Saint-Gobain Glass, Dicke: 6 mm, Emissionsgrad: 0,013 ). Die Eigenschaften der Referenzverglasung sind nachfolgend detailliert dargestellt und [29] entnommen.

#### 8.4 Eigenschaften der Referenzverglasung

In Tabelle 8-2 sind die bauphysikalischen, die fotometrischen sowie die radiometrischen Kennwerte der Referenzverglasung gelistet [29].

Tabelle 8-2: Optische und thermische Kenndaten der Referenzverglasung (Quelle: LBNL Window 7.4.6, IGDB v48) [27]

	U (W/m <sup>2</sup> K)	g	T <sub>vis</sub>	R <sub>vis</sub>	T <sub>sol</sub>	R <sub>sol</sub>
CEN	1,16	0,46	0,70	0,22	0,40	0,41
NFRC	1,29	0,47	0,70	0,22	0,40	0,41

#### 8.5 Versuchsaufbau

Um die wärmetechnischen Kennwerte der ECONTROL-Verglasung unter instationären Bedingungen ermitteln zu können, wurden in die Südfassade des Fassadenprüfstands des ILEK zwei elektrochrome Isolierglaseinheiten eingebaut und dort vermessen. Die Verglasungen waren übereinander angeordnet und durch ein Riegelprofil voneinander separiert. Zur Erfassung der Wärmeströme durch die untere Isolierglaseinheit wurden innenseitig zwei Wärmeflussplatten angebracht, wie sie in Abbildung 8.4 dargestellt sind. Diese waren auf der Außenseite nicht abgeschirmt. Dadurch kam es nachts zu einem ungestörten Strahlungsaustausch der Verglasung mit der Umgebung und dem Himmel. Am Tag allerdings führte dies dazu, dass es bei solarer Einstrahlung zur Absorption der einfallenden solaren Strahlung an den Glasscheiben wie auch an den Wärmeflussplatten kam. Hierdurch wurde der gemessene Wärmestrom tagsüber verfälscht. Dies ist bei der Interpretation der Messergebnisse zu beachten.

Auch an der oben beschriebenen Referenzverglasung wurden auf der inneren Glasscheibe Wärmeflussplatten angebracht, um den Wärmestrom zu erfassen. Die Referenzverglasung bildet die Außenhülle im Erschließungsbereich des Fassadenprüfstands. Die Positionen der Sensorelemente sind in Abbildung 8.5 dargestellt.

An den beiden Isolierverglasungen erfolgte die messtechnische Erfassung der außenklimaabhängigen Wärmeströme unter wechselnden Wetterbedingungen. Die Ergebnisse sind nachfolgend grafisch dargestellt.



Elektrochrome Verglasung  
Messraum 1.2 im Obergeschoss:

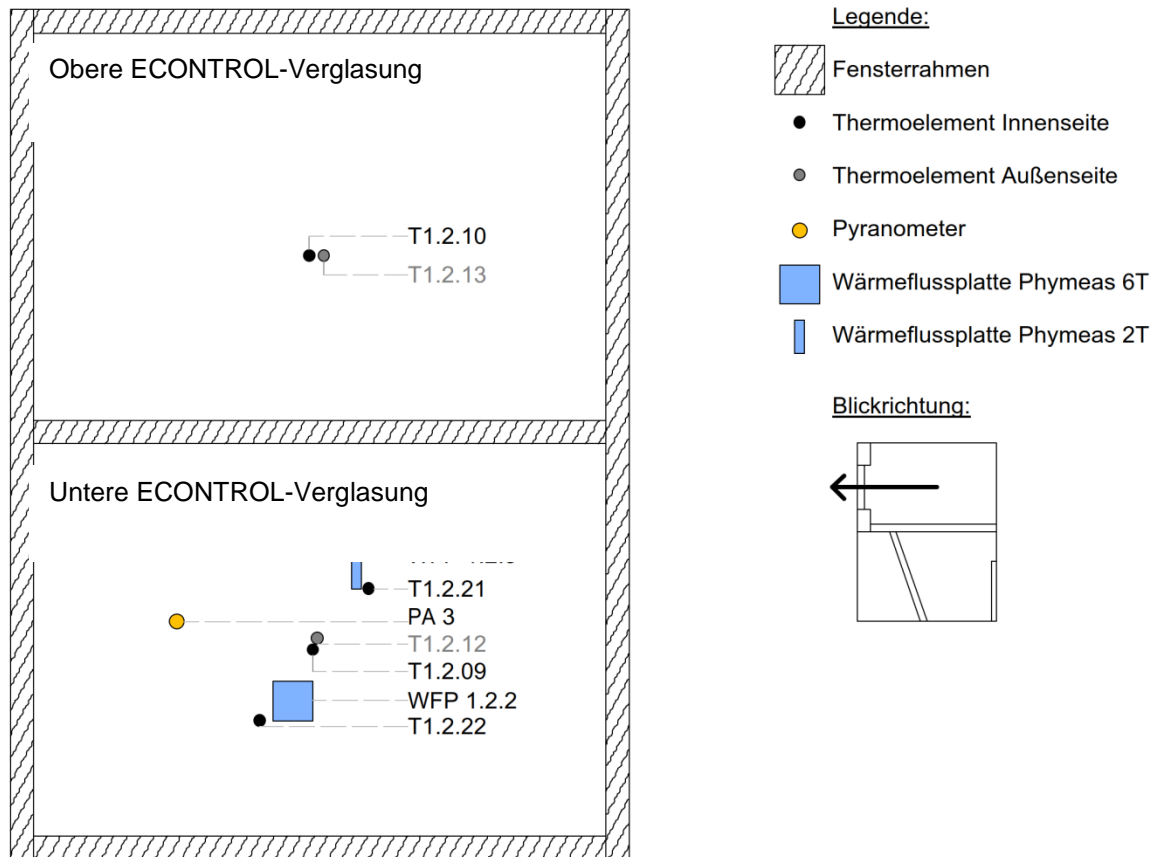


Abbildung 8.4: Sensorik für das Monitoring an der ECONTROL-Verglasung



## Referenzverglasung Flur/Erschließungsbereich im Obergeschoss

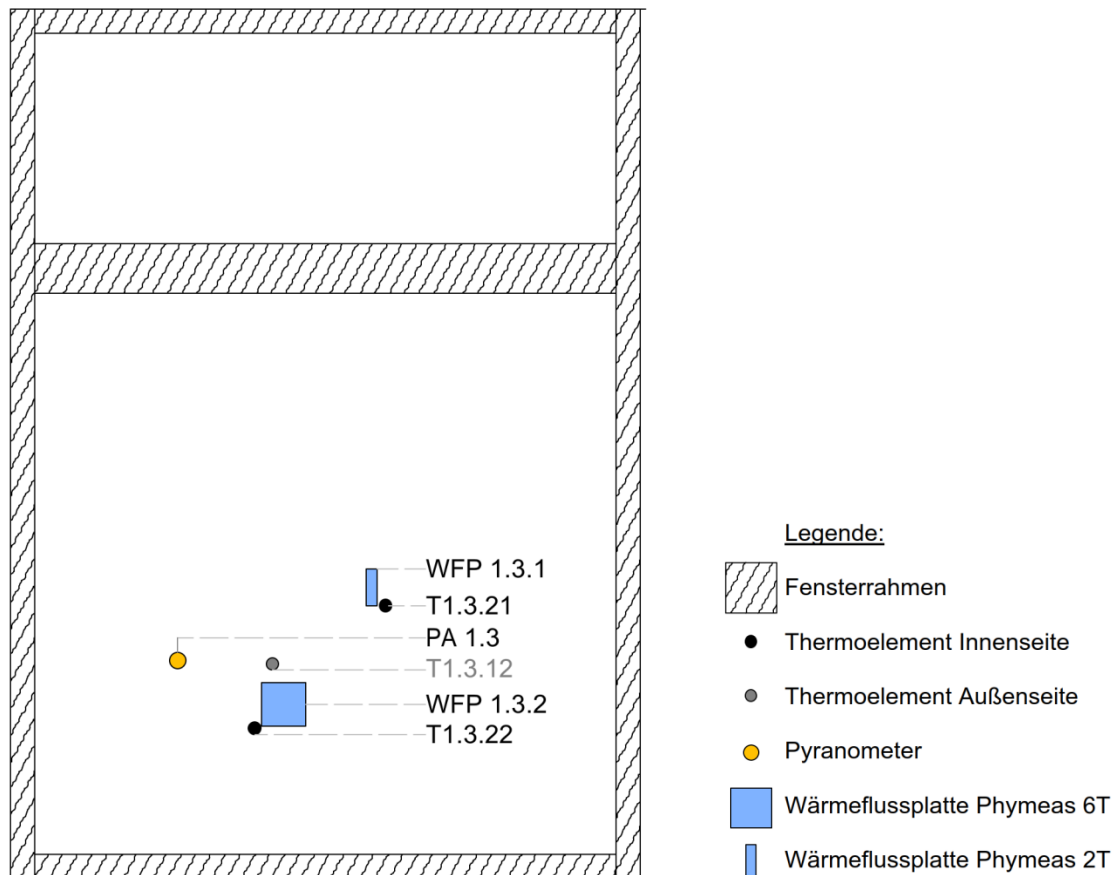


Abbildung 8.5: Sensorik für das Monitoring der Referenzverglasung

### 8.6 Darstellung der Messergebnisse

Für die Bestimmung des Wärmedurchgangswertes der elektrochromen Verglasung unter in-stationären Bedingungen wurde im Untersuchungszeitraum der 04.11.2017 ausgewählt. Zwei Zeitintervalle waren dabei von besonderem Interesse. Das nächtliche Intervall (2:00-3:00 Uhr) war gekennzeichnet durch eine nur gering sich verändernde Außenlufttemperatur. Während des Tagesintervalls (12:30-13:00 Uhr) kam es zu einer signifikanten solaren Einstrahlung auf die Verglasung mit einer deutlichen Beeinflussung des Wärmestroms. Nachfolgend dargestellt sind die Grafen der Messdaten.

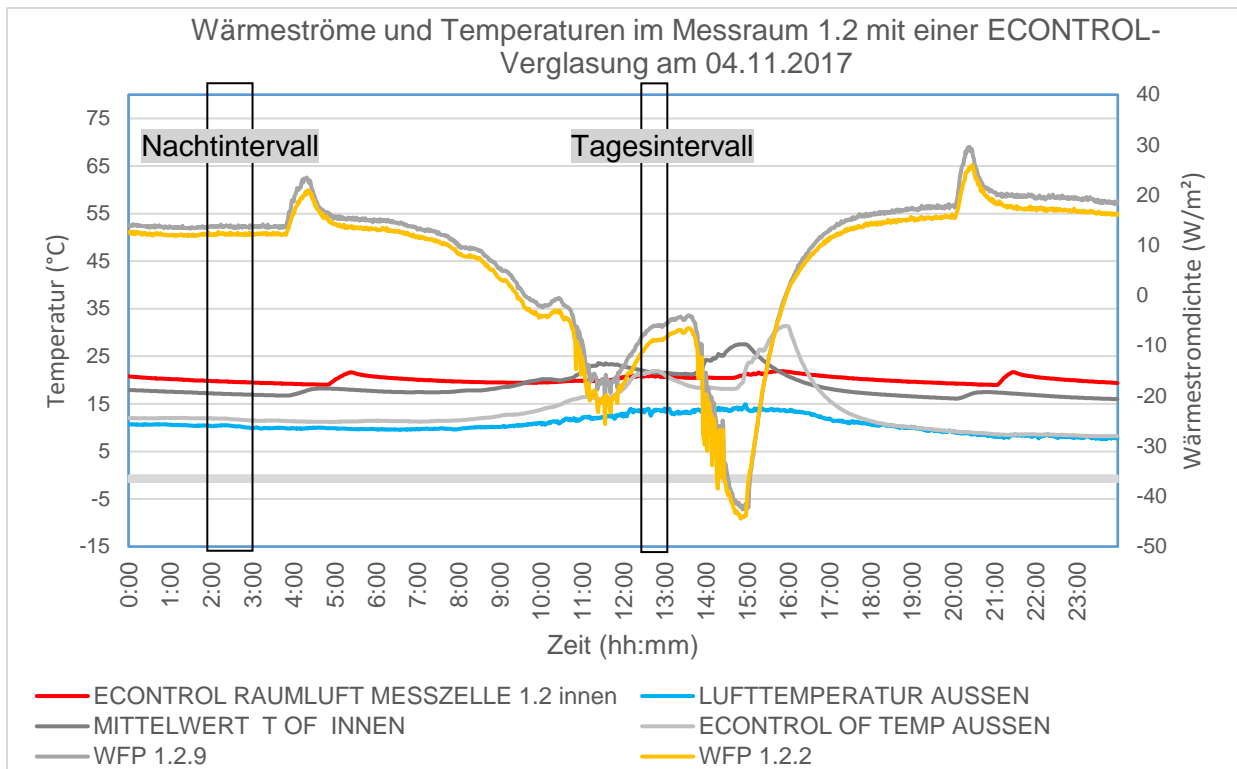


Abbildung 8.6: Wärmestrom- und Temperaturverläufe gemessen an der ECONTROL-Verglasung am 04.11.2017. Auswertintervalle sind gekennzeichnet.

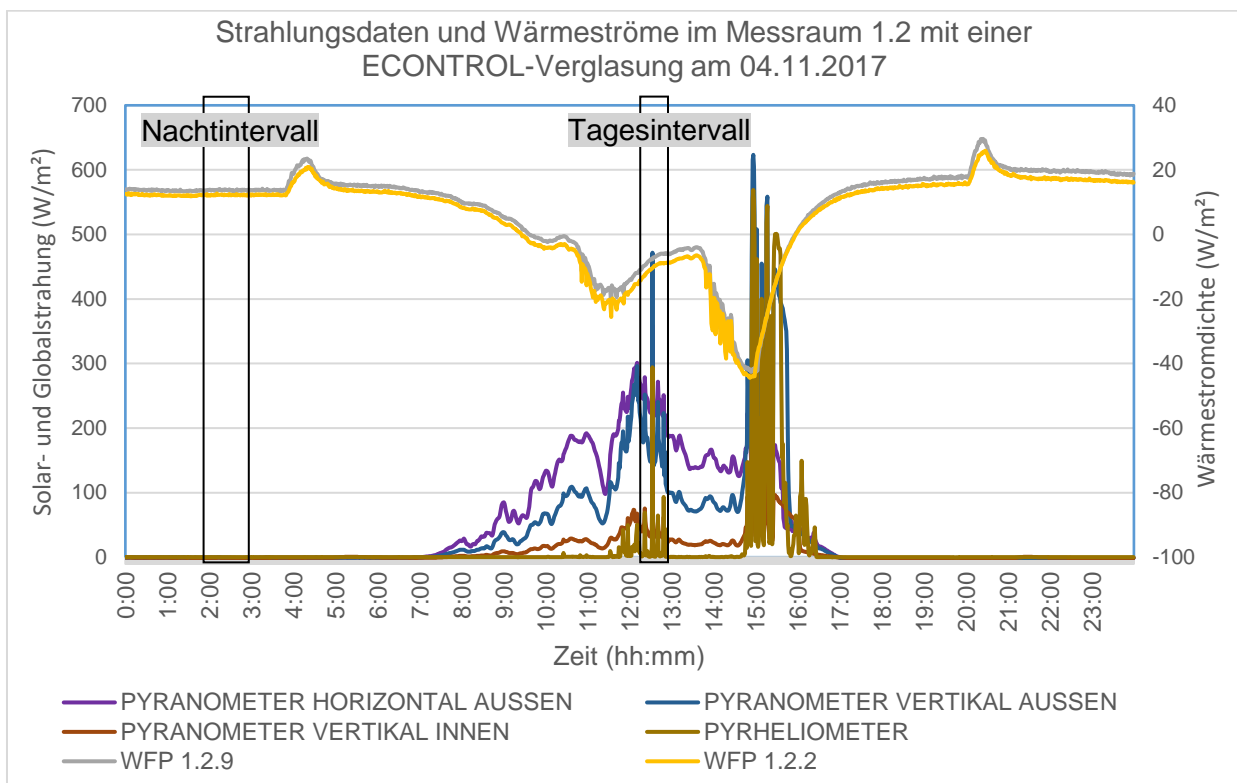


Abbildung 8.7: Strahlungsdaten und Wärmeströme gemessen an der ECONTROL-Verglasung am 04.11.2017. Auswertintervalle sind gekennzeichnet.

### 8.6.1 Nachtintervall

Nachfolgend dargestellt sind die Grafen für den nächtlichen Auswertzeitraum. Die elektrochrome Verglasung befand sich im Schaltzustand 1 und 0 (Abbildung 8.9). Im Schaltzustand 0 ist die Verglasung nicht abgedunkelt und daher im Zustand größter Durchlässigkeit.

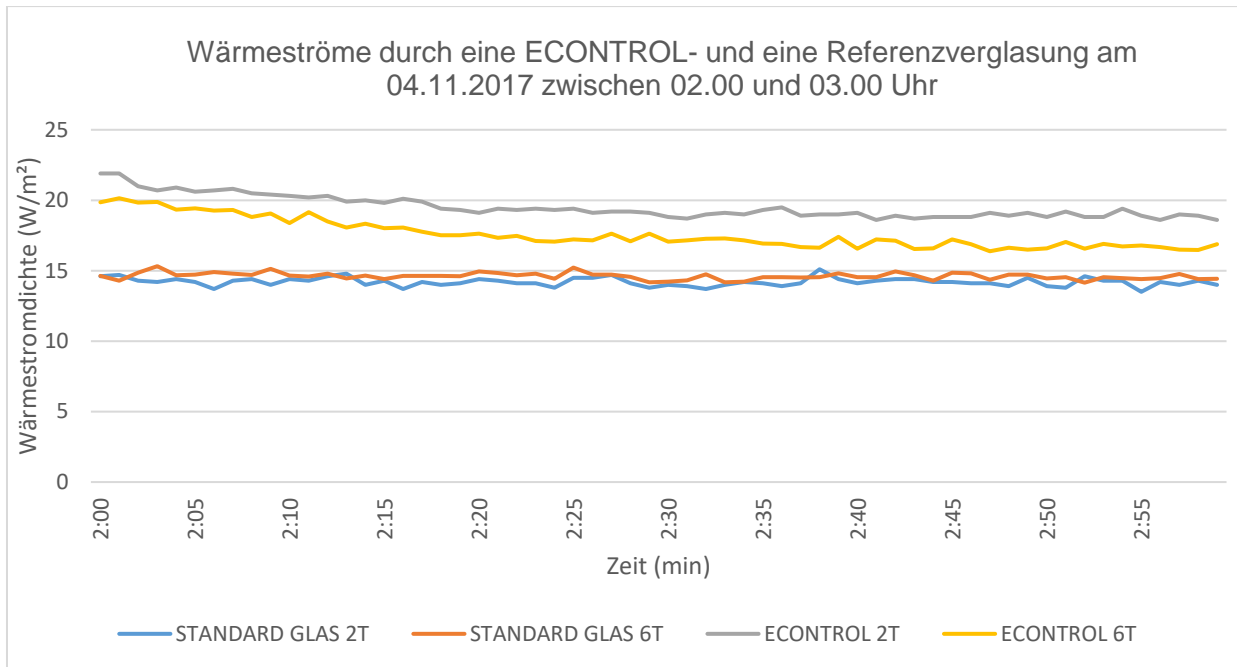


Abbildung 8.8: Wärmeströme durch eine ECONTROL- und eine Referenzverglasung („Standard“) am 04.11.2017 zwischen 02.00 und 03.00 Uhr

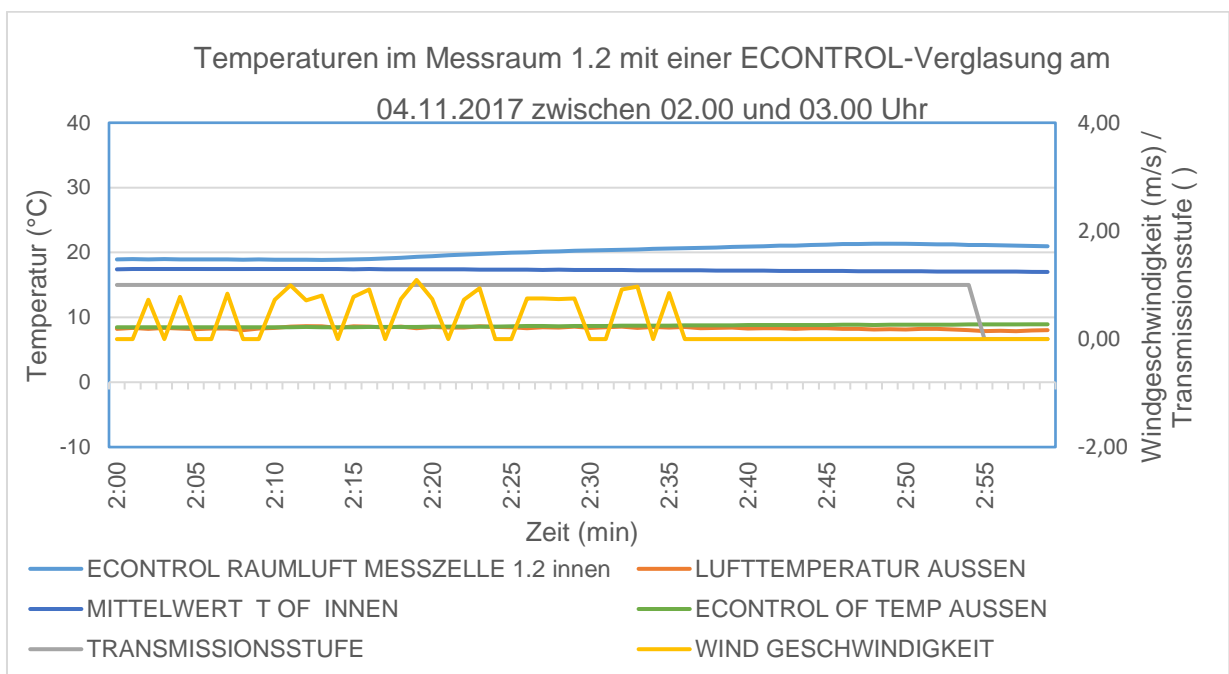


Abbildung 8.9: Temperaturen im Messraum 1.2 mit einer ECONTROL-Verglasung am 04.11.2017 zwischen 02.00 und 03.00 Uhr

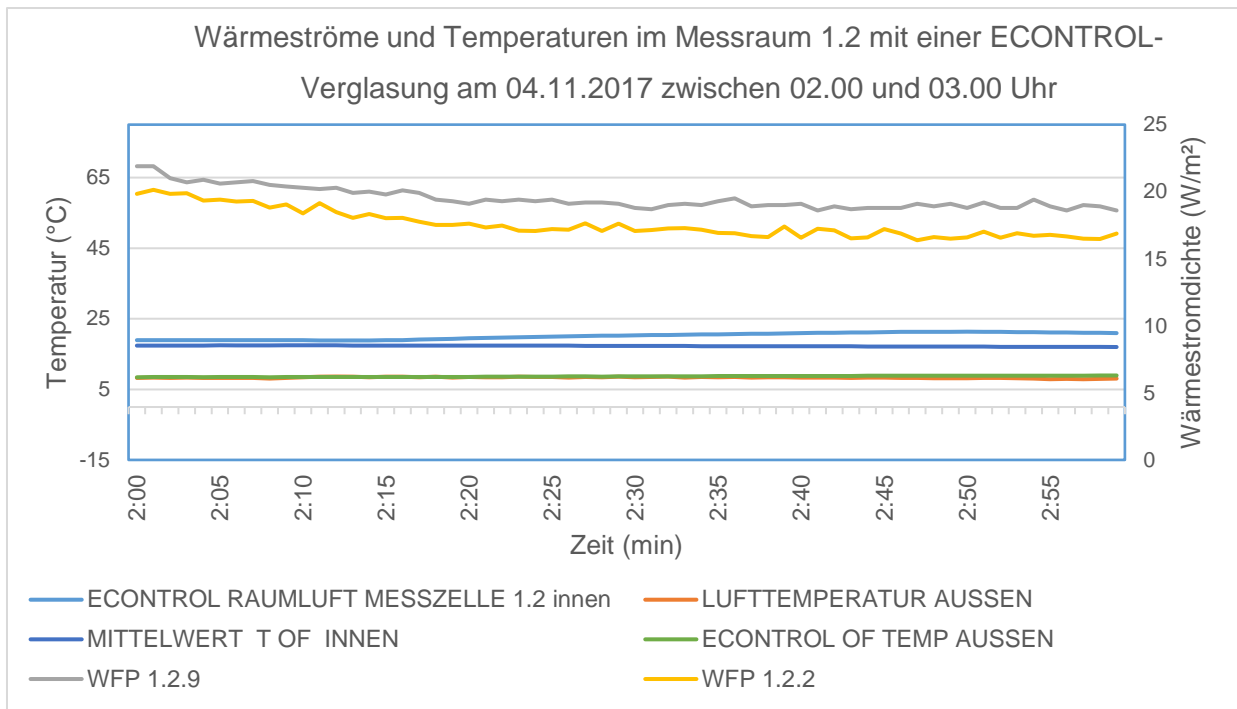


Abbildung 8.10: Wärmeströme durch eine ECONTROL- Verglasung und Temperaturverläufe am 04.11.2017 zwischen 02.00 und 03.00 Uhr

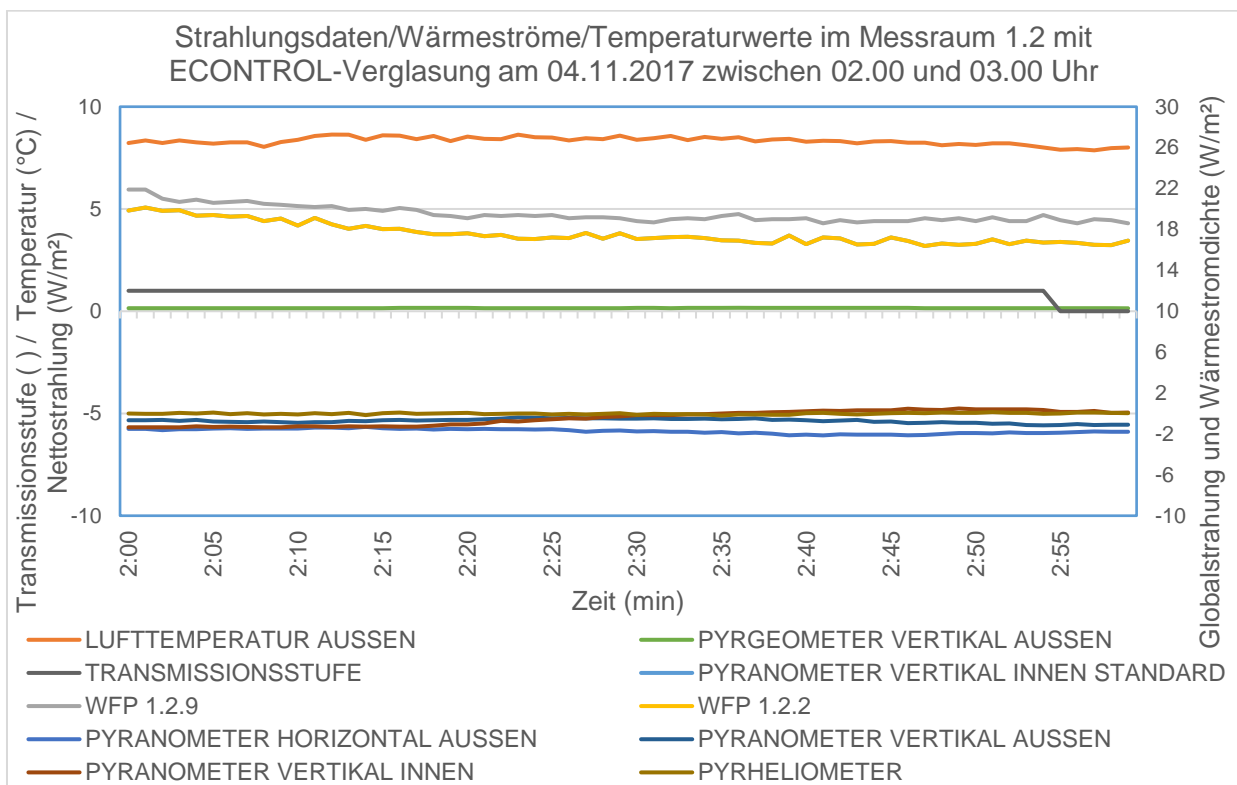


Abbildung 8.11: Strahlungsdaten, Wärmeströme und Temperaturverläufe im Messraum 1.2 mit einer ECONTROL-Verglasung am 04.11.2017 zwischen 02.00 und 03.00 Uhr

## 8.6.2 Tagesintervall

Die folgenden Diagramme beziehen sich auf den Auswertzeitraum von 12:30 Uhr bis 13:00 Uhr am 04.11.2017. Die Verglasung befand sich überwiegend im Schaltzustand 3 und kurzzeitig im Schaltzustand 4 (Abbildung 8.13). Die solare Einstrahlung auf die Fassade lag im Auswertzeitraum zwischen ca. 260 W/m<sup>2</sup> und maximal ca. 700 W/m<sup>2</sup>.

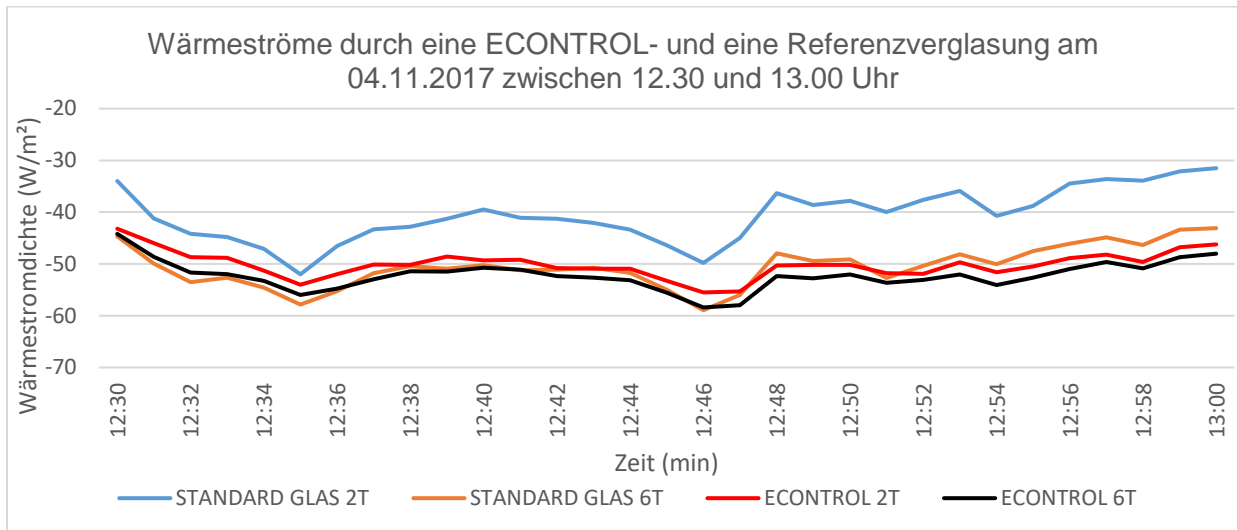


Abbildung 8.12: Wärmeströme durch eine ECONTROL- und eine Referenzverglasung am 04.11.2017 zwischen 12.30 und 13.00 Uhr

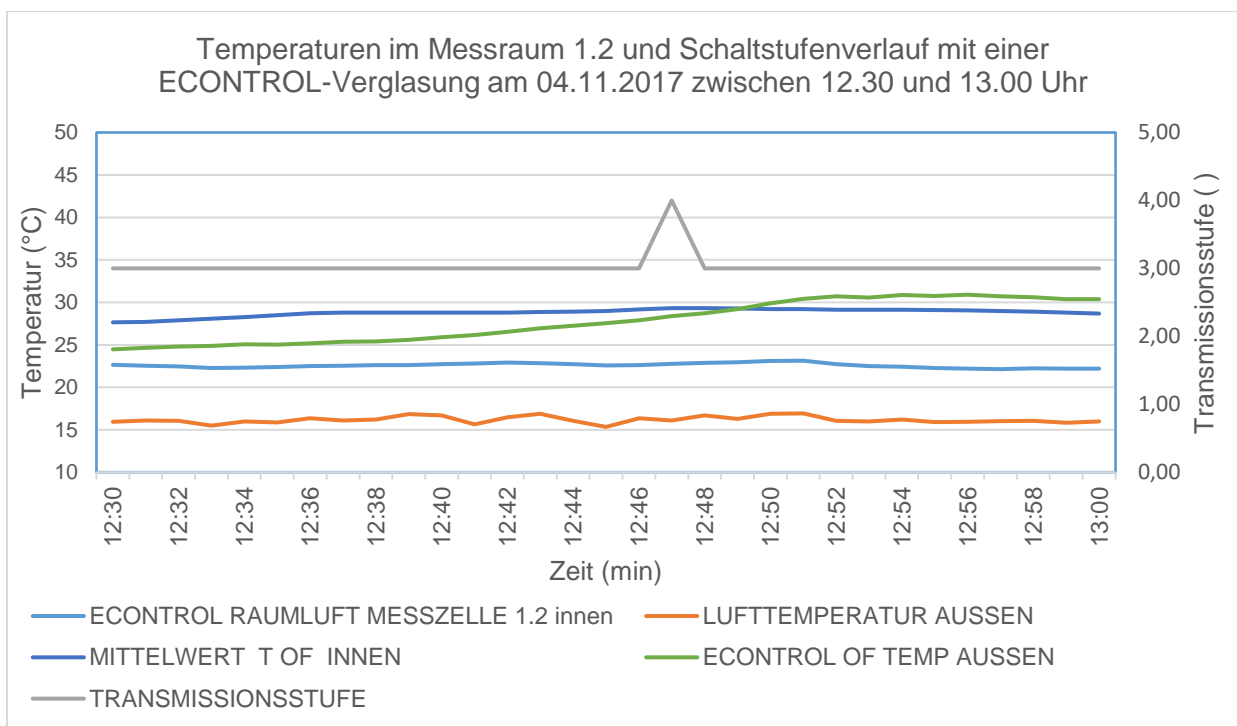


Abbildung 8.13: Temperaturen im Messraum 1.2 und Schaltstufenverlauf einer ECONTROL-Verglasung am 04.11.2017 zwischen 12.30 und 13.00 Uhr

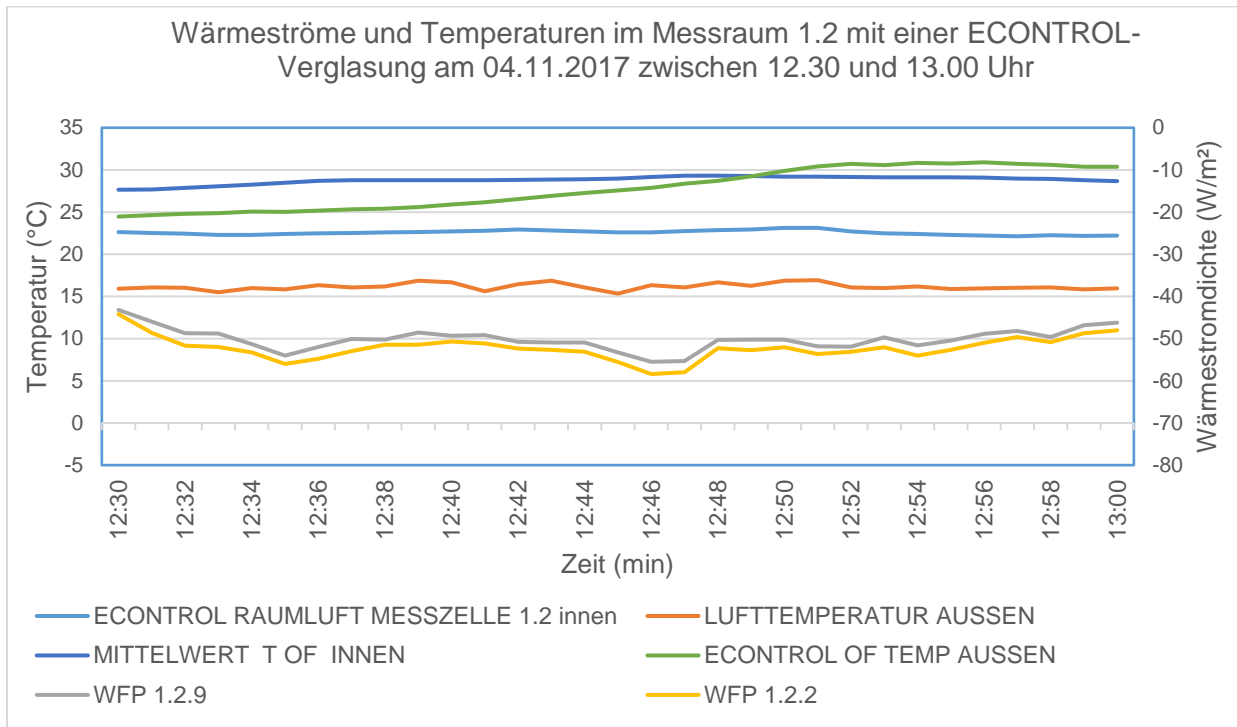


Abbildung 8.14: Wärmeströme durch eine ECONTROL-Verglasung und Temperaturverläufe im Messraum 1.2 am 04.11.2017 zwischen 12.30 und 13.00 Uhr

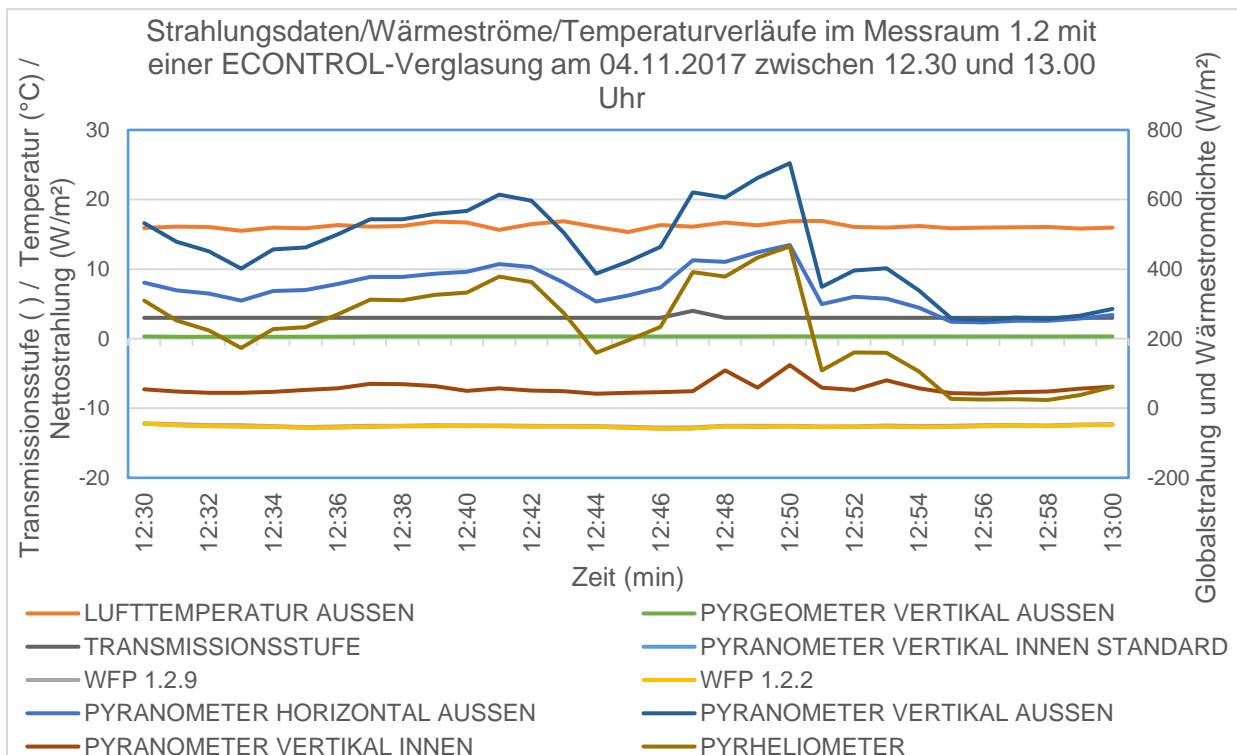


Abbildung 8.15: Strahlungsdaten, Wärmeströme und Temperaturverläufe im Messraum 1.2 mit einer ECONTROL-Verglasung am 04.11.2017 zwischen 12.30 und 13.00 Uhr

## 8.7 Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer elektrochromen Verglasung

Für die in den nachfolgenden U-Wert-Diagrammen dargestellten Werte gilt folgende Bezeichnungs- und Berechnungssystematik:

### U-Wert nach Messdatenauswertung:

Die Berechnung der U-Werte erfolgte unter Verwendung des gemessenen Wärmestromes der Wärmeflussensoren sowie der Lufttemperaturen der Lufträume innen und außen (vgl. Kapitel 3.6). Aufgrund der Strahlungsabsorption der ECONTROL-Verglasung kann es tagsüber zu einer Umkehr des Wärmestromes von der Verglasung in den Messraum kommen, selbst wenn die Innenraumlufttemperatur über der Außenlufttemperatur liegt. Bei der Bestimmung des U-Wertes wurden daher die Beträge des Wärmestromes sowie der Temperaturdifferenz verwendet.

$$U = \frac{|q|}{|T_{innen} - T_{außen}|}$$

### U-Wert nach ISO 9869-1:2014:

Wie bei der Bestimmung des U-Wertes nach der Messdatenauswertung handelt es sich um ein In-situ-Verfahren. Die Berechnungen erfolgten unter Einbeziehung der Bemessungswerte der Wärmeübergangswiderstände (Tabelle 3-1), der Wärmedurchlasswiderstände von ruhenden Luftschichten nach **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** (als Standardverfahren bezeichnet) aus der DIN EN 6946:2018 sowie des gemessenen Wärmedurchgangswiderstandes der Verglasung. Aufgrund der Strahlungsabsorption der elektrochromen Verglasung kam es tagsüber zu einer Umkehr der Wärmestromrichtung. Die Temperatur der absorbierenden Schicht der Verglasung überstieg in diesem Fall die Innenraumlufttemperatur, was einen Wärmestrom in den Innenraum bewirkte. Für die Berechnung des U-Wertes wurden die Beträge der Temperaturdifferenz und des Wärmestromes angesetzt.

$$U = \frac{1}{R_{se} + \frac{|T_{OFwarm} - T_{OFkalt}|}{|q|} + R_{si}}$$

### U-Wert nach CEN:

Die Ermittlung des U-Wertes erfolgte nach der DIN EN 673 und basiert auf einem ausschließlich rechnerischen Ansatz.

### U-Wert nach NFRC:

Die Ermittlung des U-Wertes nach den Vorgaben der Organisation „National Fenestration Rating Council“ der USA basiert auf einem ausschließlich rechnerischen Ansatz.

$T_{innen}$	Innenraumlufttemperatur	[K]
$T_{außen}$	Außenlufttemperatur	[K]
$T_{OFwarm}$	Temperatur der Isolierglasoberfläche auf der Warmseite	[K]
$T_{OFkalt}$	Temperatur der Isolierglasoberfläche auf der Kaltseite	[K]
$q$	Wärmestromdichte	[W/m <sup>2</sup> ]

**TOFi:**

Diese Abkürzung bezeichnet die über den Auswertungszeitraum gemittelte Temperatur an der zum Innenraum gerichteten Fensteroberfläche.

**TOFe:**

Diese Abkürzung bezeichnet die über den Auswertungszeitraum gemittelte Temperatur an der zum Außenbereich gerichteten Fensteroberfläche.

**Delta TOF:**

Dies bezeichnet die Temperaturdifferenz, die bestimmt wurde aus den während des Auswertungszeitraums gemittelten Temperaturwerten der Oberflächentemperatur des Fensters außen (TOFe) und der Oberflächentemperatur des Fensters innen (TOFi).

$$\text{Delta TOFi} = \text{TOFi} - \text{TOFe}$$

In Abbildung 8.16 sind die U-Werte basierend auf den Messungen und den Berechnungen dargestellt. Zu beachten ist hierbei, dass bei der Messung am Tage die Wärmestromrichtung nach innen zeigte.

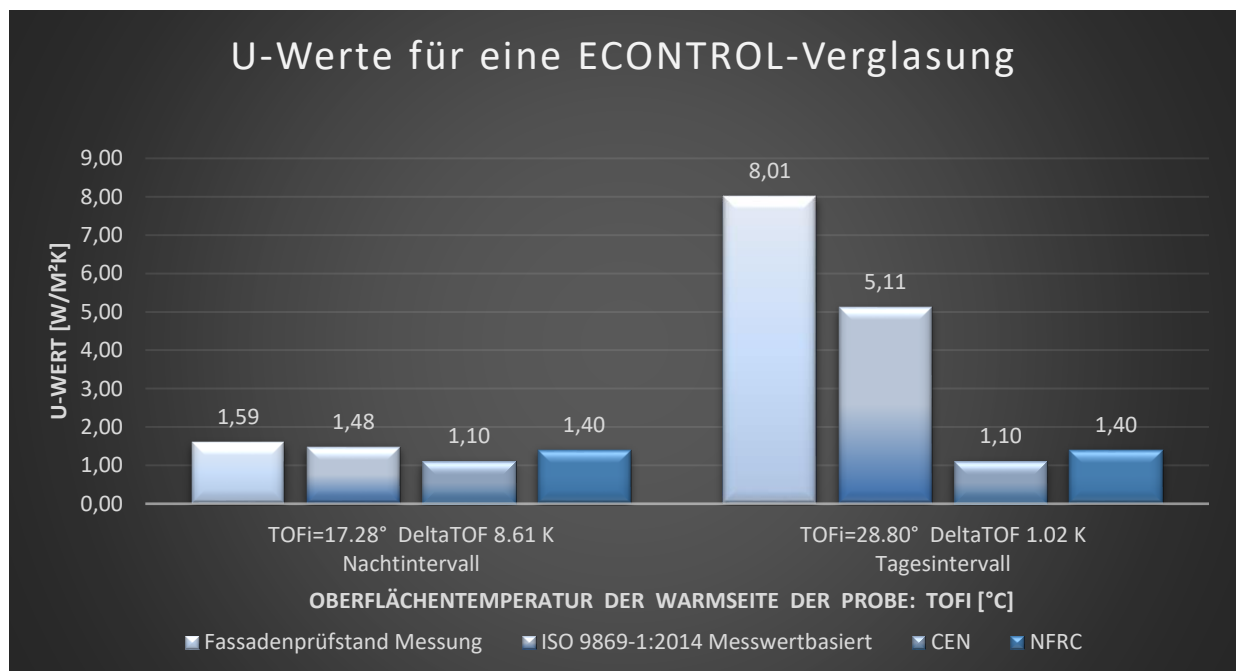


Abbildung 8.16: Zusammenfassung der ermittelten U-Werte für die ECONTROL-Verglasung



## 8.8 Interpretation und Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen

Nachfolgen dargestellt sind die absoluten sowie die relativen Abweichungen zwischen den unterschiedlich bestimmten U-Werten für die ECONTROL-Verglasung.

Tabelle 8-3: Absolute Abweichungen der Messergebnisse untereinander in W/m<sup>2</sup>K

Nachtintervall					Tagesintervall				
U-Werte	1,59	1,48	1,10	1,40	U-Werte	8,01	5,11	1,10	1,40
Messung: 1,59		0,11	0,49	0,19	Messung: 8,01		2,90	6,91	6,61
ISO 9868: 1,48			0,38	0,08	ISO 9868: 5,11			4,01	3,71
CEN: 1,10				0,30	CEN: 1,10				0,30
NFRC: 1,40					NFRC: 1,40				

Tabelle 8-4: Relative Abweichungen [%] der Messergebnisse (relativ zum Wert nach ISO 9868-1:2014 der Nachtauswertung)

Nachtintervall					Tagesintervall				
U-Werte	1,48	1,48	1,48	1,48	U-Werte	1,48	1,48	1,48	1,48
Messung: 1,59	6,76				Messung: 8,01	441,2			
ISO 9868: 1,48					ISO 9868: 5,11		245,27		
CEN: 1,10			25,68		CEN: 1,10			25,68	
NFRC: 1,40				5,41	NFRC: 1,40				5,41

Bei der Auswertung für den Nachtfall ist ersichtlich, dass die messwertbasierten U-Werte verglichen mit den berechneten U-Werten nach CEN (DIN EN 673) oder nach NFRC höher ausfallen. Die geringste Abweichung ergibt sich zwischen dem ermittelten U-Werte nach ISO-9869-1:2014 und dem Wert nach NFRC.

Für den Tagesfall hingegen ergeben sich sehr große Abweichungen zu den rechnerisch bestimmten U-Werten nach CEN (DIN EN 673) und NFRC sowie zu den Messungen des Wärmedurchgangs während der Nacht. Die Ursache hierfür ist in Abbildung 8.14 ersichtlich. Ein Teil der solaren Strahlung wird durch die ECONTROL-Verglasung absorbiert. Diese erwärmt sich dabei über die Innenlufttemperatur hinaus mit der Folge, dass sich der Wärmestrom in der Verglasung umkehrt und die Energie aus der aufgewärmten Verglasung in das Rauminere fließt.

Der U-Wert weist somit signifikante Schwankungen im Tagesverlauf auf, welche wesentlich auf den Einfluss der Absorption solarer Strahlungen zurückzuführen sind. Berechnungsansätze nach CEN (DIN EN 673) und NFRC berücksichtigen diese Einflüsse nicht und führen zu deutlich anderen Werten als die Messungen. Zur Ermittlung des Einflusses der Wärmeflussplatten auf den absorbierten Strahlungsanteil bedarf es in diesem Zusammenhang weiterer Abschätzungen oder Untersuchungen, da im Bereich der Wärmeflussplatten die Absorption gegenüber den anderen Verglasungsbereichen verändert ist. Dies führt zu einem Fehler beim absorbierten Strahlungsanteil. Der absorbierte Energieanteil wird überschätzt werden. Der Effekt eines Wärmestroms von der Verglasung in den Raum ist bei absorbierenden, schaltbaren Verglasungen umso ausgeprägter, je dunkler die Verglasung geschaltet wird. Er wird zudem beeinflusst von den Eigenschaften der Glasoberflächen und etwaiger Beschichtungen darauf.

## 9 U-Wert-Bestimmung mit dem greenTEG-System gSKIN KIT-2615C

Neben den Messungen an mehrlagigen Systemen mit der Messausstattung des ILEK wurden im Projektverlauf exemplarische Messungen mit einem Messdatenerfassungssystem der Schweizer Firma greenTEG AG durchgeführt.

In den folgenden Kapiteln werden sowohl das Messverfahren dieses Datenerfassungssystems (Kapitel 9.1) als auch die Messergebnisse vorgestellt, die sich beim Einsatz in der Hotbox an textilen Mehrlagensystemen (Kapitel 9.2) und im Fassadenprüfstand an schaltbaren Verglasungen (Kapitel 9.3) ergeben haben.

### 9.1 U-Wert-Messverfahren des greenTEG-Systems

Das nachfolgend beschriebene Mess- und Auswerteverfahren wird zur Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften des greenTEG-Systems (Abbildung 9.1) verwendet. Bei diesem System handelt es sich um ein kompaktes Mess-Kit, das es u.a. Bauphysikern und Gutachtern ermöglicht, schnell und einfach In-situ-Messungen zur U-Wert-Ermittlung von Gebäudehüllen und Bauteilen durchzuführen.



Abbildung 9.1: Koffer mit greenTEG-gSKIN KIT-2615C-Komponenten, bestehend aus Datenlogger, Sensoren und Zubehör (Quelle: greenTEG AG)

Die Beschreibung des Verfahrens basiert auf den Angaben des Herstellers in der Gebrauchsanleitung für das System ([https://shop.greenteg.com/wp-content/uploads/gSKIN\\_U-Wert-KIT\\_Gebrauchsanleitung\\_SW\\_V1.02.04.pdf](https://shop.greenteg.com/wp-content/uploads/gSKIN_U-Wert-KIT_Gebrauchsanleitung_SW_V1.02.04.pdf)).

Mit der gSKIN-Wärmeflussplatte wird der momentane Wärmefluss durch die Messfläche bestimmt. Die beiden Temperatursensoren des Mess-Kits messen die Innenluft- sowie die Außenlufttemperatur. Alle drei Sensoren sind an einen Datenlogger angeschlossen, der während der Messungen in regelmäßigen Zeitabständen die Messdaten erfasst und speichert.

Der U-Wert wird während der gesamten Messdauer mit folgender Formel berechnet:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_j (T_{ij} - T_{aj})} \quad \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad \text{Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)}$$

$$q \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad \text{Wärmestromdichte}$$

$$T_i \quad [^{\circ}C] \quad \text{Innenraumlufttemperatur}$$

$$T_a \quad [^{\circ}C] \quad \text{Außenraumlufttemperatur}$$

Der von der Programmsoftware bestimmte U-Wert basiert auf einer Summenbildung der gemessenen Wärmestromdichten im Analysezeitraum. Dieser unterscheidet sich vom Messzeitraum dadurch, dass der Analysezeitraum den Zeitraum umfasst, der sich als größtes ganzzahliges Vielfaches von 24 Stunden der Messperiode ergibt. Da der Analysezeitraum im Allgemeinen kürzer ist als die gesamte Messperiode, wird ein Teil der Messdaten verworfen und geht nicht in die U-Wert-Ermittlung ein. Verworfen werden dabei die am Beginn der Messperiode ermittelten Messwerte. Das Messverfahren basiert auf der Norm ISO 9869-1:2014 „Thermal insulation – Building elements – In-situ-measurement of thermal resistance and thermal transmittance“. Diese Norm definiert die Gültigkeit einer Messung unter folgenden Bedingungen:

- Messdauer mindestens 72 Stunden
- in den letzten 24 Stunden eine Genauigkeit der Messung des U-Wertes besser als 5 % ( $dU_{24} < 5\%$ )

Laut der Norm ISO 9869-1:2014 kann bis zu einer Abweichung von  $\pm 20\%$  von einer „Übereinstimmung“ zwischen den gemessenen und berechneten U-Werten gesprochen werden.

## 9.2 Exemplarische U-Wert-Messungen mit dem greenTEG-System an einem zweilagigen textilen Aufbau mit Funktionslage in der ILEK-Hotbox

Eine Probe eines Mehrlagenaufbaus wurde mit dem Messsystem der Firma greenTEG ausgestattet und in der Hotbox untersucht. Bei dem Lagenaufbau handelte es sich um ein zweilagiges System mit Funktionszwischenlage, bestehend aus zwei äußeren Membranen (PES-PVC der Firma Verseidag vom Typ B4915) und einem Glasfasergespinnst als transluzente, wärmedämmende Zwischenlage (Glasfasergespinnst: Wacotec TIMax GL-Plus F) wie in Abbildung 9.2 dargestellt. Ergänzend zur bestehenden messtechnischen Infrastruktur der Hotbox wurden aus dem greenTEG-Mess-Kit jeweils ein Temperatursensor im Luftraumbereich sowohl der Warm- als auch der Kaltseite installiert und die Wärmeflussplatte auf der Membranoberfläche der Warmseite befestigt.

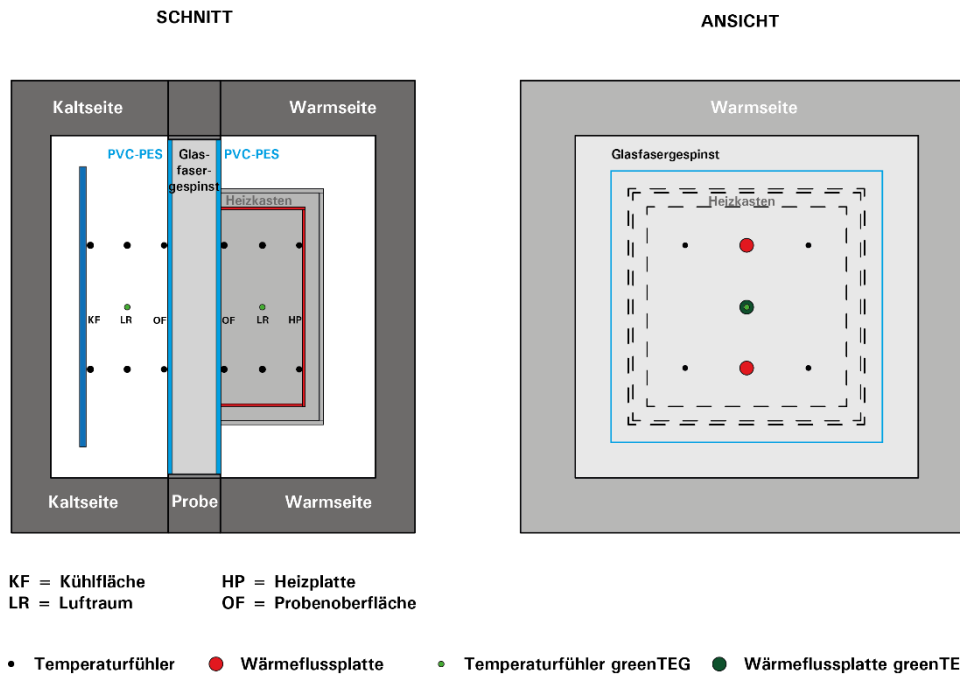


Abbildung 9.2: Sensoranordnung in der Hotbox bei der Probe bestehend aus PES-PVC/Glasfasergespinnst. Links: Längsschnitt durch die Hotbox. Rechts: Ansicht auf die Warmseite der Hotbox.

Die Messungen erfolgten analog zu den bisherigen Hotboxversuchen, wobei nach dem Erreichen konstanter Luftraumtemperaturen in der Hotbox am Ende der jeweiligen Messperioden die messtechnische Datenauswertung eines Zeitraums von ungefähr einer Stunde erfolgte. Für die Messdaten des greenTEG-Systems erfolgte die Auswertung für den oben definierten Analysezeitraum sowie ebenfalls für den Zeitraum der letzten Stunde des jeweiligen Versuchs. In Abbildung 9.3 sind die Wärmestromdichten beider Messdatenerfassungssysteme für das gesamte Messintervall 1 abgebildet. In Abbildung 9.4 und Abbildung 9.5 sind die Temperaturverläufe im Luftraum der Kalt- bzw. der Warmseite dargestellt.

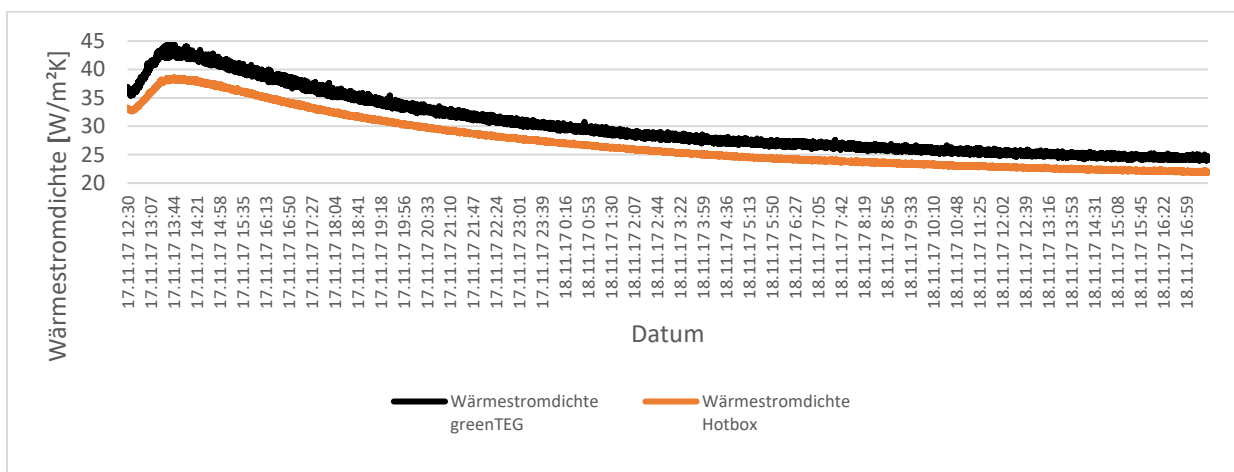


Abbildung 9.3: Gemessene Wärmestromdichten (Hotbox-Messsystem sowie greenTEG-System)

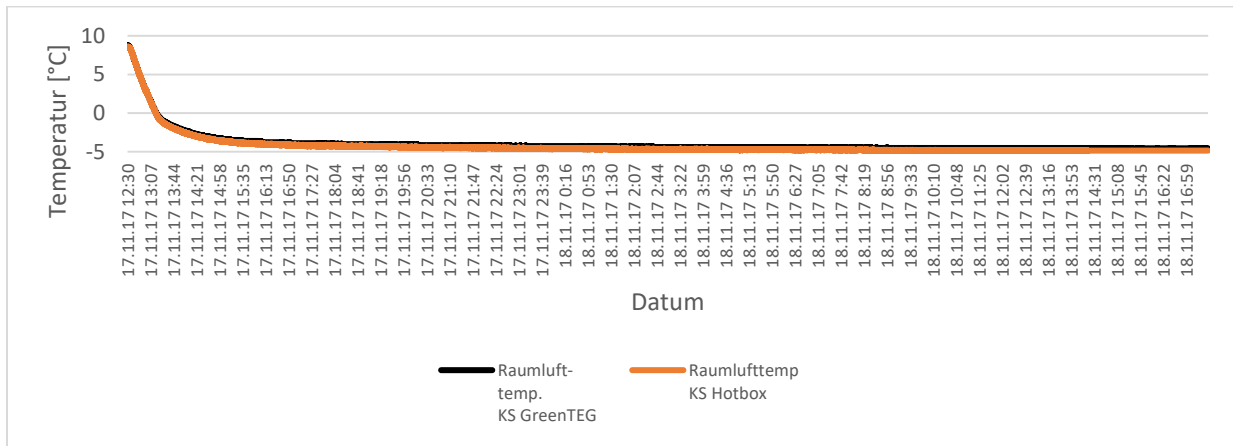


Abbildung 9.4: Gemessene Lufttemperaturen auf der Kaltseite (Hotbox-Messsystem sowie greenTEG-System)

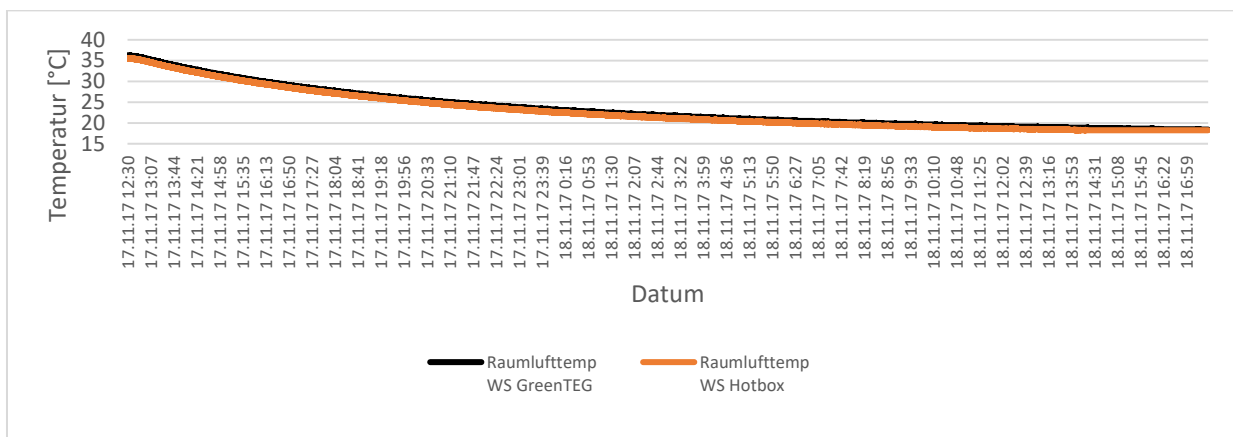


Abbildung 9.5: Gemessene Lufttemperaturen auf der Warmseite (Hotbox-Messsystem sowie greenTEG-System)

Ziel der Untersuchungen war es, durch eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Auswertungsverfahren (Hotbox- greenTEG) für ein zweilagiges System mit Funktionswerkstoff geringer thermischer Speichermasse mögliche Messunterschiede herauszufinden. Die Ergebnisse von vier Einzelmessungen (1, 2, 4, 5) sind in Tabelle 9-1. zusammengefasst. Dort finden sich für alle vier durchgeführten Versuche die Auswertungsergebnisse der Daten des Hotbox-Messsystems und des greenTEG-Systems. Anwendung fanden die jeweiligen Berechnungsmethoden. Da bei den Versuchen in der Hotbox die Temperaturvorgabewerte der Warm- und der Kaltseite im Messzeitraum konstant waren, wurde nach einer gewissen Zeitspanne ein stationärer Zustand erreicht. Aufgrund der geringen thermischen Speicherfähigkeit des Lagenaufbaus war dies bereits nach etwa einem Tag der Fall. Da nur sehr geringe Temperaturschwankungen in den Lufträumen der Warm- und der Kaltseite zu verzeichnen waren, konnte die Mindestmessdauer von 72 Stunden nach ISO 9869-1:2014 bei den Versuchen in der Hotbox deutlich unterschritten werden.

Für die Berechnung der 1/R- sowie der U-Werte basierend auf der Messtechnik der Hotbox wurde ein kurzer Zeitraum (ca. 1 Stunde) am Ende jedes Versuchs herangezogen.

Für die Auswertung der Messdaten des greenTEG-Systems wurde ebenfalls ein Zeitraum von ca. einer Stunde am Ende der jeweiligen Messperiode herangezogen (U-mess-GT1). Zusätzlich sind in Tabelle 9-1 auch die Werte, die mit der greenTEG-Software im analysierten Zeitraum ermittelt wurden (U-mess-GT2), dargestellt. Diese zeigen meist etwas höhere U-Werte als die Auswertungen der letzten Stunde der Messperiode, da hierbei auch die größeren Wärmeströme zu Beginn des jeweiligen Versuches in die Berechnungen eingingen. Die U-Werte der letzten Auswertestunde sind als die realistischeren Werte anzusehen.

Tabelle 9-1: Auswertungsergebnisse von vier Messintervallen in der Hotbox

Bezeichnung		1	2	4	5	Einheit	Berechnungsmethode
Auswertung Hotbox (HB)							
q HB	Wärmestromdichte	22.86	25.89	27.54	33.19	[W/m <sup>2</sup> ]	$q=(q \text{ WFP } 1+ q \text{ WFP } 2)/2$
1/R HB	Wärmedurchlasskoeffizient	1.18	1.32	1.44	1.63	[W/m <sup>2</sup> K]	$1/R=0.5*(q \text{ WFP } 1+ q \text{ WFP } 2)/\Delta T \text{ OF}$
U-mess-HB (vgl. Kap. 5.3.3)	Wärmedurchgangskoeffizient	0.967	1.057	1.113	1.224	[W/m <sup>2</sup> K]	$U=0.5*(q \text{ WFP } 1+ q \text{ WFP } 2)/\Delta T \text{ LR}$
Auswertung greenTEG (GT)							
q GT (während der analysierten Zeitdauer)	Wärmestromdichte	24.48	26.38	30.46	36.32	[W/m <sup>2</sup> ]	q WFP greenTEG
U-mess-GT1 (nur Messwerte der letzten Messstunde berücksichtigt)	Wärmedurchgangskoeffizient	1.064	1.157	1.235	1.315	[W/m <sup>2</sup> K]	$U\text{-Wert}=\sum_{j=1}^n q_j/\Delta T_j \text{ LR greenTEG}$ (Messwerte der letzten Stunde der Messung)
U-mess-GT2 (während der analysierten Zeitdauer)	Wärmedurchgangskoeffizient	1.105	1.148	1.267	1.317	[W/m <sup>2</sup> K]	$U\text{-Wert}=\sum_{j=1}^n q_j/\Delta T_j \text{ LR greenTEG}$ (Messwerte der analysierten Zeitdauer der Messung)
Analysierte Zeitdauer GT [tt.mm.jjjj:hh:mm:ss]		17.11.2017:12:30:19 bis 18.11.2017:17:36:28	18.11.2017:17:41:57 bis 19.11.2017:18:09:16	06.11.2017:19:12:44 bis 07.11.2017:15:31:39	13.11.2017:15:44:35 bis 14.11.2017:13:06:32		
Vergleich der Wärmestromdichten							
Differenzbetrag q HB - q GT	Differenz	-1.62	-0.49	-2.92	-3.13	[W/m <sup>2</sup> ]	q Hotbox - q greenTEG
	Abweichung	7.09	1.89	10.60	9.43	[%]	$\left  \frac{q_{HB} - q_{GT}}{q_{HB}} \right  * 100$
Vergleich der U-Werte							
Differenzbetrag U-mess-HB – U-mess-GT1	Differenz	-0.10	-0.10	-0.12	-0.09	[W/m <sup>2</sup> ]	U-mess-HB – U-mess-GT1

	Abweichung	10.00	9.47	10.93	7.42	[%]	$\left  \frac{U_{\text{messHB}} - U_{\text{messGT1}}}{U_{\text{messHB}}} \right  * 100$
Differenzbetrag U-mess-HB – U- mess-GT2	Differenz	-0.14	-0.09	-0.15	-0.09	[W/m <sup>2</sup> ]	U-mess-HB – U-mess-GT2
	Abweichung	14.32	8.60	13.88	7.57	[%]	$\left  \frac{U_{\text{messHB}} - U_{\text{messGT2}}}{U_{\text{messHB}}} \right  * 100$

Dabei gilt folgende Bezeichnungssystematik:

WFP 1 : Wärmeflussplatte 1 des Hotbox-Messsystems

WFP 2 : Wärmeflussplatte 2 des Hotbox-Messsystems

q : Wärmestromdichte [W/m<sup>2</sup>]

$\Delta T_{\text{OF}}$  : Temperaturdifferenz der Oberflächentemperaturen der Probe  
(Warmseite-Kaltseite) [K]

$\Delta T_{\text{LR}}$  : Temperaturdifferenz der Lufttemperaturen (Warmseite-Kaltseite) [K]

R : Wärmeübergangswiderstand [(m<sup>2</sup>K)/W]

U : Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup>K)]

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die U-Werte, die aus den Daten des greenTEG-Systems (U-mess-GT1) und der Hotbox-Messsensorik ermittelt wurden, für die Auswertung der Daten der letzten Stunde der jeweiligen Messperiode eine gute Übereinstimmung zeigen. Die maximale, relative Differenz zwischen den ermittelten U-Werten beläuft sich auf 10,93 % (Tabelle 9-1).

Werden für den Vergleich die ermittelten U-Werte des greenTEG-Systems im gesamten gemessenen jeweiligen Zeitraum (für die Versuche ist dieser identisch mit dem jeweils analysierten Zeitraum) herangezogen (U-mess-GT2) und mit den Werten des Hotbox-Messsystems verglichen, so zeigen sich größere Abweichungen. Diese resultieren aus der Tatsache, dass der Einfluss des instationären Temperaturbereichs zu Beginn der Messung sich negativ auf die Abweichungen auswirkt. Die maximale relative Abweichung beträgt dann 14,32 %.

Da bei allen Sensoren Messtoleranzen berücksichtigt werden müssen, relativieren sich die Abweichungen. Die Hotbox-Wärmeflussplatten, wie auch die greenTEG-Wärmeflussplatten weisen jeweils einen Kalibrierfehler von ca. 3 % auf. Dies ist für Wärmeflussplatten ein guter Wert der erreichbaren Präzision. Alleine aus dieser Tatsache kann bereits eine Abweichung zwischen den Messwerten beider Systeme von bis zu ca. 6 % resultieren (Überlagerung der ungünstigsten Konstellation). Zudem beeinflussen auch die Messgenauigkeiten der Temperatursensoren der jeweiligen Systeme die Messungen. Abweichungen der ermittelten U-Werte im Bereich von maximal 15 % stellen daher ein gutes Ergebnis dar. Die ermittelten U-Werte sind vergleichend dargestellt in Abbildung 9.6.

Die Erhöhung der ermittelten U-Werte bei höheren Werten der Oberflächentemperaturen wurde bereits in Kapitel 5 erläutert.

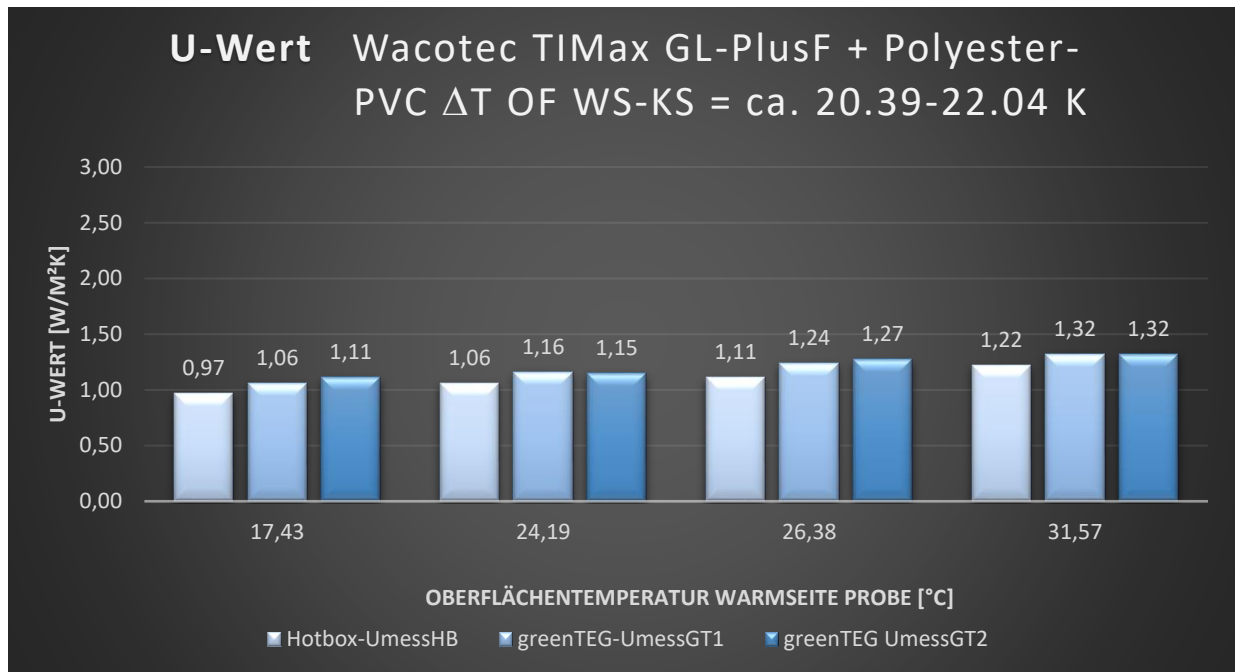


Abbildung 9.6: Vergleich der U-Werte aus Hotbox-Messungen mit den unterschiedlichen Messsystemen und Berechnungsverfahren. Ermittelt bei unterschiedlichen Oberflächentemperaturen.

Es lässt sich feststellen, dass dank der guten Übereinstimmung der Messwerte beider Loggingsysteme das greenTEG-System in hohem Maße geeignet erscheint für schnelle und flexible Messungen, insbesondere bei In-situ-Anwendungen in der Baupraxis.

### 9.3 Exemplarische U-Wert-Messungen mit dem greenTEG-System an einer schaltbaren Flüssigkristall-Verglasung im ILEK-Fassadenprüfstand

Zur In-situ-Messung des U-Wertes einer schaltbaren Verglasung wurde das greenTEG-System verwendet. Hierfür erfolgten Untersuchungen an einer Testverglasung im ILEK-Fassadenprüfstand über einen Zeitraum von ungefähr zwei Wochen. Die Temperatursensoren wurden so befestigt, dass die Lufttemperaturen innen und außen erfasst werden konnten. Zur Messung des Wärmestroms kam die Wärmeflussplatte auf der dem Innenraum zugewandten Scheibe der Verglasung zum Einsatz.

Es handelte sich dabei um eine Isolierverglasung mit integrierten, schaltbaren Elementen. Die Gesamtfläche war unterteilt in einzeln ansteuerbare kleine Bildflächen (insgesamt 16416). Die einzelnen Bildflächen (Pixel) können in 16 unterschiedliche Lichtdurchlässigkeitswert geschaltet werden, um die Helligkeit im Innenraum zu regulieren. Zudem ist durch eine partielle Abdunkelung die Vermeidung von Blendung möglich. Mit Hilfe des greenTEG-Systems konnten Messdaten zur Bestimmung des U-Werts generiert werden.

Das Funktionsprinzip der schaltbaren Verglasung basiert auf einer in der Bildschirmtechnik entwickelten Technologie der sogenannten TN-Zelle (engl. twisted nematic cell). Diese besteht



aus einer nur wenige Mikrometer dünnen Schicht eines nematischen Flüssigkristalls, die sich im Zwischenraum zweier Glasscheiben befindet. Durch Anlegen einer geringen elektrischen Spannung kann der Licht- und Energiedurchgang durch diese Zelle geregelt und somit die Transmissionseigenschaft der damit ausgestatteten Verglasung verändert werden. Charakteristisch für die untersuchte TN-Verglasung ist die Strukturierung in viele ansteuerbare Flächen. Im Gegensatz dazu werden bisher andere adaptive Verglasungssysteme großflächig verdunkelt. Die kleinteilige Strukturierung erlaubt beispielsweise eine partielle Fassadenverdunkelung und eröffnet damit das Potenzial, eine dem tageszeitabhängigen Sonnenstand angepasste Verdunkelung der Verglasung zu implementieren, so dass der Innenraum optimal ausgeleuchtet wird. Gleichzeitig kann Blendung vermieden werden. Exemplarische Schaltzustände mit adaptiven Verschattungsszenarien sind in Abbildung 9.7 dargestellt.

Die untersuchte Verglasung wurde im Forschungsprojekt „Intelligente, interaktive und integrative (i<sup>3</sup>) Fassadenverglasung für Sonnenschutzanwendungen“ entwickelt und optimiert. Die Förderung des Projekts erfolgte durch die Baden-Württemberg Stiftung im Rahmen des Forschungsprogramms „Nachhaltiges Bauen“. Das ILEK und das Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme (VIS) der Universität Stuttgart führten die Forschung gemeinsam durch.



Abbildung 9.7: Exemplarische Schaltzustände einer TN-Verglasung mit vertikal gradier-tem Verlauf (links: Außenansicht) und zeitgesteuerter Sonnenstandsnachführung (rechts: Sequenz einzelner Innenansichten der Verglasung mit Verdunkelung im Bereich der Sonne)

Die messtechnische Erfassung der TN-Verglasung erfolgte während zweier Messintervalle. Die Messungen im Messintervall 1 wurden durchgeführt vom 5.12.2017 bis zum 12.12.2017. Hierbei war die Verglasung ganzflächig auf maximale Transmission geschaltet. Während des Messintervalls 2, vom 12.12.2017 bis zum 15.12.2017, wurde hingegen die gesamte Verglasung auf maximale Abdunkelung eingestellt. Ziel der Messungen war es, repräsentative U-Werte der Testverglasung für den Winterzeitraum in Abhängigkeit vom Schaltzustand und den Außenklimabedingungen zu ermitteln.

In den folgenden beiden Diagrammen sind die Messdaten für den Messzeitraum 1 (Abbildung 9.8) und für den innerhalb dieses Messzeitraums liegenden Auswertungszeitraums in der Nacht des 9.12.2017 (Abbildung 9.9) dargestellt. Bei der Betrachtung des gesamten Versuchszeitraums der Messung 1 fällt auf, dass der fortlaufend ermittelte U-Wert ( $U_j = q_j / \Delta T_j LR$ ) im Zeitraum der solaren Einstrahlung auf die Verglasung deutlich von den jeweiligen Werten der Nachtmessungen abweicht. Es kommt dabei auch zu einer Umkehrung der Wärmestromrichtung aufgrund der Aufheizung der Verglasung und der Wärmeflussplatte. Daraus resultiert die Wärmeabgabe an den Innenraum. Zudem ist eine Vergrößerung des U-Wertes während der Beheizung des Innenraums zu erkennen.

Wird der U-Wert aus der Summenbildung der Messdaten während der gesamten Nacht (1 Stunde nach Sonnenuntergang bis zum Sonnenaufgang) aller vermessenen Nächte bestimmt, so ergeben sich Werte, die größer sind als die U-Werte der jeweils im einstündigen Auswertungszeitraum einer Nacht ermittelten Werte. Die entsprechende Übersicht findet sich in Tabelle 9-2. Die U-Werte sind grafisch dargestellt in Abbildung 9.12.

Für den Messzeitraum 2 sind die Messdaten für den gesamten Versuch vom 12.12.2017 bis 15.12.2017 in Abbildung 9.10 dargestellt. Die Daten der einstündigen Nachtperiode sind in Abbildung 9.11 aufgetragen. Auch im zweiten Messzeitraum ist der oben beschriebene Effekt der Wärmestromumkehr bei solarer Einstrahlung und einer U-Wertvergrößerung beim Nachheizen des Innenraums zu erkennen.

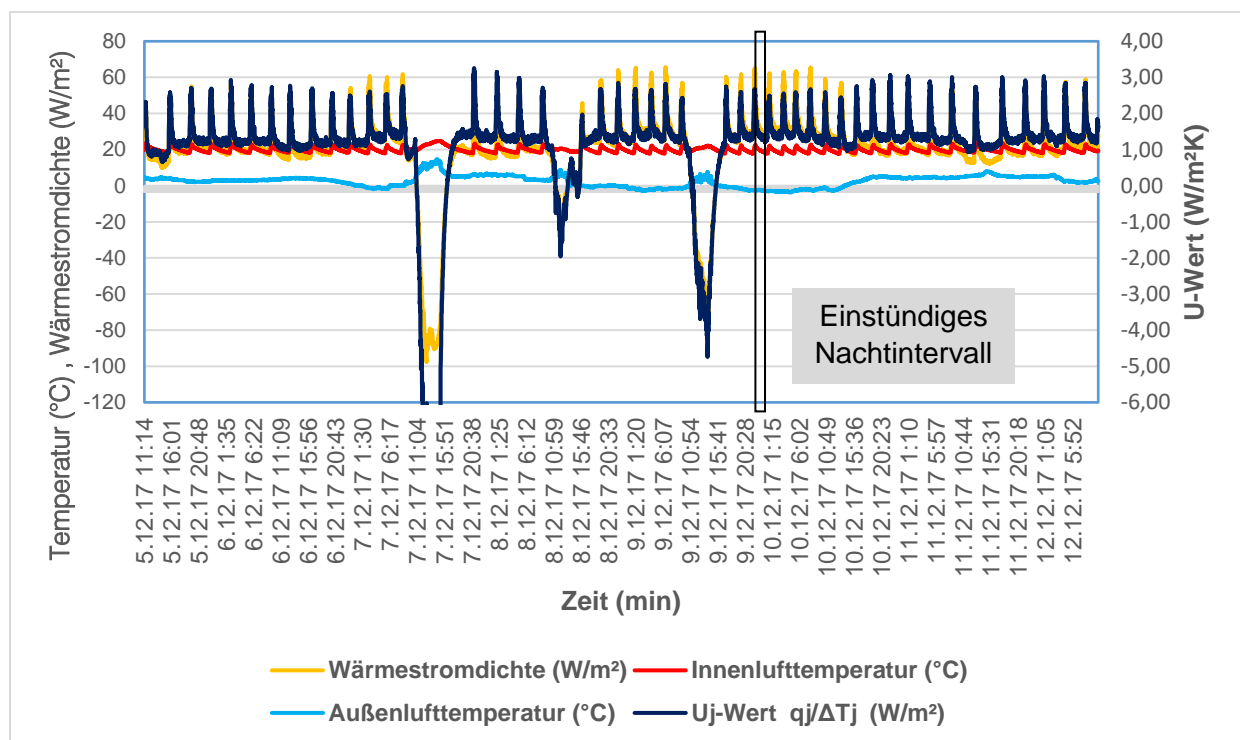


Abbildung 9.8: Messintervall 1: Darstellung der Messdaten und des ermittelten messwertbasierten U-Wertes der adaptiven Verglasung

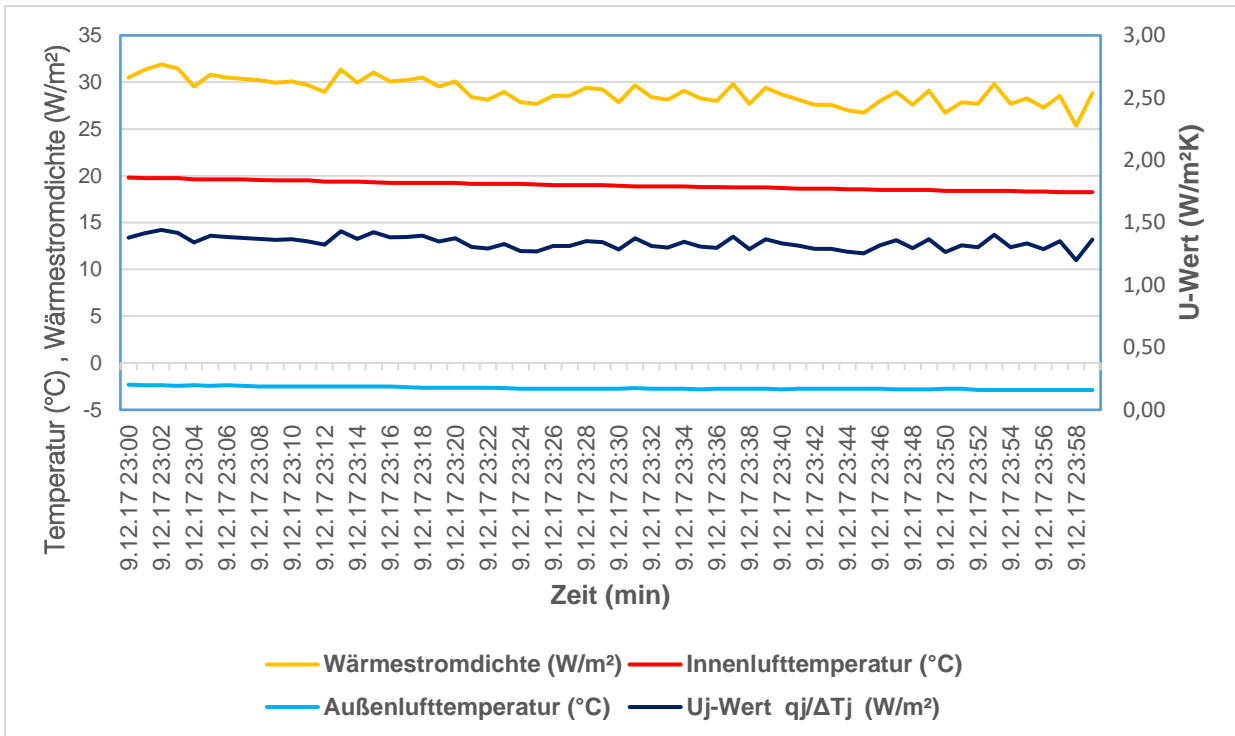


Abbildung 9.9: Einstündiges Nachtintervall im Messintervall 1: Darstellung der Messdaten und des ermittelten messwertbasierten U-Wertes der adaptiven Verglasung

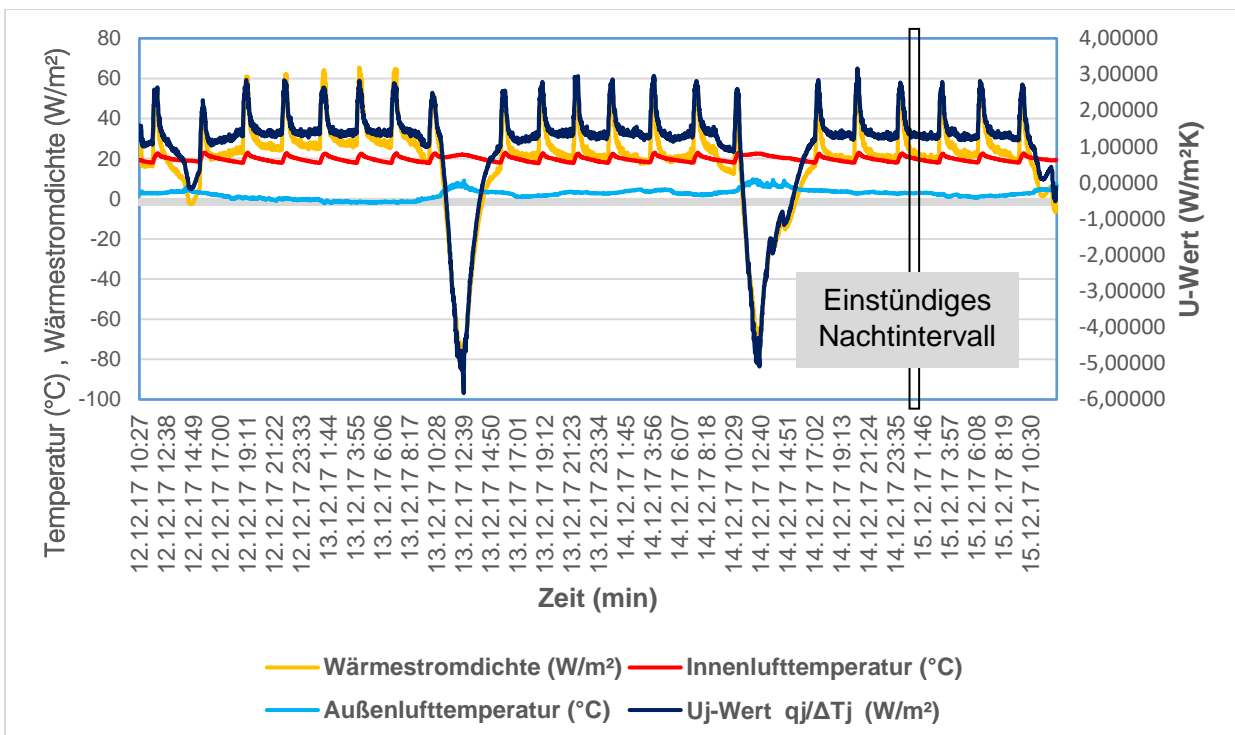


Abbildung 9.10: Messintervall 2: Darstellung der Messdaten und des ermittelten messwertbasierten U-Wertes der adaptiven Verglasung

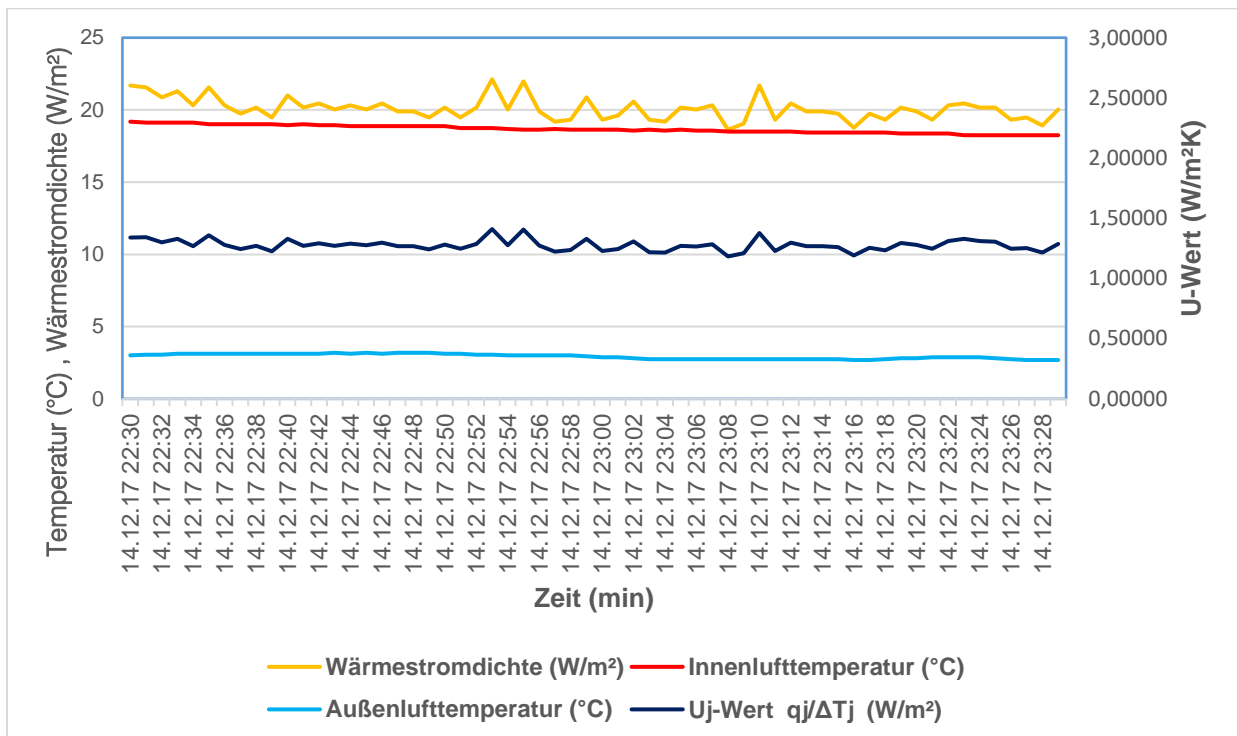


Abbildung 9.11: Einstündiges Nachtintervall im Messintervall 2: Darstellung der Messdaten und des ermittelten messwertbasierten U-Wertes der adaptiven Verglasung

Der nach der DIN EN 673 berechnete Wärmedurchgangskoeffizient der adaptiven TN-Verglasung liegt bei  $U=1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Die auf der Basis der einstündigen Nachtintervalle jeweils ermittelten U-Werte ergeben sich zu  $1,34 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  sowie zu  $1,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Sie liegen damit sehr nahe beim berechneten Wert. Die durch die Auswertung aller Nachtzeiträume jeweils ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten liegen bei  $U=1,51 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  sowie bei  $U=1,57 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Diese gegenüber den einstündigen Messintervallen höheren U-Werte resultieren aus den Effekten der nächtlichen Heizvorgänge und der dabei beobachteten U-Wertzunahme.

Tabelle 9-2: Vergleich der Auswertungsergebnisse der adaptiven TN-Verglasung basierend auf den Messdaten des greenTEG-Systems

i <sup>3</sup> Verglasung – Messungen mit greenTEG-Messsystem	Messintervall 1	Messintervall 2
Versuchszeitraum	Datum-Uhrzeit	Datum-Uhrzeit
von	05.12.2017 11:14	12.12.2017 10:27
bis	12.12.2017 10:19	15.12.2017 12:34
Einstündiger, nächtlicher Auswertungszeitraum	Datum-Uhrzeit	Datum-Uhrzeit
von	09.12.2017 23:00	14.12.2017 22:30
bis	09.12.2017 23:59	14.12.2017 23:29
Mittlere Wärmestromdichte aller Nachtzeiträume im Messintervall (W/m <sup>2</sup> )	26.77	28.42
Mittlere Innenlufttemperatur aller Nachtzeiträume im Messintervall (°C)	19.73	19.74
Mittlere Außenlufttemperatur aller Nachtzeiträume im Messintervall (°C)	1.99	1.60
Mittlere Temperaturdifferenz zwischen innen und außen aller Nachtzeiträume im Messintervall (K)	17.73	18.14
U-Wert ermittelt über alle Nachtzeiträume (als U-GT3 bezeichnet) (W/(m <sup>2</sup> K))	1.51	1.57
U-Wert nur einstündiges Nachtintervall (als U-GT4 bezeichnet) (W/(m <sup>2</sup> K))	1.34	1.28

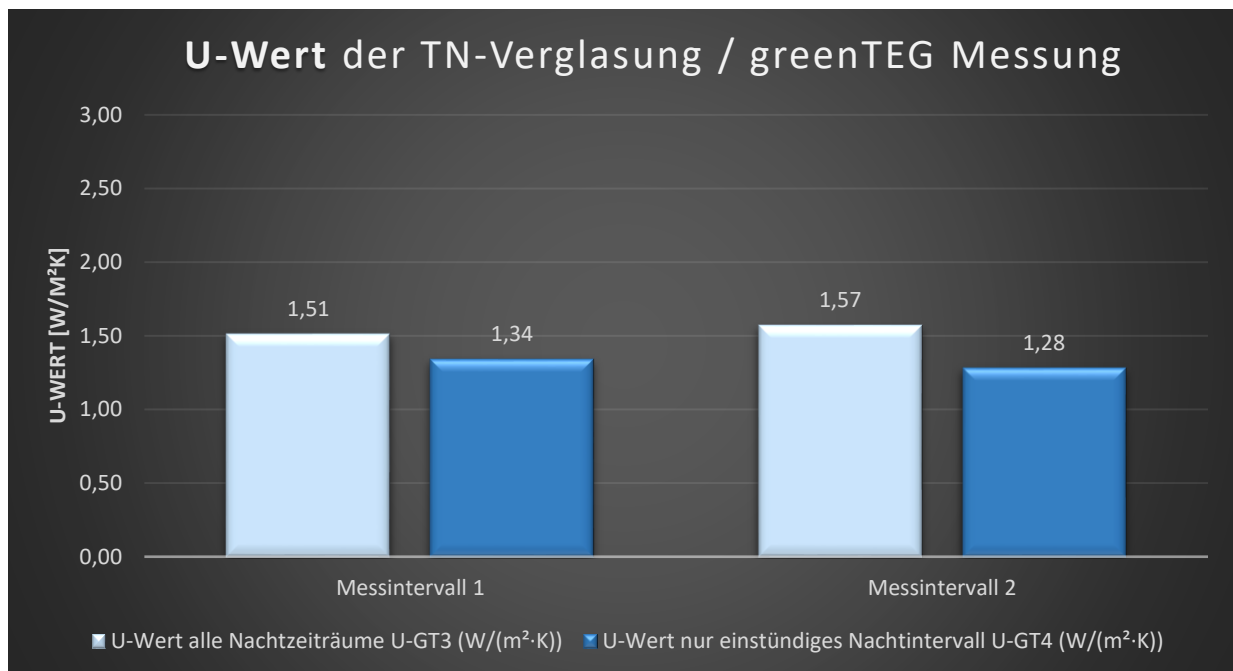


Abbildung 9.12: Vergleich der ermittelten U-Werte für die adaptive TN-Verglasung

## 10 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen an Membranhüllen und an adaptiven Verglasungen

Eine textile Mehrlagenfassade besteht aus mindestens einer Innen- und einer Außenmembrane, die typischerweise jeweils als beschichtetes Gewebe ausgeführt sind. Zur Verbesserung der bauphysikalischen Eigenschaften können weitere Membranlagen oder Funktionswerkstoffe wie Dämmvliese mit in den Aufbau integriert werden. Diese können als transluzente oder opake Fassaden ausgeführt werden.

Mehrlagige textile Fassadenelemente weisen im Vergleich zu konventionellen Hüllen deutlich geringere flächenbezogene Massen und sehr geringe spezifische Wärmekapazitäten auf. Sie reagieren daher bei Veränderungen des Außen- wie auch des Innenraumklimas sehr dynamisch.

Die Wärmeübertragung innerhalb eines textilen Fassadenelements und zwischen der Fassade und der Außen- sowie der Innenraumumgebung wird wesentlich von strahlungsbedingten Übertragungsvorgängen beeinflusst. Die übertragene Wärmestrahlungsleistung ist abhängig von der vierten Potenz der absoluten Oberflächentemperaturen der im Strahlungsaustausch stehenden Oberflächen. Die Strahlungswärmeübertragung ist daher in großem Maße nichtlinear abhängig von einer Änderung der Oberflächentemperaturen.

Für eine sichere Beurteilung der Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit einer textilen Mehrlagenfassade ist es daher notwendig, die mögliche Variation des Wärmedurchgangswertes bei der Fassadenauslegung und der konstruktiven Gestaltung des Fassadenaufbaus zu berücksichtigen. Bei gleichen Temperaturdifferenzen zwischen den Oberflächentemperaturen der Außen- und der Innenmembrane aber unterschiedlichen Temperaturniveaus sind die U-Werte deutlich unterschiedlich. Zudem beeinflusst der Bewölkungsgrad den Strahlungsaustausch der äußeren Membranlage mit dem Himmel wesentlich. Wenn Fassadenelemente im direkten Strahlungsaustausch mit dem Himmel stehen, wie es bei schräg geneigten Fassaden oder Membrandächern der Fall ist, kann es bei klaren und kalten Nächten zu einer Abkühlung der Außenhülle unter die Taupunkttemperatur und somit zur Kondensatbildung auf den beiden Seiten der Außenmembrane kommen. Bei derart orientierten Fassaden bewirken Änderungen im Bewölkungsgrad deutliche Veränderungen beim Wärmedurchgangskoeffizient. Der Grund hierfür ist die Änderungen des Strahlungswärmeaustausches mit dem Himmel.

Für eine energetische Bilanzierung von Räumen und Gebäuden mit Membranhüllen, basierend auf Jahressimulationen, führt die Einbeziehung der Abhängigkeit des Wärmedurchgangswertes von der Außen- und Innenraumtemperatur, vom Bewölkungszustand und der Außenumströmungsgeschwindigkeit zu belastbaren Ergebnissen.

Eine rechnerische Ermittlung der Wärmedurchgangswerte für textile Mehrlagenfassaden setzt die Einbeziehung der Strahlungsvorgänge mit einer mathematisch korrekten Formulierung voraus. Für unterschiedliche Umströmungsgeschwindigkeiten, im Wesentlichen auf der Außenseite der Fassade, ist ein geeigneter Ansatz zur Berücksichtigung von dessen Einfluss auf den entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten heranzuziehen (z.B. nach DIN EN ISO 6946:2018 Anhang C). Bei der Anwendung der DIN EN ISO 6946:2018 Anhang C bzw. Anhang D ist der Ansatz für den Strahlungsaustausch zu präzisieren durch einen Ansatz nach

dem Stefan-Boltzmann-Gesetz unter Berücksichtigung der Oberflächenemissionskoeffizienten und der Sichtfaktoren mit der Umgebung. Bei den transluzenten textilen Fassaden wirken sich solare Gewinne auf das Innenraumklima aus. Diese setzen sich aus dem Anteil der durchgelassenen direkten Strahlung und dem Anteil aus der sekundären Wärmeabgabe nach innen zusammen. Ein rechnerischer Ansatz zu deren Berücksichtigung ist, anders als für Verglasungen in der DIN EN 410 angegeben, für Mehrlagensysteme nicht verfügbar.

Ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmedurchgangswerte für unterschiedliche Mehrlagensysteme, basierend auf wissenschaftlich fundierten Ansätzen für die konvektiven und strahlungsbedingten Wärmetransportvorgänge innerhalb des Lagenaufbaus sowie mit der Umgebung, wurde im Rahmen eines Zukunft Bau-Forschungsprojekts des ILEK erstellt (Layer-Simulationstool) [1] und im Rahmen seiner Dissertation von Klaus erweitert [28]. Mit diesem Berechnungsverfahren ist eine instationäre Betrachtung möglich, die die veränderlichen Faktoren Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, Temperaturniveau und Windgeschwindigkeit einbezieht.

Für die am ILEK untersuchten adaptiven Verglasung kann die Ermittlung des U-Wertes und des g-Wertes unter Anwendung der für Verglasungen relevanten Normen unter Einbeziehung der schaltstufenabhängigen, veränderlichen Transmissions- und Absorptionswerte erfolgen (DIN EN 410: Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen und DIN EN 673: Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten). Die Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten ist in einem nächtlichen Untersuchungsintervall durchzuführen, um eine Beeinflussung durch solaren Einstrahlung zu vermeiden und eine Vergleichbarkeit mit den Rechenwerten zu gewährleisten.

## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1	Wärmedurchlasswiderstände von ruhenden Luftschichten.....	11
Abbildung 3.2:	Temperaturverlauf Rubin-Methode.....	18
Abbildung 3.3:	Unterteilung in Sub-Oberflächen .....	19
Abbildung 3.4:	Modifiziertes System der Klaus-Rubin-Methode.....	20
Abbildung 3.5:	Temperaturverlauf bei Anwendung der Klaus-Rubin-Methode .....	21
Abbildung 4.1:	Schnitt durch den Heizkasten.....	23
Abbildung 4.2:	Schematischer Aufbau des Heizkastens nach DIN EN ISO 8990.....	24
Abbildung 4.3:	Illustration der Sensorpositionen des ILEK-Heizkastens.....	26
Abbildung 4.4:	Referenzprobekörper während des Aushärtens des Klebstoffes .....	28
Abbildung 4.5:	Referenzprobekörper vor dem Einbau in die Hotbox .....	28
Abbildung 4.6:	Positionierung der Rasterschablone (linkes Bild) zur Markierung der Sensorpositionen auf dem Referenzprobekörper (rechtes Bild).....	29
Abbildung 4.7:	Befestigung des Abdichtungsbandes auf dem Referenzprobekörper .....	29
Abbildung 4.8:	Warmseite der Hotbox mit eingebautem Referenzprobekörper (linkes Bild), auf dem anschließend die Sensoren befestigt wurden (rechtes Bild).....	30
Abbildung 4.9:	Membranrolle vor dem Grobzuschnitt (linkes Bild), vorkonfektionierte Probe nach dem Grobzuschnitt (rechtes Bild) .....	33
Abbildung 4.10:	Vorabkennzeichnung der Probe (linkes Bild), Entfernen der Schutzfolie des doppelseitigen Klebebands vor dem Aufbringen des Montagerahmens auf die Probe (rechtes Bild) .....	34
Abbildung 4.11:	Aufkleben des Montagerahmens auf die Probe (linkes Bild), Formatzuschnitt der Probe (rechtes Bild) .....	34
Abbildung 4.12:	Konfektionierte Probe auf Rahmen (linkes Bild), zusätzliche mechanische Befestigung der Membrane auf dem Montagerahmen (rechtes Bild).....	34
Abbildung 4.13:	Luftbild mit Standort des Dachprüfstandes, Pfaffenwandring 7, Stuttgart .....	35
Abbildung 4.14:	Prüfkasten des Dachprüfstandes, Pfaffenwandring 7, Stuttgart.....	35
Abbildung 4.15:	Exemplarischer Schnitt durch den Dachprüfstand mit einem dreilagigen Aufbau einschließlich Darstellung der Sensorpositionen.....	36
Abbildung 4.16:	Übersicht über die Sensoren der Wetterstation .....	37
Abbildung 4.17:	Abbildung einer Wärmeflussplatte.....	39
Abbildung 4.18:	Schnittbild des Pyranometers [17].....	39
Abbildung 4.19:	Abbildung des Pyrgeometers .....	40
Abbildung 4.20:	Messung der Wärmebildkamera an der Heizplatte.....	43
Abbildung 4.21:	Strömungsgeschwindigkeit, klare Nacht, 100 % Heizleistung.....	44
Abbildung 4.22:	Strömungsgeschwindigkeit, bewölkter Tag, 100 % Heizleistung .....	44



Abbildung 4.23:	Strömungsgeschwindigkeit, bewölkte Nacht, 100 % Heizleistung .....	44
Abbildung 4.24:	Strömungsgeschwindigkeit, klarer Tag, 100 % Heizleistung.....	44
Abbildung 4.25:	Strömungsgeschwindigkeit, klare Nacht, 25 % Heizleistung.....	45
Abbildung 4.26:	Strömungsgeschwindigkeit, bewölkter Tag, 25 % Heizleistung .....	45
Abbildung 4.27:	Strömungsgeschwindigkeit, bewölkte Nacht, 25 % Heizleistung .....	45
Abbildung 4.28:	Strömungsgeschwindigkeit, klarer Tag, 25 % Heizleistung.....	45
Abbildung 4.29:	Platzierung der Thermoelemente .....	46
Abbildung 4.30:	Aktivhaus B10 von Werner Sobek, Foto: Zooey Braun, Stuttgart .....	47
Abbildung 4.31:	Illustration der Bezugslinien der PHYMEAS-Wärmeflussplatten [12].....	48
Abbildung 4.32:	Schematische Darstellung der Sensorpositionen im Bereich der B10- Vakuumglasfassade.....	50
Abbildung 4.33:	Detaildarstellung der Sensorpositionen im Bereich der B10 Vakuumglasfassade.....	51
Abbildung 4.34:	Sensorpositionen im Systemachsenbereich C der Vakuumglasfassade.....	52
Abbildung 4.35:	Detailansicht einer Wärmeflussplatte mit äußerem Strahlungsschirm .....	52
Abbildung 4.36:	Hinterlüftetes Reflektorschild (Strahlungsschirm) im Außenbereich der Fassade zum Schutz der Sensoren vor direkter Sonneneinstrahlung .....	53
Abbildung 4.37:	Unterschiedliche Montagezustände des modularen Fassadenprüfstands während der Errichtung .....	54
Abbildung 4.38:	Fassadenprüfstand auf dem Freiversuchsgelände des ILEK: Außenperspektive Süd-West-Fassade(linkes Bild), Innenperspektive mit Blick nach Süden (rechtes Bild).....	55
Abbildung 4.39:	Grundriss des Fassadenprüfstands im EG (identisch im OG).....	55
Abbildung 4.40:	Schnitt A-A durch den zweigeschossigen Fassadenprüfstand.....	56
Abbildung 4.41:	Spektralphotometer Varian Modell Cary 5000 und Ulbricht-Kugel .....	57
Abbildung 5.1:	Versuchsaufbau und Sensoranordnung der zweilagigen textilen Lageaufbauten ohne Funktionsmaterialien im Heizkasten.....	58
Abbildung 5.2:	Sensoranordnung in der Hotbox bei dreilagigen textilen Lageaufbauten ohne Funktionsmaterialien.....	60
Abbildung 5.3:	U-Werte des dreilagigen Aufbaus Duraskin B1915 ohne Funktionsstoffe nach Hotbox-Messung und Berechnung nach vereinfachtem Verfahren der DIN EN ISO 6946:2018 .....	62
Abbildung 5.4:	U-Werte des dreilagigen Aufbaus Duraskin B4915 ohne Funktionsstoffe nach Hotbox-Messung und Anwendung der DIN EN ISO 6946:2018.....	63
Abbildung 5.5:	U-Werte des dreilagigen Aufbaus Duraskin B18059 ohne Funktionsstoffe nach Hotbox-Messung und Anwendung der DIN EN ISO 6946:2018.....	64

Abbildung 5.6:	U-Werte des dreilagigen Aufbaus Duraskin B18089 ohne Funktionsstoffe nach Hotbox-Messung und Anwendung der DIN EN ISO 6946:2018.....	65
Abbildung 5.7:	U-Werte des dreilagigen Aufbaus Duraskin B28050 ohne Funktionsstoffe nach Hotbox-Messung und Anwendung der DIN EN ISO 6946:2018.....	66
Abbildung 5.8:	Exemplarische Abbildung einer Wabenstruktur (linkes Bild) und eines Glasfasergespinnstes (rechtes Bild) der Firma Wacotech .....	68
Abbildung 5.9:	Versuchsaufbau Wabenaufbau I .....	69
Abbildung 5.10:	Grafische Darstellung der U-Werte für den Wabenaufbau I.....	70
Abbildung 5.11:	Versuchsanordnung Wabenaufbau II .....	71
Abbildung 5.12:	Grafische Darstellung der U-Werte für den Wabenaufbau II.....	72
Abbildung 5.13:	Versuchsaufbau für die Probe mit Glasfasergespinnst .....	73
Abbildung 5.14:	Grafische Darstellung der U-Werte für den Versuchsaufbau mit Glasfaser-gespinnst .....	74
Abbildung 5.15:	Versuchsaufbau mit Akustikvlies .....	75
Abbildung 5.16:	Zusammenfassung der U-Werte für den Aufbau mit Akustikvlies .....	76
Abbildung 5.17:	Versuchsaufbau ETFE-Kissen .....	77
Abbildung 5.18:	Screenshot der Formfrästeile zur Einpassung des Pneus in die Hotbox (linkes Bild) und fertig hergestelltes Formfrästeil (rechtes Bild) .....	77
Abbildung 5.19:	Zusammenfassung der U-Werte für den Versuchsaufbau ETFE-Kissen .....	78
Abbildung 6.1:	Dachprüfstand, Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart .....	83
Abbildung 6.2:	Schnitt durch den Dachprüfstand mit einem dreilagigen Aufbau ohne Funktionsmaterialien .....	83
Abbildung 6.3:	Wärmestromdichtenverlauf, Auswertung 2.1.3.1, dreilagig ohne Funktions-materialien.....	84
Abbildung 6.4:	Temperaturverlauf, Auswertung 2.1.3.1, dreilagig ohne Funktionsmaterialien .....	85
Abbildung 6.5:	Verlauf der klimatischen Bedingungen, Auswertung 2.1.3.1, dreilagig ohne Funktionsmaterialien .....	85
Abbildung 6.6:	Verlauf des Bewölkungsgrades Wetterstation Stuttgart-Flughafen, Auswertung 2.1.3.1, dreilagig ohne Funktionsmaterialien.....	86
Abbildung 6.7:	Auswertung 2.1.3.1 18.02. 18:00-22:00, Verlauf der Wärmestromdichten .....	86
Abbildung 6.8:	Auswertung 2.1.3.1 18.02. 18:00-22:00, Verlauf der Temperaturen .....	87
Abbildung 6.9:	Auswertung 2.1.3.1 18.02. 18:00-22:00, Verlauf der klimatischen Bedingungen.....	87
Abbildung 6.10:	Auswertung 2.1.3.1 18.02. 18:00-22:00, Verlauf der U-Werte .....	88
Abbildung 6.11:	Schnitt durch den Dachprüfstand mit einem zweilagigen Aufbau mit Funktionsmaterial.....	89

Abbildung 6.12: Geöffneter Dachprüfstand bei Versuchsaufbau 4 .....	89
Abbildung 6.13: Verlauf der Wärmestromdichten .....	90
Abbildung 6.14: Verlauf der Temperaturen .....	90
Abbildung 6.15: Verlauf der klimatischen Bedingungen .....	91
Abbildung 6.16: Verlauf des Bewölkungsgrades Wetterstation Stuttgart-Flughafen .....	91
Abbildung 6.17: Auswertung 4.0.1.1 21.04 23:00-22.04 6:00 Verlauf der Wärmestromdichten .....	92
Abbildung 6.18: Auswertung 4.0.1.1 21.04 23:00-22.04 6:00 Verlauf der Temperaturen .....	92
Abbildung 6.19: Auswertung 4.0.1.1 21.04 23:00-22.04 6:00 Verlauf der klimatischen Bedingungen.....	93
Abbildung 6.20: Auswertung 4.0.1.1 21.04 23:00-22.04 6:00 Verlauf des U-Wertes .....	93
Abbildung 7.1: Temperatur- und Strahlungsverläufe 21.12.-30.12.2016 .....	94
Abbildung 7.2: 21.12.-30.12.2016 Temperaturverläufe und Strömungsgeschwindigkeiten.....	95
Abbildung 7.3: U-Werte Vakuumglas 21.12.-30.12.2016 .....	95
Abbildung 7.4: 24.12.2016 23:00 bis 25.12.2016 1:00 Temperaturverläufe und Strömungsgeschwindigkeiten.....	96
Abbildung 7.5: U-Werte Vakuumglas 24.12.2016 23:00 bis 25.12.2016 1:00.....	96
Abbildung 7.6: U-Werte Sky-Frame 21.12.-30.12.2016.....	97
Abbildung 7.7: U-Werte Sky-Frame 24.12.2016 23:00 bis 25.12.2016 1:00.....	97
Abbildung 7.8: Temperatur- und Strahlungsverläufe 5.1.-9.1.2017 .....	98
Abbildung 7.9: 5.1.-9.1.2017 Temperaturverläufe und Strömungsgeschwindigkeiten .....	99
Abbildung 7.10: U-Werte Vakuumglas 5.1.-9.1.2017 .....	99
Abbildung 7.11: 7.1.2017 23:00 bis 8.1.2017 0:30 Temperaturverläufe und Strömungsgeschwindigkeiten.....	100
Abbildung 7.12: U-Werte Vakuumglas 7.1.2016 23:00 bis 8.1.2016 0:30.....	100
Abbildung 7.13: U-Werte Sky-Frame 5.1.-9.1.2017 .....	101
Abbildung 7.14: U-Werte Sky-Frame 7.1.2016 23:00 bis 8.1.2016 0:30.....	101
Abbildung 7.15: Temperatur- und Strahlungsverläufe 16.1.-19.1.2017 .....	102
Abbildung 7.16: Temperaturverlauf und Strömungsgeschwindigkeiten 16.1.-19.1.2017 ...	103
Abbildung 7.17: U-Werte Vakuumglas 16.1.-19.1.2017 .....	103
Abbildung 7.18: Temperaturverläufe und Strömungsgeschwindigkeiten 18.1.2017 19:00 bis 19.1.2017 1:00.....	104
Abbildung 7.19: U-Werte Vakuumglas 18.1.2017 19:00 bis 19.1.2017 1.00.....	104
Abbildung 7.20: U-Werte Sky-Frame 16.1.-19.1.2017.....	105
Abbildung 7.21: U-Werte Sky-Frame 18.1.2017 19:00 bis 19.1.2017 1.00.....	105

Abbildung 8.1:	Typischer Aufbau eines elektrochromen Systems mit kathodischer Schicht [24] .....	110
Abbildung 8.2:	Anwendungsbeispiel der ECONTROL®-Verglasung: Fraunhofer IST Braunschweig [26].....	111
Abbildung 8.3:	g-Wert, Tvis und Tsol der ECONTROL®-Verglasung in Abhängigkeit von der Schaltstufe (Quelle für CEN-Werte: EControl-Glas [26], NFRC-Werte basieren auf den Spektraldaten der EControl-Glas GmbH & Co. KG), Mittelwerte wurden berechnet mit den Programmen LBNL-Optics 5.1 sowie Window 7.4.6). Abbildung aus [27] entnommen. ....	112
Abbildung 8.4:	Sensorik für das Monitoring an der ECONTROL-Verglasung .....	114
Abbildung 8.5:	Sensorik für das Monitoring der Referenzverglasung .....	115
Abbildung 8.6:	Wärmestrom- und Temperaturverläufe gemessen an der ECONTROL-Verglasung am 04.11.2017. Auswertintervalle sind gekennzeichnet. ....	116
Abbildung 8.7:	Strahlungsdaten und Wärmeströme gemessen an der ECONTROL-Verglasung am 04.11.2017. Auswertintervalle sind gekennzeichnet. ....	116
Abbildung 8.8:	Wärmeströme durch eine ECONTROL- und eine Referenzverglasung („Standard“) am 04.11.2017 zwischen 02.00 und 03.00 Uhr .....	117
Abbildung 8.9:	Temperaturen im Messraum 1.2 mit einer ECONTROL-Verglasung am 04.11.2017 zwischen 02.00 und 03.00 Uhr .....	117
Abbildung 8.10:	Wärmeströme durch eine ECONTROL- Verglasung und Temperaturverläufe am 04.11.2017 zwischen 02.00 und 03.00 Uhr.....	118
Abbildung 8.11:	Strahlungsdaten, Wärmeströme und Temperaturverläufe im Messraum 1.2 mit einer ECONTROL-Verglasung am 04.11.2017 zwischen 02.00 und 03.00 Uhr .....	118
Abbildung 8.12:	Wärmeströme durch eine ECONTROL- und eine Referenzverglasung am 04.11.2017 zwischen 12.30 und 13.00 Uhr .....	119
Abbildung 8.13:	Temperaturen im Messraum 1.2 und Schaltstufenverlauf einer ECONTROL-Verglasung am 04.11.2017 zwischen 12.30 und 13.00 Uhr .....	119
Abbildung 8.14:	Wärmeströme durch eine ECONTROL-Verglasung und Temperaturverläufe im Messraum 1.2 am 04.11.2017 zwischen 12.30 und 13.00 Uhr .....	120
Abbildung 8.15:	Strahlungsdaten, Wärmeströme und Temperaturverläufe im Messraum 1.2 mit einer ECONTROL-Verglasung am 04.11.2017 zwischen 12.30 und 13.00 Uhr .....	120
Abbildung 8.16:	Zusammenfassung der ermittelten U-Werte für die ECONTROL-Verglasung.....	122
Abbildung 9.1:	Koffer mit greenTEG-gSKIN KIT-2615C-Komponenten, bestehend aus Datenlogger, Sensoren und Zubehör (Quelle: greenTEG AG).....	124
Abbildung 9.2:	Sensoranordnung in der Hotbox bei der Probe bestehend aus PES-PVC / Glasfasergespinst. Links: Längsschnitt durch die Hotbox. Rechts: Ansicht auf die Warmseite der Hotbox. ....	126

Abbildung 9.3:	Gemessene Wärmestromdichten (Hotbox-Messsystem sowie greenTEG-System) .....	126
Abbildung 9.4:	Gemessene Lufttemperaturen auf der Kaltseite (Hotbox-Messsystem sowie greenTEG-System) .....	127
Abbildung 9.5:	Gemessene Lufttemperaturen auf der Warmseite (Hotbox-Messsystem sowie greenTEG-System).....	127
Abbildung 9.6:	Vergleich der U-Werte aus Hotbox-Messungen mit den unterschiedlichen Messsystemen und Berechnungsverfahren. Ermittelt bei unterschiedlichen Oberflächentemperaturen. ....	130
Abbildung 9.7:	Exemplarische Schaltzustände einer TN-Verglasung mit vertikal gradiertem Verlauf (links: Außenansicht) und zeitgesteuerter Sonnenstandsnachführung (rechts: Sequenz einzelner Innenansichten der Verglasung mit Verdunkelung im Bereich der Sonne) .....	131
Abbildung 9.8:	Messintervall 1: Darstellung der Messdaten und des ermittelten messwertbasierten U-Wertes der adaptiven Verglasung .....	132
Abbildung 9.9:	Einstündiges Nachtintervall im Messintervall 1: Darstellung der Messdaten und des ermittelten messwertbasierten U-Wertes der adaptiven Verglasung .....	133
Abbildung 9.10:	Messintervall 2: Darstellung der Messdaten und des ermittelten messwertbasierten U-Wertes der adaptiven Verglasung .....	133
Abbildung 9.11:	Einstündiges Nachtintervall im Messintervall 2: Darstellung der Messdaten und des ermittelten messwertbasierten U-Wertes der adaptiven Verglasung .....	134
Abbildung 9.12:	Vergleich der ermittelten U-Werte für die adaptive TN-Verglasung .....	135

## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Übersicht der Arbeitspakete des ILEK.....	7
Tabelle 3-1:	Wärmeübergangswiderstände nach DIN EN ISO 6946 .....	11
Tabelle 4-1:	Werkstoffkenndaten des Referenzprobekörpers .....	27
Tabelle 4-2:	Kenndaten der PHYMEAS-Wärmeflussplatten.....	49
Tabelle 5-1:	Übersicht der in der Hotbox untersuchten zweilagigen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien .....	58
Tabelle 5-2:	Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten zweilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien .....	59
Tabelle 5-3:	Übersicht der in der Hotbox untersuchten dreilagigen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien .....	60
Tabelle 5-4:	Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien .....	61
Tabelle 5-5:	Messergebnisse und daraus berechnete U-Werte der in der Hotbox untersuchten dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B1915.....	62
Tabelle 5-6:	Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B4915 .....	63
Tabelle 5-7:	Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B18059 .....	64
Tabelle 5-8:	Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B18089 .....	65
Tabelle 5-9:	Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten dreilagigen textilen Aufbauten ohne Funktionsmaterialien: Duraskin B28050 .....	66
Tabelle 5-10:	Übersicht der in der Hotbox untersuchten dreilagigen Aufbauten mit Funktionsmaterialien .....	67
Tabelle 5-11:	Messergebnisse der in der Hotbox untersuchten zweilagigen Aufbauten mit Funktionsmaterial Wacotech Wavecore PET150-18/S .....	69
Tabelle 5-12:	Übersicht der in der Hotbox untersuchten zweilagigen Aufbauten mit Funktionsmaterial Wacotec TIMax CA 40-FR + Polyester-PVC .....	72
Tabelle 5-13:	Übersicht der in der Hotbox untersuchten zweilagigen Aufbauten mit Funktionsmaterial aus Glasfasergespinnst Wacotec TIMax GL-PlusF und Polyester-PVC-Membranen.....	74
Tabelle 5-14:	Auswertungsergebnisse Akustikvlies.....	75
Tabelle 5-15:	In der Hotbox untersuchtes dreilagiges ETFE-Kissen .....	76
Tabelle 5-16:	Auswertungsergebnisse für das dreilagige ETFE-Kissen .....	78
Tabelle 6-1:	Übersicht der im Dachprüfstand untersuchten Aufbauten (HP: Heizplatte; 100 % $\hat{=}$ max. Heizleistung; 25 % $\hat{=}$ 25 % Heizleistung).....	81
Tabelle 7-1:	Abweichung vom Mittelwert von U [%] Intervall 1 bis 4.....	109
Tabelle 8-1:	Kennwerte der ECONTROL®-Verglasung für zwei extreme Schaltzustände (Quelle für CEN-Werte: EControl-Glas [26], NFRC-	

	Werte basieren auf den Spektraldaten der EControl-Glas GmbH & Co. KG), Mittelwerte wurden abgerechnet mit den Programmen LBNL-Optics 5.1/Window 7.4.6 .....	112
Tabelle 8-2:	Optische und thermische Kenndaten der Referenzverglasung (Quelle: LBNL Window 7.4.6, IGDB v48) [27] .....	113
Tabelle 8-3:	Absolute Abweichungen der Messergebnisse untereinander in W/m <sup>2</sup> K... ..	123
Tabelle 8-4:	Relative Abweichungen [%] der Messergebnisse (relativ zum Wert nach ISO 9868-1:2014 der Nachtauswertung) .....	123
Tabelle 9-1:	Auswertungsergebnisse von vier Messintervallen in der Hotbox .....	128
Tabelle 9-2:	Vergleich der Auswertungsergebnisse der adaptiven TN-Verglasung basierend auf den Messdaten des greenTEG-Systems.....	135

## 13 Literaturverzeichnis

- [1] W. Haase *et al.*, *Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen*. Forschungsbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2011.
- [2] BauNetz Media GmbH, *Baunetz\_Wissen*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/>. Zugriff am: 22. Mai 2016.
- [3] *DIN EN ISO 6946:2018-03 Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren*, 2018.
- [4] *DIN EN ISO 10456:2010-05 Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte*, 2010.
- [5] *DIN EN ISO 10211:2015-06 Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen*. Entwurf, 2015.
- [6] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI-Wärmeatlas*, 11. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- [7] W. C. Swinbank, „Long-wave radiation from clear skies“, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Jg. 89, Nr. 381, S. 339–348, 1963.
- [8] M. Rubin, „Calculating heat transfer through windows“ in *International Journal of Energy Research*.
- [9] T. Baur, „Untersuchungen zur thermischen Bewertung von mehrlagigen transluzenten und opaken Leichtbaugebäudehüllen“. Bachelorarbeit, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2016.
- [10] *DIN EN ISO 8990:1996-09 Wärmeschutz - Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften im stationären Zustand - Verfahren mit dem kalibrierten und dem geregelten Heizkasten*, 1996.
- [11] J. Bolay, „Messtechnische Untersuchungen an mehrlagigen Leichtbaugebäudehüllen zur Entwicklung eines Bewertungsverfahrens für die thermische Eigenschaften (U-Wert, g-Wert)“. Bachelorarbeit, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2017.
- [12] R. Baetens, B. P. Jelle und A. Gustavsen, „Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: a state-of-the-art review“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Jg. 94, Nr. 2, S. 87–105, 2010.
- [13] T. Deinlein, „Elektrochrome Fassaden - Glas mit steuerbaren Eigenschaften“, *Stahlbau*, Jg. 69, Nr. 7, S. 568–570, 2000.
- [14] *Phymeas Heat Flux Measurement - Produkte*. Produktdaten. [Online] Verfügbar unter: [http://www.phymeas.de/?page\\_id=2](http://www.phymeas.de/?page_id=2). Zugriff am: 29. Juni 2016.
- [15] *RS PRO Thermoelement Steckverbinder für Thermoelement Typ K*. Produktdaten. [Online] Verfügbar unter: <https://de.rs-online.com/web/p/temperatursensor-zubehor/4559764/>. Zugriff am: 30. Juni 2016.
- [16] *RS PRO Thermoelement Typ K, -50°C bis +250°C, Kabel 1 m*. Produktdaten. [Online] Verfügbar unter: <https://de.rs-online.com/web/p/thermoelemente/6212158/>. Zugriff am: 4. Juli 2016.
- [17] *Phymeas Heat Flux Measurement - Funktionsweise*. Produktdaten. [Online] Verfügbar unter: [http://www.phymeas.de/?page\\_id=27](http://www.phymeas.de/?page_id=27). Zugriff am: 29. Juni 2016.



- [18] *RS PRO Wärmeleitpaste Silikon, 5 W/m·K*. Produktdaten. [Online] Verfügbar unter: <https://de.rs-online.com/web/p/waermeleitpaste/7074736/>. Zugriff am: 19. Mai 2016.
- [19] Kipp & Zonen B.V., *Bedienungsanleitung CMP-Serie Pyranometer, CMA-Serie Albedometer*. Delft, 2015.
- [20] *Gengenbach Instruments GmbH - Pyrgeometer CGR3*. Produktdaten. [Online] Verfügbar unter: <https://www.rg-messtechnik.de/cgr3-pyrgeometer.php>. Zugriff am: 19. September 2016.
- [21] *Advantech Co. - USB-4718*. Produktdaten. [Online] Verfügbar unter: [https://www.advantech.com/products/1-2mlkno/usb-4718/mod\\_cb08e924-0165-46dd-8a50-0aebc79ea6c9](https://www.advantech.com/products/1-2mlkno/usb-4718/mod_cb08e924-0165-46dd-8a50-0aebc79ea6c9). Zugriff am: 27. Juni 2016.
- [22] Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH, *Richtlinie DAkkS-DKD-R 5-3 Kalibrierung von Thermoelementen*, 1. Aufl. Braunschweig, 2010.
- [23] thermografie-xtra, *Emissionsgrad-Tabelle*.
- [24] F. Schmid *et al.*, *Adaptive Raumakustik und akustische Konditionierung im Bauwesen (ARAKO): Adaption der akustisch wirksamen Parameter von Textil- und Membransystemen zur Verbesserung bauakustischer Maßnahmen sowie zur Steigerung und Anpassung der Raumakustik und Raumklangqualität*. Forschungsbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2015.
- [25] Z. Qin, P. Berliner und A. Karnieli, „Numerical solution of a complete surface energy balance model for simulation of heat fluxes and surface temperature under bare soil environment“, *Applied Mathematics and Computation*, Jg. 130, Nr. 1, S. 171–200, 2002.
- [26] C.-G. Granqvist, *Handbook of inorganic electrochromic materials*. Amsterdam, New York: Elsevier, 1995.
- [27] H. Wittkopf, „Elektrochrome Beschichtungen: Sonnenschutzgläser der neuen Generation“, *Vakuum in Forschung und Praxis*, Jg. 22, Nr. 3, S. 26–30, 2010.
- [28] *EControl-Glas GmbH & Co. KG - EControl® - Sonnenschutz mit dimmbarem Glas*. Produktdaten. [Online] Verfügbar unter: <https://www.econtrol-glas.de/>. Zugriff am: 13. September 2016.
- [29] M. Husser und W. Haase, *Adaptive Verglasungssysteme: Einsatzbereiche, energetische und tageslichttechnische Evaluierung, Regelungsstrategien*. Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2018.