

BBSR-
Online-Publikation
83/2024

Entwicklung adaptiver Membranfassadenmodule

von

Dr.-Ing. Walter Haase
Dr.-Ing. Christina Eisenbarth
Silas Kalmbach
Jan Bolay

Entwicklung adaptiver Membranfassadenmodule

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.42

Projektlaufzeit: 03.2019 bis 09.2022

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Stuttgart
Dr.-Ing. Walter Haase
walter.haase@ilek.uni-stuttgart.de

Dr.-Ing. Christina Eisenbarth
Silas Kalmbach, M. Sc.
Jan Bolay, M. Sc.

Redaktion

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Stuttgart

Stand

April 2024

Gestaltung

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Stuttgart

Bildnachweis

Titelbild: Christina Eisenbarth

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Haase, Walter; Eisenbarth, Christina; Kalmbach, Silas; Bolay, Jan, 2024: Entwicklung adaptiver Membranfassadenmodule.
BBSR-Online-Publikation 83/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	4
2	Abstract	4
3	Einführung	5
4	Problemstellung	5
4.1	Zielstellung	5
5	Forschungsdesign	6
5.1	Arbeitshypothesen	6
5.2	Methodischer Ansatz	6
5.3	Projektteam und Organisation	7
5.4	Arbeitspakete und Meilensteine	7
6	Projektverlauf und Begründung von Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag	7
7	Ergebnisse	8
7.1	AP 1 Recherche und Anforderungen	8
7.1.1	Anforderungen an Membranhüllen und modulare Fassadensysteme	8
	Thermische Anforderungen	8
	Feuchteschutz	9
	Schallschutz	9
	Brandschutz	9
	Umweltwirkung	10
	Konstruktive Anforderungen	10
	Architektonische Aspekte	11
	Wirtschaftlichkeit	11
7.1.2	Integration adaptiver Systeme und Regelungskonzepte	11
	Thermische Adaptivität	11
	Hygrische Adaptivität	11
	Akustische Adaptivität	12
	Adaptivität des Licht- und Energiedurchgangs	12
7.2	AP 2 Planung, Entwicklung und Umsetzung von Systemrahmenprofilen	13
7.2.1	Grundlagenermittlung	13
	Profilsysteme	13
	Konzept „Adnexus“	14
	Konzept „Commodus“	16

	Konzept „Keder-THERM+“	17
7.2.2	Entwurfsideen für das adaptive Hüllsystem.....	17
7.2.3	Konzept „PAOSS“	22
	Sonnen- und Blendschutz.....	23
	Textil- und folienbasierende Materialien	24
	Anpassungsfähigkeit der Gebäudehülle	24
	Pneumatisch aktuierter Origami Sonnenschutz - PAOSS	25
	Optimierung der Origami-Geometrie.....	25
	Materialanalyse	26
	Kinematische Falztechnik.....	28
	Aktuierungsstrategie.....	30
	Ausblick	32
7.2.4	Simulationen der mechanischen und thermischen Eigenschaften	32
	Hygrothermische Simulation der Lagenaufbauten.....	32
	Strukturmechanische Simulation	35
	Thermische Simulation	36
7.2.5	Planung und Herstellung der Profile.....	42
	Konzept „Adnexus“	42
	Konzept „Keder-THERM+“	43
7.3	AP 3 Prüfung der Profil- und Hüllsysteme	46
7.3.1	Mechanische Simulation	46
7.3.2	Thermische Versuche – Bestimmung der Wärmeübertragung mittels Heizkasten.....	46
	Versuchsablauf.....	49
	Lagenaufbauten.....	50
7.4	AP 4 Realisierung und Test des 1:1 Prototyps	53
7.4.1	Planung und Herstellung.....	53
	Fassadenkonzept LED-Fassade	53
	Der textile Träger der Leuchtdiodenstreifen.....	54
	Mikrocontroller	56
	Teensy 4 - Mikrocontroller	56
	Anschlüsse	56
	Software der Teensy-Mikrocontroller	57
	Steuereinheit - Raspberry Pi 4 - System on a Chip (SoC)	57
	Anschlüsse	57
	Software zur Nutzerinteraktion	58

	Stromversorgung	59
	Übersicht	61
	Interaktionskonzepte	63
	Herausforderungen, Schwierigkeiten & Ausblick	63
	Auswirkungen des Betriebs des LED-Systems auf die Innenraumtemperatur.....	63
7.4.2	Installation und Inbetriebnahme	64
	Gebäudeanschluss der Fassadenelemente in Modulbauweise	64
	Auswahl der Messtechnik	65
7.4.3	Messdatenauswertung und Optimierung der Betriebsweise	66
	Messdatenerfassung	66
8	Zusammenfassung und Ergebnisverwertung	67
	Literaturverzeichnis	69

1 Kurzfassung

Membranwerkstoffe eröffnen aufgrund ihres minimalen Flächengewichts, ihrer hohen mechanischen Beanspruchbarkeit und ihrer ästhetischen Oberflächeneigenschaften ein bislang nicht ausgeschöpftes ökologisches, ökonomisches und gestalterisches Potenzial für ihre Anwendung in der Architektur. Durch den Einsatz leichter Membranfassadensysteme können signifikante Einsparungen von Material, Masse, CO₂ und grauer Energie bei der Herstellung, dem Transport von Baumaterial sowie dem Gebäudebetrieb erzielt werden.

Ziel des Forschungsvorhabens war die ganzheitliche Entwicklung einer Varianz von ressourceneffizienten, vollständig rezyklierbaren, mehrlagigen, textil- sowie folienbasierten Fassadenmodulen für den Hochbau, die das Funktionsspektrum der konventionellen Fassaden erweitern. Es erfolgte dabei die Erarbeitung von opaken, transluzenten sowie transparenten Hülllösungen.

Um auf bauphysikalische Anforderungen gezielt reagieren zu können, wurden die entwickelten Membranfassaden durch einen mehrlagigen Systemaufbau aus Außenlagen und Funktionswerkstoffen, denen spezifische Aufgaben wie Wärme-, Feuchte-, Brand- oder Schallschutz zugeordnet sind, individuell funktionalisiert. Die Implementierung aktiver Komponenten aus Sensorik und Aktorik ermöglicht eine zusätzliche, präzise Anpassbarkeit der Gebäudehülle an die stark variierenden Außenbedingungen und Nutzungsanforderungen bei minimalem Materialeinsatz. Angestrebt wurde eine maximale Reduktion des Energiebedarfs zur Raumkonditionierung bei gleichzeitiger Steigerung des Nutzerkomforts. Die entwickelten Systemaufbauten wurden mittels Simulationen bzw. messtechnischer Methoden untersucht und nach technisch-funktionalen, baustatischen sowie thermischen Kriterien optimiert.

Zur Realisierung von textilen Fassaden in Modulbauweise ist neben der Entwicklung von textil- bzw. folienbasierten Hüllelementen auch der Entwurf eines modularen und an den jeweiligen Lagenaufbau anpassbares Aluminium-Rahmenprofilssystem essentiell. Das Fassadensystem kommt unter realen Witterungsbedingungen an einem Versuchsgebäude zur Testanwendung, um die Gebrauchstauglichkeit und Anwendungsreife zu demonstrieren. Dazu erfolgt der Anschluss der Messtechnik in und an den Modulen an die Messinfrastruktur des Versuchsgebäudes. Es folgt ein anschließendes Langzeitmonitoring zur intensiven bauphysikalischen Untersuchung.

Die Forschungsarbeit wurde begleitet von einem Konsortium mit Experten aus Wirtschaft, Wissenschaft und institutionellen Partnern. Durch die enge Kooperation mit mittelständischen Unternehmen konnte ein unmittelbarer Praxisbezug sichergestellt und eine Überführung der Forschungsergebnisse in die Marktwirtschaft begünstigt werden.

2 Abstract

Due to their minimal weight per unit area, their high mechanical strength and their aesthetic surface properties, membrane materials open up a hitherto unexploited ecological, economic and design potential for their application in architecture. By using lightweight membrane façade systems, significant savings of material, mass, CO₂ and grey energy can be achieved in production, transport of building materials and building operation.

The aim of the research project was the holistic development of a variety of resource-efficient, fully recyclable, multi-layer, textile- and film-based façade modules for building construction, which extend the functional spectrum of conventional façades. Opaque, translucent and transparent envelope solutions were developed.

In order to be able to react specifically to building-physical requirements, the developed membrane façades were individually functionalised by a multi-layer system structure of outer layers and functional

materials, to which specific tasks such as heat, moisture, fire or sound protection are assigned. The implementation of active components from sensors and actuators enables additional, precise adaptability of the building envelope to the strongly varying external conditions and utilisation requirements with minimal material input. The aim was to achieve a maximum reduction in energy requirements for room conditioning while at the same time increasing user comfort. The developed system structures were investigated by means of simulations and measurement methods and optimised according to technical-functional, structural and thermal criteria.

In addition to the development of textile or foil-based cladding elements, the design of a modular aluminium frame profile system that can be adapted to the respective layer structure is essential for the realisation of textile façades in modular construction. The façade system will be tested under real weather conditions on a test building in order to demonstrate its suitability for use and readiness for application. For this purpose, the measurement technology in and on the modules is connected to the measurement infrastructure of the test building. This is followed by long-term monitoring for intensive building physics analyses.

The research work was accompanied by a consortium of experts from business, science and institutional partners. The close cooperation with small and medium-sized enterprises ensured a direct practical relevance and facilitated the transfer of the research results to the market economy.

3 Einführung

Im nachfolgenden Bericht werden die Ergebnisse des Forschungsprojekts „Entwicklung adaptiver Membranfassadenmodule“ dargestellt.

Die Förderung des Projekts erfolgte durch das Innovationsprogramm Zukunft Bau, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB).

4 Problemstellung

Im Gegensatz zu passiven Fassadensystemen erlaubt der Einsatz adaptiver Hüllen eine positive Beeinflussung sowohl der Komfortparameter im Innenraum als auch des U-Werts. Durch den Einsatz adaptiver textiler Hüllsysteme kann eine deutliche Masseneinsparung erzielt werden, was vor dem Hintergrund des weltweiten Ressourcenverbrauchs (50 - 60 %) und der CO₂-Emissionen (ca. 30 %) im Bauwesen große Relevanz bekommt. Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz von Leichtbaufassaden im Vergleich zu Standardfassaden deutliche Einsparungen an Material, grauer Energie und CO₂ bei der Herstellung, dem Transport, aber auch beim Gebäudebetrieb. Im Projekt erfolgte eine ganzheitliche Entwicklung eines Fassadenmoduls mit Hülle und Rahmensystem, das erstmalig auch die Integration adaptiver Systeme erlaubt. Durch die vorgesehene Validierung unter komforttechnischen und energetischen Aspekten im realen Einsatz an einem Testgebäude wird es möglich sein, die Vorzüge adaptiver Membranfassaden darzustellen. Hierdurch können zukünftige Anwendungsfelder im Bereich von Hochbaufassaden erschlossen werden.

4.1 Zielstellung

Auf Basis von Ergebnissen vorangegangener, abgeschlossener Forschungsvorhaben erfolgte der Entwurf und die Herstellung modularer adaptiver Leichtbau-Fassadenmodule mit dem Ziel der Anwendungsreife. Die Fassadenelemente weisen einen mehrlagigen textil- und folienbasierten Aufbau auf und werden in einem ebenfalls entwickelten modularen Leichtmetall-Rahmenprofil gefasst, welches an den jeweiligen Hüllenaufbau angepasst werden kann.

Durch die prototypische Umsetzung eines solchen Moduls, das aus textilen Membranen, Funktionswerkstoffen sowie einem Rahmensystem besteht, sollte die Gebrauchstauglichkeit an einem Versuchsgebäude demonstriert werden. Da bislang noch keine modularen Profilsysteme zur Aufnahme adaptiver Membranhüllen verfügbar sind, wurden drei unterschiedliche Konzepte unter Berücksichtigung der Integration sämtlicher Systemkomponenten entwickelt. Hierbei erfolgte eine Optimierung technisch-funktionaler Aspekte wie der baustatischen und der thermischen Eigenschaften des Gesamtsystems.

5 Forschungsdesign

5.1 Arbeitshypothesen

Durch die Verwendung materialeffizienter Leichtbauhüllen und Profilsysteme eröffnet sich ein signifikantes Einsparpotenzial an Material, Masse, CO₂ und grauer Energie, bei deutlicher Erweiterung der architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten der Gebäudehülle. Ein entsprechender Nachweis des nachhaltigen Potenzials von Leichtbaufassaden konnte bereits erfolgreich im Rahmen eines Vorgängervorhabens geführt werden [1]. Deren ökologische Vorteile kommen beim Einsatz in Neubauten sowie Bestandsgebäuden zum Tragen.

5.2 Methodischer Ansatz

Die Ziele im Projekt wurden erreicht, indem zunächst die Erstellung eines Anforderungskatalogs für modulare Rahmenprofile für adaptive mehrlagige Membranhüllen unter Berücksichtigung mechanischer und funktionaler Aspekte erfolgte. Nach der Entwicklung, der Analyse und der Bewertung einer Varianz an Profilgeometrien unter Berücksichtigung des vollständigen Anforderungsspektrums erfolgte die Auswahl geeigneter Systemlösungen in Abstimmung mit den Projektpartnern. Durch numerische Simulationen der vielversprechendsten Profilgeometrien nach statischen (z.B. FEM-Analyse unter Berücksichtigung relevanter Lasteinwirkungen) und thermischen Gesichtspunkten (Wärmedurchgangseigenschaften, Ermittlung des U-Werts) konnten essenzielle Kenndaten zur Qualitätsbewertung der Profile ermittelt werden. Auf dieser Grundlage erfolgte die gemeinsame Auswahl der drei zu realisierenden Profilkonzepte. Die eine Profilgeometrie basiert auf der Kombination und dem Zusammenfügen bereits auf dem Markt verfügbarer Komponenten zu einem Profil zur Aufnahme mehrerer Zwischen- und Decklagen (Profilkonzept „Adnexus“). Die zweite Variante stellt eine speziell entwickelte Profilgeometrie in modularem Design dar (Profilkonzept „Commodus“). Dessen Profilgeometrie wurde einer zusätzlichen Optimierung unterzogen, bei der auch herstellungsrelevante Aspekte Berücksichtigung fanden. Bei der dritten Variante handelt es sich um einen Profileinsatz zur Aufnahme von ETFE-Kissen in das Pfosten-Riegel Fassadenprofil-System Therm+ der Firma Raico Bautechnik GmbH. Profilrahmen mit dem Konzept „Adnexus“ wurden zusammengebaut und mit hocheffizienten Membranen bespannt, um die Praxistauglichkeit beim Einbau der Membran- und Funktionslagen zu erproben sowie mechanische und thermische Versuche an den Modulen bestehend aus Rahmen und Hülle durchführen zu können. Durch den Vergleich der Simulations- mit den Versuchsergebnissen konnte die Anpassung von Details zur Profilloptimierung erfolgen. Der Einbau eines Fassadenmoduls am Demonstratorhochhaus war aus Covid bedingten Gründen leider nicht mehr möglich. Die Umsetzung in einer Musterfassade zur Bewertung des vollständigen Funktionsumfangs einer adaptiven Gebäudehülle durch die Integration der Systemkomponenten und Anschlüsse wird nach Projektabschluss angestrebt. Vorgesehen ist ein intensives Monitoring durch den Einsatz der vorbereiteten messtechnischen Infrastruktur, so dass eine Untersuchung unter realen Witterungsbedingungen erfolgen kann und eine Verifizierung der Gebrauchstauglichkeit möglich wird.

5.3 Projektteam und Organisation

Die Projektbearbeitung erfolgte in einem interdisziplinären Team. Als Bauingenieur hat Silas Kalmbach wesentliche Beiträge im Bereich Simulation, Konstruktion und Hüllkonzepte zugesteuert. Zudem wurde das Projekt von einer Architektin, Christina Eisenbarth, entwerferisch, methodisch und inhaltlich unterstützt. Jan Bolay wiederum hat in das Projekt die empirische Vermessung diversen Hüllaufbauten eingebracht. Die wissenschaftliche sowie administrative Leitung und Koordination des Projekts oblag Dr. Walter Haase.

5.4 Arbeitspakete und Meilensteine

Die Projektbearbeitung erfolgte im Rahmen von 5 Arbeitspaketen (AP) mit den nachfolgend benannten Meilensteinen (M):

AP1 – Recherche und Anforderungen

M1: Grundlagenermittlung abgeschlossen

AP2 – Planung, Entwicklung und Umsetzung von Systemrahmenprofilen

M2: Fassadensystemvarianten liegen vor

AP3 – Prüfung der Profil- und Hüllsysteme

M3: Prototypen wurden hergestellt und einer mechanischen sowie thermischen Untersuchung bzw. Optimierung unterzogen

AP 4 – Realisierung und Test des 1:1 Prototyps

M4: Die Prüfung der Prototypen ist abgeschlossen und das 1:1 Fassadenmodul konzipiert, optimiert und realisiert. Die Messdatenerfassung wurde begonnen

AP 5 – Abschlussbericht

M5: Fassade ist funktionsfähig, Auswertung der messtechnisch erfassten Daten ist abgeschlossen und die Forschungsergebnisse sind dokumentiert

6 Projektverlauf und Begründung von Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Die Grundlagenermittlung (AP1/M1) sowie die Entwicklung und die numerischen Simulationen als auch die Optimierung von Fassadensystemvarianten (AP2/M2) wurden antragsgemäß durchgeführt. Prototypen wurden hergestellt (AP3/M3) und die mechanischen und thermischen Untersuchungen konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Im Arbeitspaket 4 erfolgte die Planung und Herstellung (AP 4.1) von fünf verschiedenen Typen von Lagenaufbauten für Fassaden. Für die Vermessung im Heizkasten wurden hiervon insgesamt mehr als zehn unterschiedliche Varianten hergestellt und vermessen. Diese und weitere Hüllentypen fanden Eingang in die Planung der Demonstratorfassade. Es erfolgte die Fertigung von Prototyprahmen mit drei unterschiedlichen Abmessungen (klein: 50 cm x 50 cm, mittel: 82 cm x 82 cm, groß: 123 cm x 123 cm). Die großen Rahmen fanden Verwendung bei den wärmetechnischen Messungen im geregelten Heizkasten. Aufgrund von Verzögerung beim Bau des Demonstratorhochhauses des Sonderforschungsbereichs 1244 (SFB1244), an dem die Installation der entwickelten Fassadenmodule vorgesehen war, musste die Realisierung des 1:1 Prototyps zunächst zeitlich verschoben werden und sollte schließlich im Projektverlängerungszeitraum erfolgen. Der 1:1 Prototyp konnte letztlich nicht ausgeführt werden aufgrund von Corona bedingten Problemen bei der Bereitstellung der Profilsysteme wie Lieferengpässen sowie mangelnden Fertigungskapazitäten durch Personalausfälle bei den unterstützenden Firmen, des dafür nötigen zu großen Kostenaufwands für die Beschaffung und die Installation am Demonstrator. Zudem konnte die rechtliche Vorgehensweise beim Genehmigungsprozess zum Einbau

neuer Fassaden am Hochhaus nicht schnell genug geklärt werden. Die Planung der Fassade für das Demonstratorhochhaus erfolgte dennoch im Rahmen der Projektbearbeitung. Die Installation der Fassadenmodule allerdings erfolgte nicht wie im Antrag vorgesehen, sondern vielmehr im Rahmen der Fertigung der Muster für die thermischen Messung im Heizkasten. Dies berücksichtigend kann AP 4.2 ebenfalls als abgeschlossen betrachtet werden. Die für das Monitoring notwendige Messtechnik wurde festgelegt und auch exemplarisch getestet. Das Monitoringkonzept wurde ausgearbeitet, sodass festgehalten werden kann, dass alle vorbereitenden Arbeiten im AP 4.3 durchgeführt wurden. Nicht möglich war hingegen aufgrund der oben erwähnten Probleme die Messdatenerfassung an der Fassade des Demonstratorhochhauses. Vorgesehen ist bis Jahresmitte 2024 der Einbau der textilen Fassaden als Ersatz der provisorischen, einlagigen Membranfassade am Demonstratorhochhaus des SFB1244. In diesem Kontext geplant ist der Einsatz der im Projekt und im Anschluss weiterentwickelten Hüllelemente und Profillösungen. Nach einer entsprechenden Monitoringphase werden die dabei gewonnen Ergebnisse veröffentlicht werden. Hierbei werden wir auf die Projektförderung hinweisen.

7 Ergebnisse

Die vom 01.03.2019 bis zum 30.09.2022 durchgeführten Arbeiten am Forschungsprojekt „Entwicklung adaptiver Membranfassadenmodule“ sind in den nachfolgenden Unterkapiteln dargelegt. Die Unterkapitel orientieren sich an der Gliederung der im Antrag definierten Arbeitspakete.

7.1 AP 1 Recherche und Anforderungen

Die in AP 1 durchgeführte Recherche gliedert sich in zwei Bereiche. Zum einen sind dies die Anforderungen an Membranhüllen und modulare Fassadensysteme und zum anderen werden die Erfordernisse aus der Integration adaptiver Systeme und Regelungskonzepte behandelt.

7.1.1 Anforderungen an Membranhüllen und modulare Fassadensysteme

Die Anforderungen an Membranhüllen beziehen sich auf Wohn- sowie Nichtwohngebäuden in Deutschland. Die Realisierung und Untersuchung eines 1:1 Prototyps ist am Demonstratorhochhaus des Sonderforschungsbereichs 1244 vorgesehen, infolgedessen wurden alle für Hochhäuser spezifischen Anforderungen mit einbezogen.

Die im Weiteren vorgestellten Anforderungen an Fassaden erstrecken sich auf die Bereiche Wärme-, Feuchte- und Schallschutz. Ergänzt werden sie um die Themengebiete Brandschutz, Umweltwirkung, konstruktive Anforderungen, architektonische Aspekte und Wirtschaftlichkeit.

Thermische Anforderungen

Für die Bewertungen von Gebäudehüllen ist das Wärmedurchgangsverhalten ein wichtiger Faktor. Den rechtlichen Rahmen der Anforderungen gibt zum einen die Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (EnEV) [2] und zum anderen die DIN 4108-2:2013-02 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, mit dem Teil 2 „Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“ vor [3].

Für die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2:2013-02 soll der Wärmedurchlasswiderstand R von ein- und mehrschaligen Bauteilen in Leichtbauweise (flächenbezogene Masse $m' < 100 \text{ kg/m}^2$) nicht kleiner als $R = 1,75 \text{ m}^2\text{K/W}$ sein. Dies bedeutet, dass der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) maximal $0,57 \text{ W/m}^2\text{K}$ betragen darf.

Inhomogene, nichttransparente Bauteile, wie zum Beispiel Skelettbauweisen oder Fassaden, die als Pfosten-Riegel-Konstruktion ausgeführt werden, müssen im Bereich des Gefaches einen Wärmedurch-

lasswiderstand von $R_G \geq 1,75 \text{ m}^2\text{K/W}$ aufweisen. Für opake Ausfachungen transparenter und teiltransparenter Bauteile ist $R \geq 1,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ einzuhalten. Rahmen sind nach den Anforderungen der DIN EN ISO 10077-1 auszuführen [4].

Feuchteschutz

Anforderungen bezüglich des Feuchteschutzes sind der DIN 4108-3:2018-10 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung“ zu entnehmen [5]. Feuchteschutzvorschriften sollen sowohl Bauteile wie Bewohner von Gebäuden schützen. Dabei sind Korrosionsvorgänge, Schimmelpilzbildung und Minderung der Wärmedämmung aufgrund von Feuchte thematisiert.

In der Norm werden kritische Luftfeuchten angegeben, um Tauwasser wie auch Schimmelbildung auszuschließen. Die relative Feuchte darf, um die Schimmelbildung zu unterbinden, nicht mehr als 80 % betragen. Um Tauwasser auszuschließen sind Werte der relativen Feuchte unter 100 % nötig.

Die Luftdichtheit spielt auch im Hinblick auf die Feuchte eine wichtige Rolle. Luftströmungen innerhalb von Bauteilen sind aufgrund von Kondenswasserbildungen zu vermeiden.

Schallschutz

Die Anforderungen bezüglich des Schallschutzes lassen sich der DIN 4109-1:2018-01 „Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen“ entnehmen [6].

Die Schallschutzziele werden für die Nutzungsarten der Räume festgelegt. Für Wände gelten Anforderungen bezüglich des Schutzes vor Geräuschen aus Nebenräumen, Anlagen oder Gewerbebetrieb im gleichen Gebäude und vor Außenlärm. Die Luftschalldämmung wird mittels des bewerteten Bau-Schalldämm-Maßes R'_w beschrieben. Bei Mehrfamilienhäusern und Bürogebäuden gelten für die Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen $R'_w \geq 53 \text{ dB}$.

Die Masse der Bauteile spielt bei der akustischen Wirksamkeit einer Schallschutzmaßnahme eine wichtige Rolle, weshalb das Erzielen von hohen Schalldämmmaßen beim Einsatz von Membranmaterialien mit einer Masse von unter 2 kg/m^2 eine Herausforderung darstellt. Lösungsansätze wurden am ILEK im Projekt ARAKO erarbeitet [7]. Zum Einsatz kamen hierbei unter anderem fluiddurströmte Taschengewebe zur adaptiven Erhöhung der Masse und gradiert vernadelte Vliese, wodurch ein breites Spektrum an Frequenzen gedämpft werden kann.

Brandschutz

Im Gebäudebereich in Deutschland gibt es für Brandschutzanforderungen an Baustoffe und Bauteile zwei gültige Normen. Zum einen ist dies die DIN 4102-1:1998-05 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen“ [8]. Diese Norm legt eine Einteilung des Brandverhaltens in Bauteilklassen fest. Es wird zwischen nicht brennbaren und brennbaren Baustoffen unterschieden. Zum anderen erfolgt die Einteilung mittels Brandprüfungen oder anhand der Klassifizierung der DIN 4102-4.

Darüber hinaus gilt die europäische Norm DIN EN 13501-1:2019-05 „Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten“ [9]. Diese Norm legt ebenfalls Bestimmungen über das Brandverhalten und deren Klassifizierungsverfahren fest. Dabei werden Bauprodukte und Bauteile betrachtet.

In der überwiegenden Zahl an Bauordnungen der Bundesländer wird in Gebäuden der bauliche Brandschutz nach den Gebäudeklassen bemessen. Nach der Landesbauordnung Baden-Württemberg sind Gebäude, die ab der Geländeoberkante in einer Höhe von 22 m Aufenthaltsräume beherbergen, Hochhäuser und fallen in die Gebäudeklasse 5. Daraus folgen spezielle Anforderungen für den Brandschutz. Bei Fassaden mit ihrer raumabschließenden Funktion ist primär die Brandausbreitung ausreichend lang

zu begrenzen [10]. Zudem ist die Musterbauordnung (MBO) zu beachten, welche einheitliche Standards als Empfehlung zur Übernahme in die Länderbauordnungen der Bundesländer setzt.

Umweltwirkung

Grundsätzliches lässt sich der Verordnung der Europäischen Union Nr. 305/2011 entnehmen. Darin werden Bestimmungen angegeben, die Bauwerke als Ganzes und dessen Bestandteile zu erfüllen haben. Neben den Grundanforderungen Standsicherheit, Brandschutz und Barrierefreiheit sind Anforderungen für die nachhaltige Ressourcennutzung definiert. Dabei ist zu gewährleisten, dass umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe eingesetzt werden. Das Gebäude selbst soll dauerhaft sein. Im Anschluss an die Nutzungsdauer sind die Baustoffe wiederzuverwenden oder zu recyceln.

Im Zusammenhang mit der Lebensdauer von Bauteilen ist neben der Baustoffart sowie der -masse auch die, für die Herstellung der Baustoffe aufgewandten Energie, zu betrachten. Hierzu kann eine Ökobilanzierung herangezogen werden. Die Stoff- und Energieflüsse sowie die einzelnen Prozesse werden innerhalb einer Systemgrenze erfasst. Zusätzlich ist die Art des Umgangs mit dem Material am Ende der Lebensdauer von Bedeutung. Die Recyclingfähigkeit stellt einen zentralen Aspekt dar. Wertstoffe sollen Teil eines Kreislaufes sein, in dem sie weiter- oder wiederverwendet werden. Es sollen Ressourcen oder Ausgangsprodukte der gleichen Qualität entstehen. Thermische Verwertung oder Deponierung ist möglichst zu vermeiden. Bei der Entwicklung der Profilsysteme sowie der Hüllaufbauten wurden die Aspekte der Trennung der Komponenten am Lebensende und die Rückführung in den Stoffkreislauf beachtet.

Konstruktive Anforderungen

Fassaden als Teile von Bauwerken müssen den allgemeinen konstruktiven Anforderungen entsprechen. Laut den Grundanforderungen an Bauwerke der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 muss die mechanische Festigkeit und Standsicherheit während der Nutzung und Errichtung gewährleistet sein. Dabei sind unzulässig große Verformungen, das Ausmaß von Folgeschädigung sowie der Einsturz zu vermeiden [11].

Bezüglich des Nachweises der Tragsicherheit gibt es für Membranfassaden derzeit wenige Normen und Richtlinien. Das Sicherheitskonzept für Membranen wird durch Bestimmung von zulässigen Spannungen festgelegt. Dabei werden vorgegebene Zugfestigkeiten mit Sicherheitsfaktoren reduziert. Diese Sicherheitsfaktoren betragen bei Textilien den Wert fünf bis sieben, bei Folien den Wert vier bis fünf [12].

Die einwirkenden Lasten dürfen zu keinen Überschreitungen der zulässigen Spannungen führen. Betrachtet werden die Lastfälle Vorspannung, Wind und Temperaturänderung. Die Eigenlast kann bei den Lastkombinationen aufgrund der geringen Materialmassen meist vernachlässigt werden [12].

Die konstruktiven Anforderungen gelten gleichzeitig für die Rahmenprofile, in denen die Materiallagen gefasst werden. Hier ist auf die Möglichkeit des Lagen austauschs, die thermische Trennung sowie auf die Unterbringung der Zu- und Ableitungen für Strom und Luft zu achten. Bei der Konstruktion der Rahmen sind die Toleranzen aus der Fertigung, der Montage sowie Bauteilbewegungen zu beachten. Diese sind besonders für das Einhalten der Schlagregendichtheit von Bedeutung.

Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor bei textilen Fassaden ist der Einbruchschutz. Speziell für die unteren Geschosse eines Hochhauses ist dieser von Relevanz. Zum Einsatz können hierfür Stahlnetze als integraler Bestandteil oder eine Alarmtechnik durch leitfähige Fasern im Lagenaufbau eingebunden werden.

Architektonische Aspekte

Neben den technischen Funktionen erfüllen Fassaden wichtige architektonische Aspekte. Sie stellen den sichtbaren Teil der Gebäude dar und tragen maßgebend zum Gesamterscheinungsbild bei. Mit Gebäudehüllen ist eine Symbolik verbunden. Über die Gestaltung der Gebäudehülle werden Aussagen bezüglich der Nutzung, dem sozialen Kontext, der Haltung des Architekten und des Bauherrn transportiert.

Textile Fassaden bieten aufgrund der großen Material- und der unerschöpflichen Formenvielfalt eine große gestalterische Freiheit. Die Oberflächenbeschaffenheit innen wie außen kann in großer Variationsbreite erfolgen. Oberflächen können glatt oder rau, matt oder glänzend aber auch strukturiert sein.

Wirtschaftlichkeit

Aufgrund ihres geringen Flächengewichtes bieten Membranen ein hohes Potenzial zur Reduzierung der Masse von Fassaden und der damit verbundenen grauen Energie. Um eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit treffen zu können, ist es notwendig die Kosten für die Materialien, die Prozesse zur Herstellung sowie Installation aber auch für die Wartung neben dem Energiebedarf zur thermischen Konditionierung der Räume zu erfassen und auszuwerten. Konkrete Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit sind erst nach einem ausführlichen Monitoring unter realen Einsatzbedingungen und daher nicht im Rahmen des Forschungsvorhabens bestimmbar.

7.1.2 Integration adaptiver Systeme und Regelungskonzepte

Adaptivität bezeichnet die Fähigkeit auf sich verändernde Anforderungen oder Einwirkungen reagieren zu können. Adaptive Strukturen können innerhalb von Fassadenaufbauten zum Einsatz kommen und sind in textiler oder Folien-Form ausführbar. Im Folgenden werden einige Beispiele zur Umsetzung von Adaptivität in Fassaden vorgestellt. Weitere Konzepte wurden im Arbeitspaket „Entwurfsideen für das adaptive Hüllsystem“ entwickelt.

Thermische Adaptivität

Aufgrund der geringen Masse von Membranwerkstoffen und dem damit resultierenden geringen Wärmespeichervermögen sind Konzepte der thermischen Adaptivität relevant. Die Fassade kann dabei in der Lage sein, thermische Energie zu speichern, um diese zeitverzögert wieder abzugeben, um thermische Energie bei Bedarf in den Raum einzutragen. Im Forschungsprojekt „Adaptive mehrlagige textile Gebäudehülle“ wurden bereits Konzepte mit Phasenwechsel-Materialien entwickelt, welche durch Speicherung der latenten Wärme ein Wärmespeichervermögen aufweisen [1]. Eine weitere Möglichkeit bietet das Einbinden von Heizgeweben, welche aktiv Energie in das System eintragen können. Als Kenngrößen für eine aktive Regelung einer thermisch adaptiven Fassade sind primär die Temperaturen im Innenraum und der Umgebung heranzuziehen. Der Einsatz von Heizgeweben als Bestandteil der Innenhülle wurde im Rahmen des Forschungsprojektes untersucht.

Hygrische Adaptivität

Neben der Varianz der solaren Strahlung und der Außentemperatur ist die Berücksichtigung der Veränderlichkeit der relativen Luftfeuchte ein elementarer Faktor beim Entwurf von Fassaden. Relevant ist hierbei die Bestimmung der Temperatur des Taupunktes in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen im Hüllaufbau sowie dem Profilsystem.

Exemplarisch konnte der gezielte Einsatz eines Heizgewebes, im Lagenaufbau, zu einer adaptiven Verschiebung der Lage des Taupunktes genutzt werden. Dies ermöglicht eine erhöhte Flexibilität bei der Umsetzung verschiedener Lagenaufbauten, da die Position des Taupunktes im Profil- und Hüllenschnitt abhängig von den Rahmenbedingungen beeinflusst werden kann.

Akustische Adaptivität

Eine Anpassung der raumakustischen Eigenschaften an veränderliche Raum- und Gebäudenutzungen erfolgt meist lediglich bei großen Konzert- und Veranstaltungsräumen. Um den Nutzungsvarianten kleiner und mittlerer Räume gerecht zu werden, bedarf es eines akustisch veränderbaren und wirksamen Systems, das auf die zahlreichen Nutzungsweisen von Räumen, auf die wechselnden Umwelteinflüsse und damit verknüpften Lärmimmissionen unmittelbar reagieren kann.

Aus dem Forschungsvorhaben ARAKO, welches in Kooperation zwischen dem ILEK und dem Lehrstuhl für Bauphysik (LBP) bearbeitet wurde, hat sich eine Eingrenzung erfolgsversprechender Einflussfaktoren zur akustischen Konditionierung und damit zur Steuerung der Anpassungsfähigkeit ergeben.

Bei den strukturellen Anpassungen bilden eine Massebeaufschlagung der Konstruktion und die Variation des Abstands der Lagen den maßgebenden Einfluss. Das in Abbildung 1 dargestellte Konzept zeigt ein zweilagiges, abgestepptes Taschengewebesystem vor einem Verbundvliesstoff, welches durch eine variable Fluidfüllung eine Adaption der flächenbezogenen Masse ermöglicht. Die Variabilität der Menge des Füllmediums und des Fülldruckes ermöglicht es das Schwingungs- und Reflexionsverhalten der Lage zu beeinflussen [7].

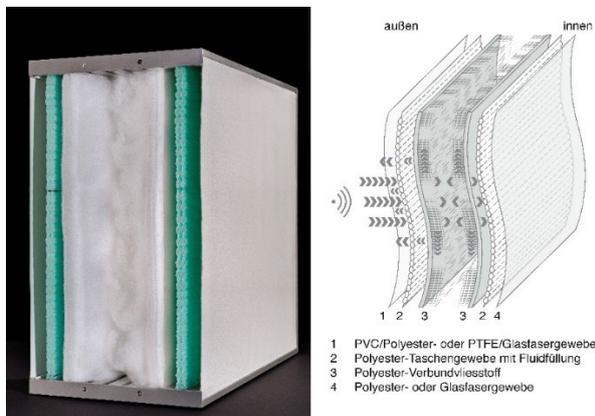


Abb. 1: Systemaufbau mit integrierten, fluidgefüllten Taschengeweben (Forschungsprojekt: Adaptive Raumakustik und akustische Konditionierung im Bauwesen (ARAKO), gefördert im Rahmen des Innovationsprogramms Zukunft Bau [7], Foto: ILEK / G. Metzger)

Adaptivität des Licht- und Energiedurchgangs

Aufgrund der Vielzahl verfügbarer Membranwerkstoffe mit verschiedenartigen Materialeigenschaften eignen sich diese in besonderem Maße für eine Adaptivität des Licht- und Energiedurchgangs. Im Hinblick auf den Energieeintrag sind Konzepte möglich, welche anhand von Verschattungen solare Gewinne dahingehend regeln, dass der Energiebedarf zum Einhalten der gewünschten Raumwärme minimiert wird. Bei einer feinen Strukturierung der adaptiven Elemente ist eine Erweiterung zu selektiven Sonnenschutzkonzepten möglich, wodurch zudem Blendung vermieden werden kann. Entwürfe, welche hierfür zum Einsatz kommen, basieren unter anderem auf Faltstrukturen, schaltbaren Folien, oder kinematischen Strukturen.

Neben der Regelung der solaren Gewinne kann die aktive Beeinflussung des U-Wertes mit einbezogen werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen“ konnte hierfür bereits ein Konzept entwickelt werden, das auf einer Komprimierbarkeit von Dämmlagen aus Glasfasergespinnsten basiert, wodurch eine Veränderung des Wärmedurchgangs erreicht wurde. Des Weiteren konnte durch den Einsatz von Heizgeweben in Simulationen gezeigt werden, dass durch eine kontrollierte Aktuierung gezielte Änderungen des Wärmedurchganges herbeigeführt werden können.

7.2 AP 2 Planung, Entwicklung und Umsetzung von Systemrahmenprofilen

7.2.1 Grundlagenermittlung

Die Grundlagenermittlung erfolgt einerseits mit Schwerpunkt für den Entwurf des Profilsystems und andererseits mit Schwerpunkt für den Entwurf des Hüllsystems.

Profilsysteme

Während des Entwurfsprozesses für das Profilsystem entstand eine Vielzahl an Varianten. Bei diesen wurde von Beginn an das Konzept der Modularität verfolgt, um die Einbindung unterschiedlicher funktionaler Lagen mit unterschiedlicher Anzahl an Lagen zu ermöglichen. Durch einen kontinuierlichen Optimierungsprozess der Konstruktion und des mechanischen Verhaltens der Profilsysteme entstanden zwei auf die Anforderungen angepasste unterschiedliche Profilsystem-Konzepte. Eine Auswahl der entstandenen Entwürfe ist nachfolgend dargestellt. Auf die optimierten Konzepte mit der Bezeichnung „Adnexus“ (lateinisch: befestigt) und „Commodus“ (lateinisch: passend) wird weiterführend näher eingegangen, da diese für eine mögliche 1:1 Realisierung ausgelegt sind. Bei dem Konzept „Adnexus“ handelt es sich um eine Entwicklung, bei der am Markt erhältliche Profile verwendet und diese in Kombination zu einem größeren Profilsystem zusammengefügt werden (Abbildung 2 bis 9 mit Variante 1 bis 6) [14] um daraus eine neue Gesamtprofilgeometrie zu erzeugen, wodurch auch kleine Rahmen-Stückzahlen kostengünstig hergestellt werden können. Zur Verwendung kamen hierbei die Profile Lamora und Carver der Firma Konstruct AG. Das Konzept „Commodus“ hingegen ist eine strukturoptimierte Neuentwicklung [14]. Zusätzlich erfolgte als dritte Variante die Entwicklung eines Profileinsatzes zur Aufnahme von ETFE-Kissenfassaden in herkömmlichen Pfosten-Riegel-Profilsystemen.

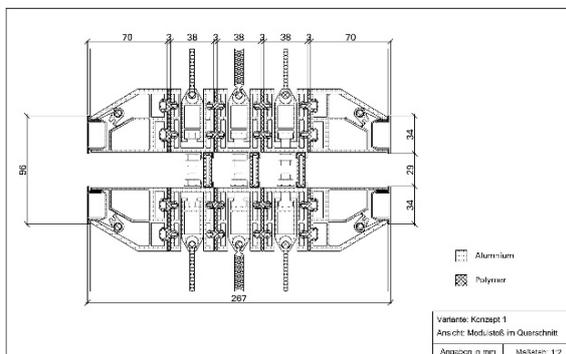


Abb. 2: Variante 1

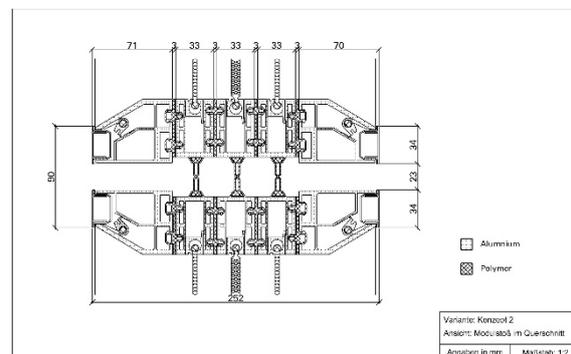


Abb. 3 Variante 2

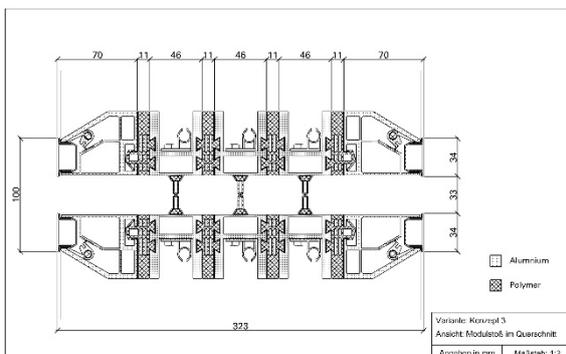


Abb.4: Variante 3

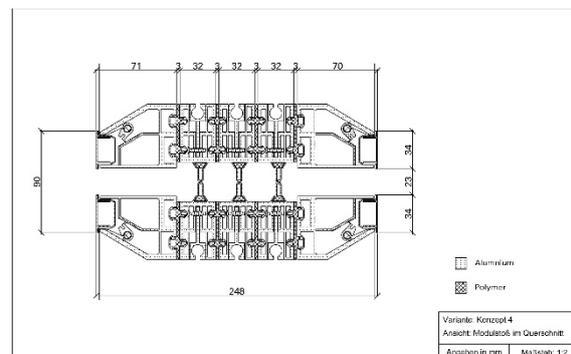


Abb. 5: Variante 4

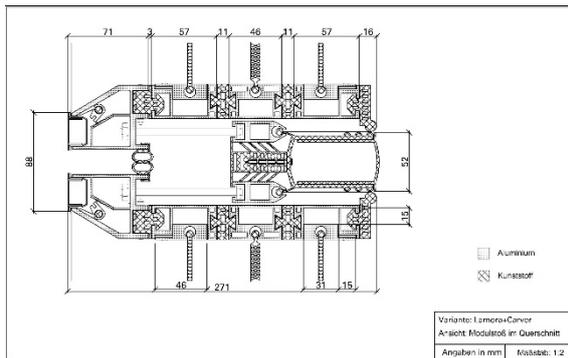


Abb. 6: Variante 5

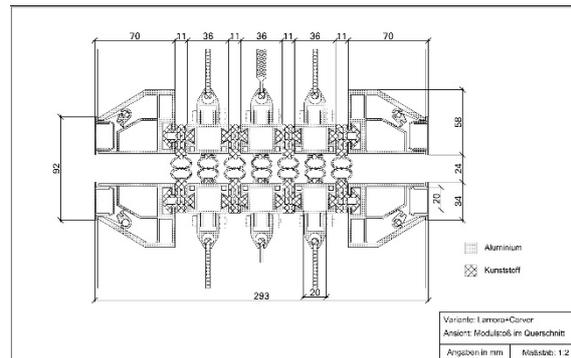


Abb. 7: Variante 6

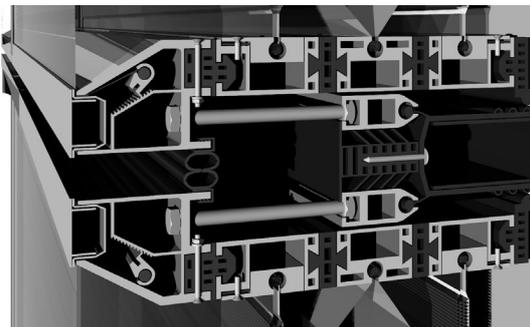


Abb. 8: Rendering Variante 5 [14]



Abb. 9: Rendering Variante 6 [14]

Konzept „Adnexus“

Als beidseitig angeordnetes Außenelement kommt das Profil Lamora (<https://www.konstrukt-ag.com/produkt/system-lamora-ks-p05/>) zum Einsatz. In den Zwischenbereichen befindet sich das System Carver (Kederaufnahmepprofil) (<https://www.konstrukt-ag.com/produkt/kederschiene-carver-ks-p03/>), welches gegen Aluminium U-Profile geschraubt wird (Variante 1). Alle Profilsegmente sind über Schraubverbindungen miteinander verbunden. Die Breite des U-Profils wird im Wesentlichen von der Breite des Carver-Systems und der Höhe der Muttern der Schraubverbindungen der einzelnen Komponenten bestimmt. Im System Carver befindet sich eine Hohlkammer in welcher die Actor- oder Fluidleitungen eingebracht werden können. Zudem kann die Nut im Carver-Profil zusammen mit passenden Schrauben zur Einbringung der Vorspannung sowie zum Nachspannen der Funktionslagen vor dem Einbau des Modulrahmens in der Fassade genutzt werden. Ein Rendering der Variante 1 mit einfachem U-Profil zur Fixierung der Funktionslagen zeigt Abbildung 10. Die zugehörige Zeichnung der Variante 1 ist in Abbildung 11 dargestellt. Bei den weiteren Varianten 2 bis 6 des Konzepts „Adnexus“ kommen an Stelle des Carver-Kederaufnahmeprofils andere Lösungsansätze zur Fixierung und Vorspannung der Funktionslagen zum Tragen. Die Ausführungsvariante 1 mit einfachem U-Zwischenprofil (siehe Abbildungen 2 und 10) erscheint die für den Einsatz probateste Ausführungsform zu sein. Vorteil dieser Ausführungsform ist der Umstand, dass bereits auf dem Markt verfügbare Komponenten zum Einsatz kommen und keine speziellen Aluminiumstrangpressformen für die Herstellung der Profile finanziert werden müssen. Nachteilig zu bewerten ist die Tatsache, dass die Verbindung der einzelnen Profilsegmente mittels Schraubverbindung aufwändig in der Ausführung ist. Eine einfache thermische Trennung kann hierbei über Kunststoffprofile erfolgen, die je nach Ausbildung als Flachmaterial oder als Hohlkammerprofile bezüglich der benötigten Wärmedurchgangswerte angepasst werden können. Das hergestellte Musterelement der Variante 1 ist in Abbildung 12 und 13 abgebildet.

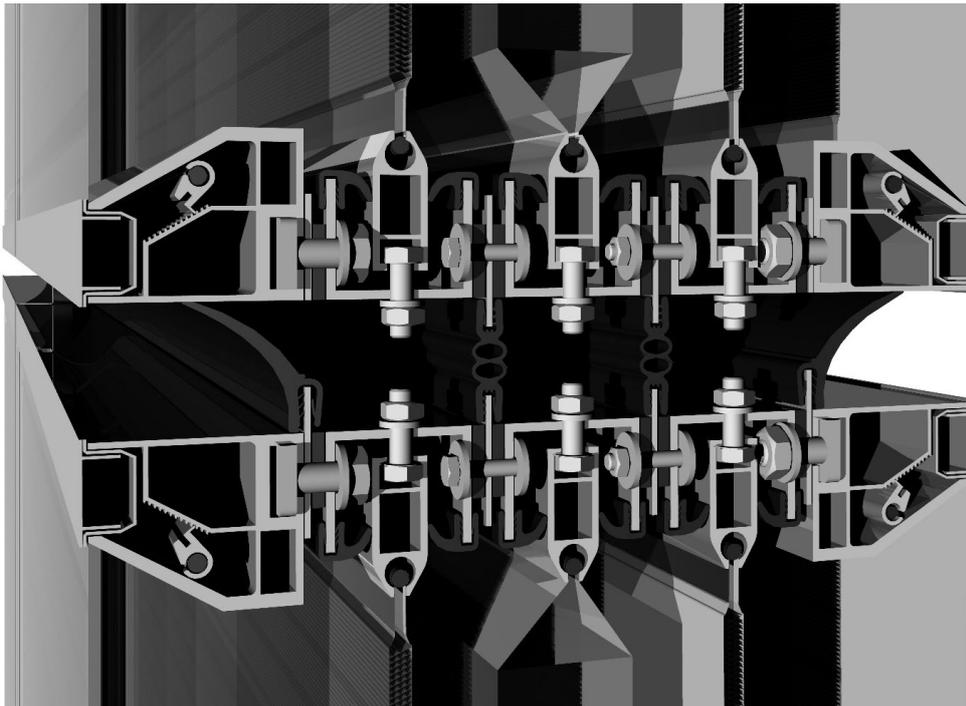


Abb. 10: Rendering Konzept „Adnexus“, Variante 1 [14]

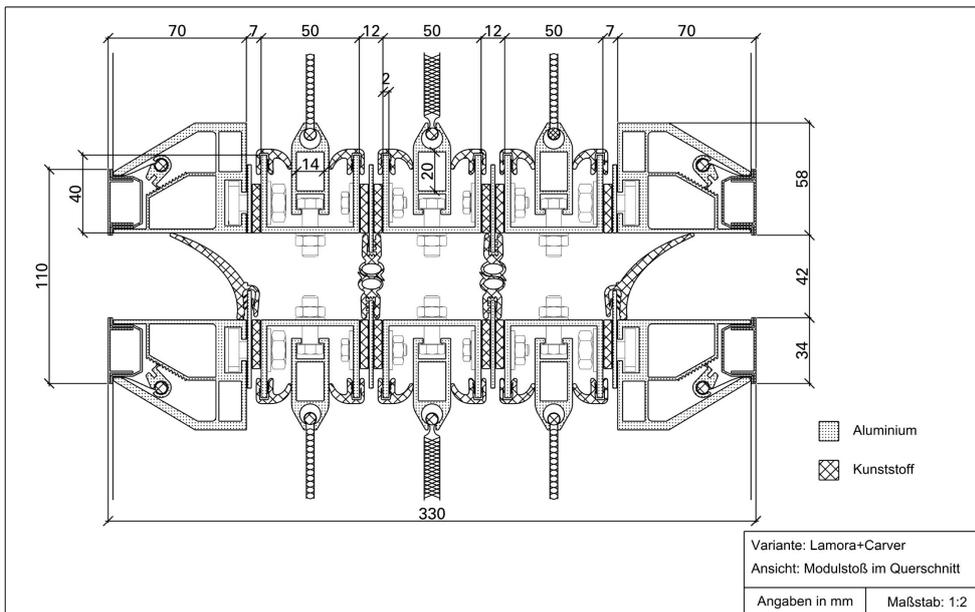


Abb. 11: Zeichnung Konzept „Adnexus“, Variante 1 mit verbreitertem U-Profileinsatz zur Verschraubung mit Durchgangsschrauben [14]

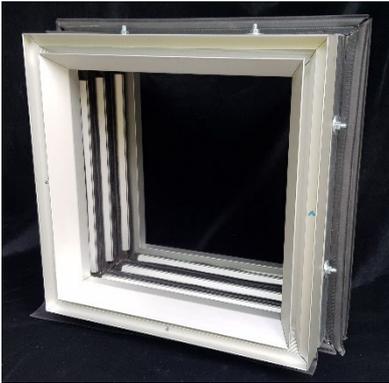


Abb. 12: Ansicht des hergestellten Musterrahmens für die Aufnahme von 5 Lagen (Membran- und Funktionslagen [14], Foto: ILEK / G. Metzger



Abb. 13 : Ansicht auf die Profillinenseite mit den Carver-Elementen [14], Foto: ILEK / G. Metzger

Konzept „Commodus“

Das im Rahmen des Projekts neu entwickelte Profilsystem „Commodus“ (Abb. 14 und 15) ermöglicht eine Verringerung der Modultiefe und eine Reduzierung des Materialbedarfs aufgrund einer kompakteren Konstruktion. Mit dieser Variante wurde untersucht, in welchem Ausmaß ein strukturoptimiertes Profilsystem die geforderten Eigenschaften im Vergleich zum Konzept „Adnexus“ in einem höheren Maß erfüllen kann. Im Falle einer Herstellung der Fassadenmodule und der Anbringung an das Demonstratorhochhaus, wurde bewusst auf die Kriterien im Hinblick auf das vorhandene Budget, die vorliegenden Anforderungen und die konstruktive Anbindung eingegangen.

Die Variante „Commodus“ weist im Vergleich zum Konzept „Adnexus“ eine geringere Ansichtsbreite (durch eine geringere Profilhöhe) sowie eine geringere Profiltiefe auf. Weitere Vorteile sind aufgrund der verwendeten Satteldichtungen eine hohe Dichtheit des Modulstoßes, erhöhter Platz für die Unterbringung der Akkorleitungen der adaptiven Membranfassaden (20 mm x 20 mm), eine einfachere Montage sowie eine variable Aufnahme verschiedener Membranwertstoffe. Nachteilig zu bewerten ist die Tatsache, dass für die zwei unterschiedlichen Profilkomponenten jeweils ein eigenes Strangpresswerkzeug zur Fertigung bereitgestellt werden muss und dies mit entsprechenden Kosten verbunden ist.

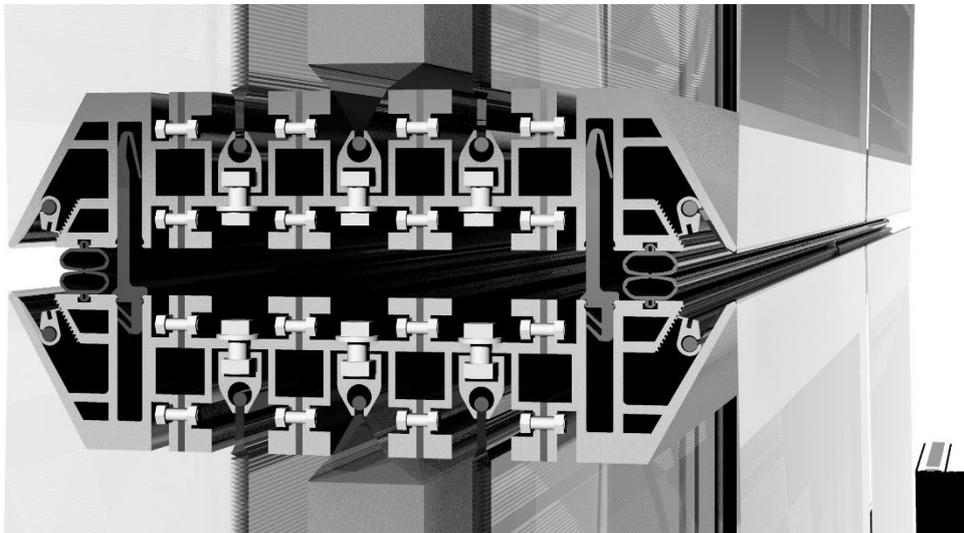


Abb. 14: Rendering Konzept „Commodus“ [14]

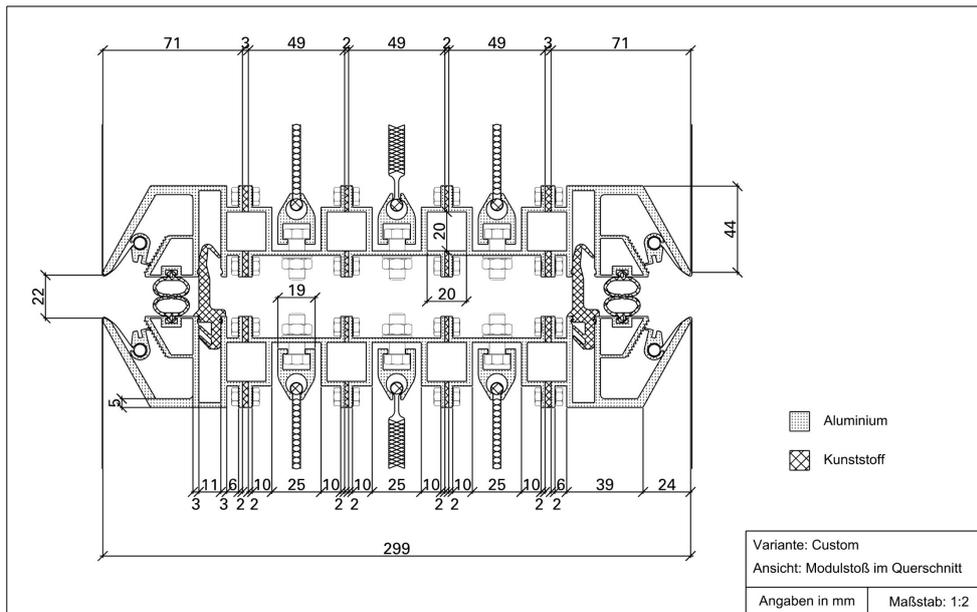


Abb. 15: Konzept „Commodus“ [14]

Zusätzlich erfolgte im Rahmen der Projektbearbeitung der Entwurf für einen Profileinsatz zur Aufnahme von ETFE-Kissen-Fassaden in einem herkömmlichen Pfosten-Riegel-Profilsystem. Dieser Profileinsatz wird nachfolgend in seiner Evolution vorgestellt werden.

Konzept „Keder-THERM+“

In Kooperation mit dem Projektunterstützer, RAICO Bautechnik GmbH, erfolgte die Weiterentwicklung eines Profileinsatzes zur Aufnahme von textilen Mehrlagensystemen sowie für die Einbindung von ETFE-Kissen in das Pfosten-Riegel Fassadenprofil-System Therm+. Diese Weiterentwicklung basiert auf dem Baukastensystem ETFE-THERM+ der Firma Raico (<https://www.raico.de/news/innovationen/etfe-neu-gedacht.html>) und stellt eine Erweiterung in Richtung Integration von bis zu zwei zusätzlichen Zwischenlagen dar.

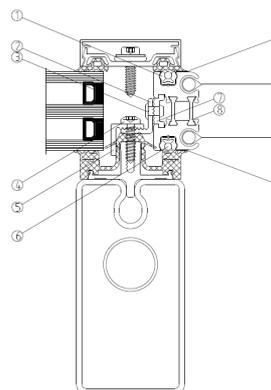


Abb. 16: Konzept „Keder THERM+“ mit Einselelement zur Aufnahme von einer ETFE-Außenfolie, zweier Keder gefasster Zwischenlagen und einer ETFE-Innenlage

7.2.2 Entwurfsideen für das adaptive Hüllsystem

Neben den bereits existierenden und am ILEK entwickelten adaptiven Membranfassaden wurden weitere Bemühungen angestellt, um das Spektrum der adaptiven Hüllsysteme zu erweitern. Durch das Einbinden des Themenfeldes in die Lehre entstanden Entwürfe, mit bauphysikalischen und architektonischen

Schwerpunkten, welche nachfolgend dargestellt sind. Die vorgestellten Entwurfsideen zur adaptiven Anpassung der Licht- und damit der Energietransmission in den dahinterliegenden Innenraum eignen sich für eine Platzierung im Zwischenraum einer ETFE-Kissenkonstruktion, da dort keine Windlasten auf die Systeme wirken.

Das Konzept „Rotation“ (Abb. 17) zielt ab auf die Regelung des Licht- und Strahlungsdurchganges in den dahinterliegenden Raum. Wesentlicher Bestandteil sind selektiv ansteuerbare, rotierende Lamellen. Der Entwurf „Perforation“ (Abb. 18) beruht auf einer gezielten Perforation von Membranwerkstoffen. Wird die Membran in einer oder auch in zwei Richtungen gespannt stellt sich ein Verformungszustand ein, bei welchem sich Abschnitte der Membran aufstellen und somit einen Lichteinfall ermöglichen. Das System „Strech“ (Abb. 19) basiert auf der Flexibilität von stark dehnbaren Geweben. Das Gewebe wird durch einen Spant nach außen, also senkrecht zur Fassadenebene, gedrückt, wodurch eine gekrümmte Form entsteht, die an den gekrümmten Kanten Öffnungen erzeugt. Angewendet werden kann dieses Konzept zur Realisierung eines selektiven Blendschutzes oder einer gezielten Belüftung. Inspiriert von der Natur, besteht das Konzept „MimoLAB“ (Abb. 20) aus pneumatisch aktuierten „Blättern“. Das Erscheinungsbild ist geprägt von der Mimose, welche durch ein Einfalten ihrer Blätter aktiv auf ihr Umfeld reagiert. Durch das Einbinden von wasserbeständigen und flexiblen LED-Streifen in einen textilen Lagenaufbau zeigt das Konzept „WALL-E“ (Abb. 21) die Potenziale hinterleuchteter textiler Flächen auf, welche durch ihre flächige und diffuse Lichttransmission sowohl Innenräume als auch Straßen erhellen könnte. Zudem ist durch eine feingliedrige Strukturierung der Leuchtdioden eine Wiedergabe von bewegten Bildern und von Text möglich. Die kinematische Struktur „Space Network“ (Abb. 22) besteht in seiner Grundform aus einer Aneinanderreihung und Überlagerung von sechseckigen Elementen, bei welchen sich jede Fläche eines Feldes durch einen Schirm öffnen und schließen lässt. Hierdurch wird eine hohe Flexibilität im Einsatz als selektiver Sonnenschutz ermöglicht. Formveränderungen in der Fassade werden beim Entwurf „Fold“ (Abb. 23) durch die Anwendung von Faltungen ermöglicht. Abbildung 24 zeigt einige der Entwürfe im Maßstab 1:1 mit einer jeweiligen Breite von 1 m und der Höhe von 3 m.



Abb. 17: Konzept „Rotation“ (ILEK-Lehrveranstaltung Free Form im SS19 mit Beitrag von A. Sygut, A. Cann, J. Inman, I. Saad, S. Harbuzi), Fotos: ILEK / C. Eisenbarth

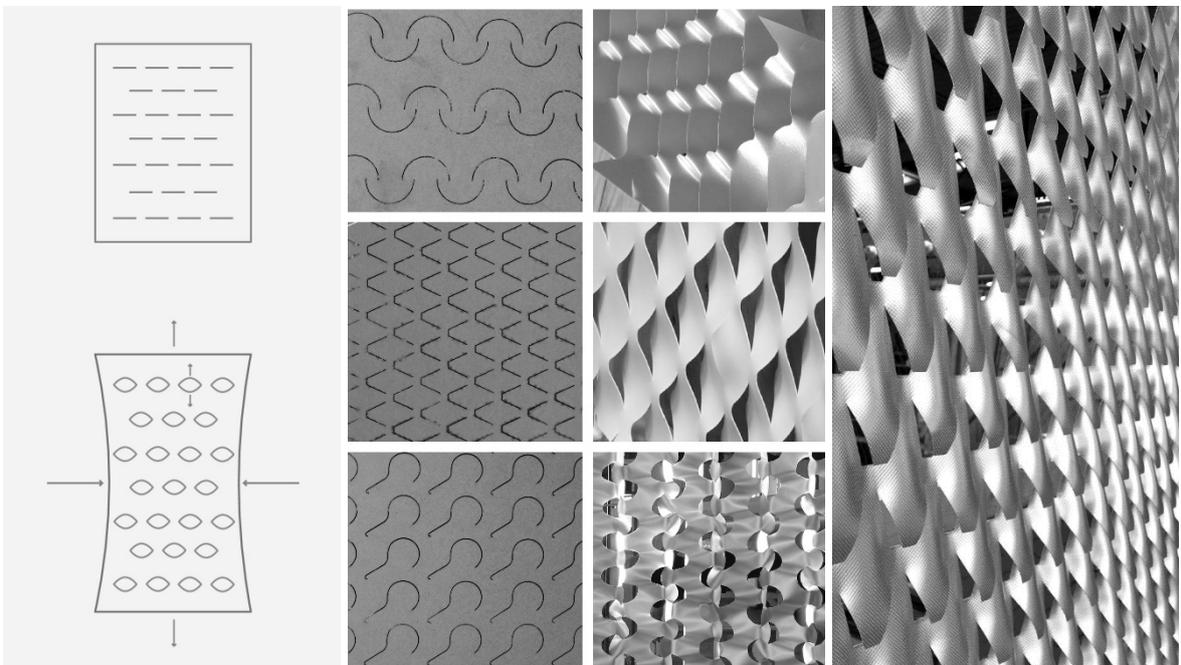


Abb. 18: Konzept „Perforation“ (Konzeptentwicklung am ILEK und Bearbeitung in der Lehrveranstaltung Free Form im SS19 mit Beitrag von A. Sygut, A. Cann, J. Inman, I. Saad, S. Harbuzi mit Betreuung durch Christina Eisenbarth), Fotos: ILEK / C. Eisenbarth



Abb. 19: Das Konzept „Strech“ (Konzeptentwicklung am ILEK und Bearbeitung in der Lehrveranstaltung Free Form im SS19 mit Beitrag von A. Sygut, A. Cann, J. Inman, I. Saad, S. Harbuzi unter der Betreuung durch Christina Eisenbarth), Fotos: ILEK / C. Eisenbarth



Abb. 20: Konzept „MimoLAB“ (Konzeptentwicklung am ILEK und Bearbeitung in der Lehrveranstaltung [adaptive] textile skins im WS19 mit Beitrag von S. Bilgili, S. Nikolova unter der Betreuung durch Christina Eisenbarth)

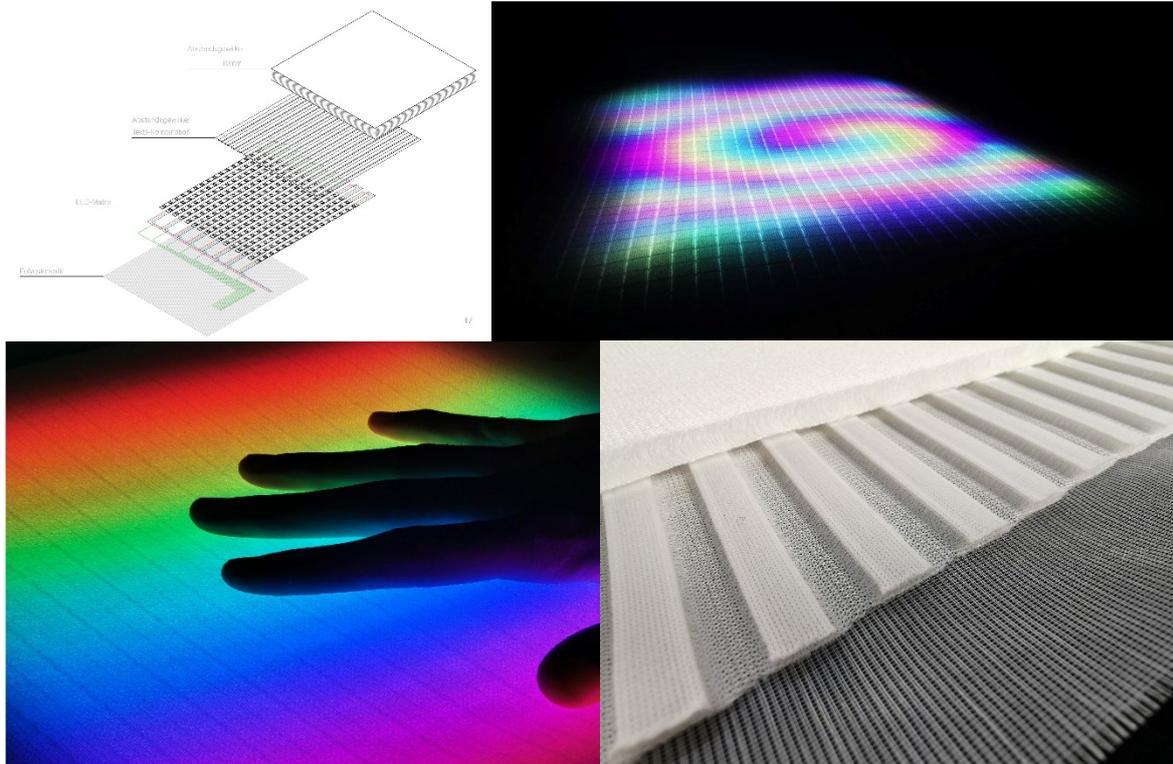


Abb.21: Konzept „WALL-E“ (Konzeptentwicklung am ILEK und Bearbeitung in der Lehrveranstaltung [adaptive] textile skins im WS19 mit Beitrag von Y. Alshalal, S. Salkic, M. Spielvogel mit Betreuung durch Christina Eisenbarth und Silas Kalmbach)

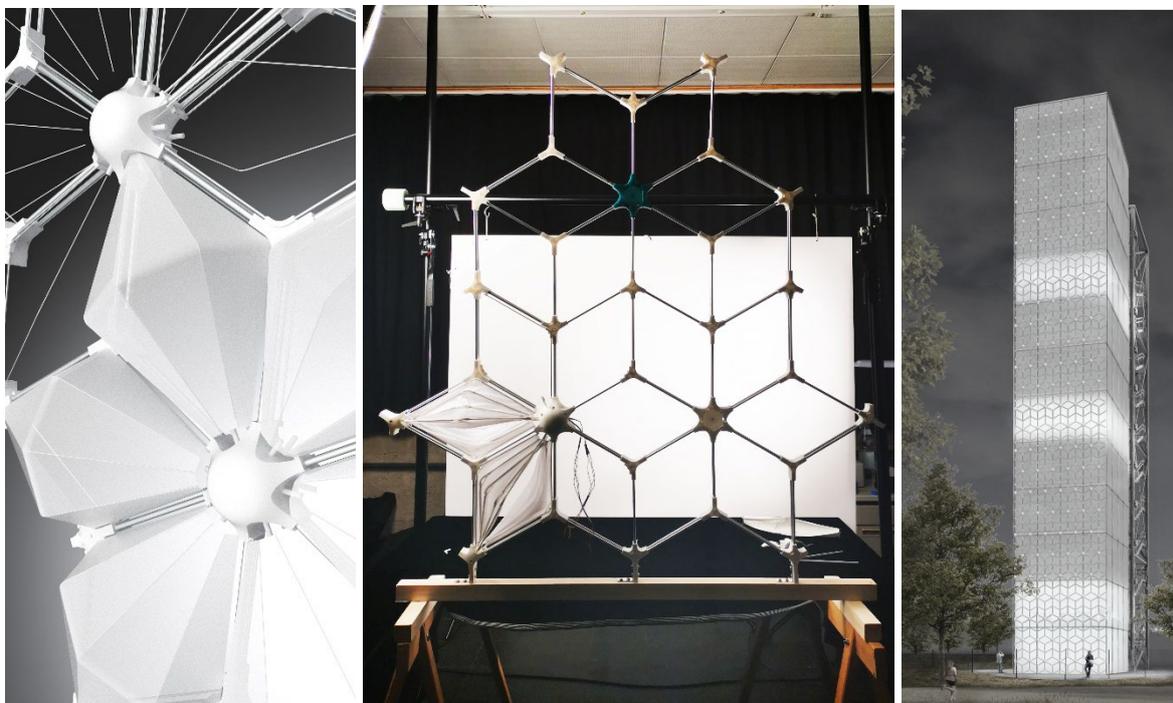


Abb.22: Konzept „Space Network“ (Konzeptentwicklung am ILEK und Bearbeitung in der Lehrveranstaltung [adaptive] textile skins im WS19 mit Beitrag von J. Liu, S. Rosas unter Betreuung von Christina Eisenbarth und Silas Kalmbach)

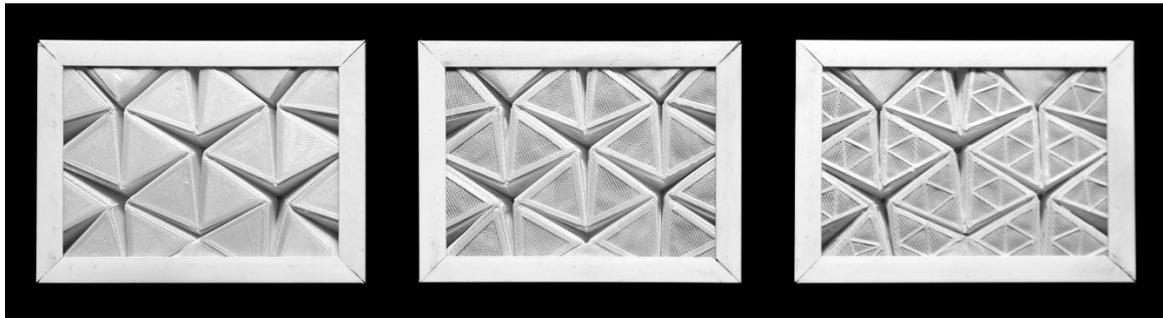


Abb.23: Konzept „Fold“ (Konzeptentwicklung am ILEK und Bearbeitung in der Lehrveranstaltung [adaptive] textile skins im WS19 mit Beitrag von T. Venetsanos, A. Greiner, R. Sadeghi unter Betreuung durch Christina Eisenbarth)



Abb.24: Realisierung einiger Konzepte im 1:1 Maßstab mit einer Modulhöhe von ca. 3 m sowie einer Breite von ca. 1 m, Foto: ILEK / C. Eisenbarth

7.2.3 Konzept „PAOSS“

Ausgehend von einer weiteren Entwurfsidee von Eisenbarth aus [15] erfolgte die Entwicklung eines innovativen, material- und energieeffizienten Fassadenkonzepts: ein pneumatisch aktuiertes Origami-Sonnenschutzsystem - kurz „PAOSS“ -, das die ästhetischen und materialimmanenten Qualitäten textiler Materialien mit den funktionalen Aspekten einer kontrollierten und gezielten Lichttransmissionsregelung mittels integrierter aktiver pneumatischer Komponenten verbindet (Abb. 25). Angelehnt an die von der NASA entwickelte Faltstruktur „Starshade“ verfügt dieses über eine im gefalteten Zustand kompakte Bauform, welche sich durch den eingebrachten Luftdruck pneumatisch und rotativ entfalten lässt.

Die überwiegende Mehrzahl an verfügbaren Sonnen- und Blendschutzsystemen verwendet mechanische oder elektronische Antriebe und ist daher sehr anfällig für Defekte, Materialverschleiß, Systemausfälle und Alterung. Darüber hinaus zeichnen sie sich durch einen höheren Ressourcenverbrauch in Bezug auf das eingesetzte Material und die erforderliche Betriebsenergie aus. Die Herausforderung bestand also darin, eine Lösung zu entwickeln, die eine hohe Effektivität und niedrige technologische Anforderungen mit einem Minimum an Energie- und Materialverbrauch verbindet [16]. Im Folgenden werden die Entwicklungsschritte eines solchen textilbasierten, energie- und ressourceneffizienten Fassadenbauteils für den gezielten Sonnen- und Blendschutz vorgestellt.

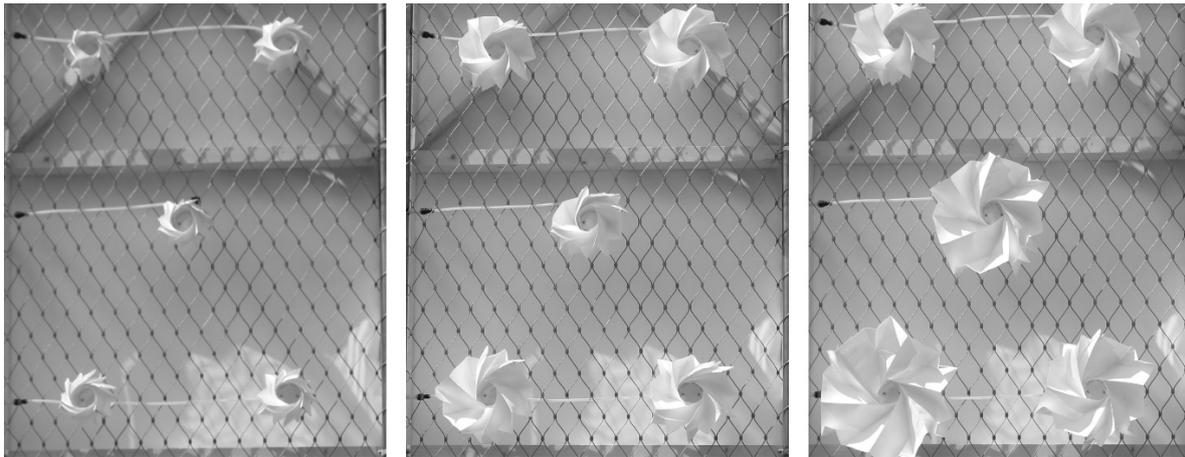


Abb. 25: Adaptives Sonnen- und Blendschutzsystem mit pneumatisch aktuierter Origami-Faltstruktur (PAOSS Konzeptentwicklung am ILEK und Bearbeitung in der Lehrveranstaltung Free Form im SS19 mit Beitrag von A. Sygut, A. Cann, J. Inman, I. Saad, S. Harbuzi unter der Betreuung durch Christina Eisenbarth), Fotos: ILEK / C. Eisenbarth.

Sonnen- und Blendschutz

Büro- und Wohngebäude werden immer transparenter, während die aktuellen klimatischen Entwicklungen die Planer dazu zwingen, in die entgegengesetzte Richtung zu gehen und unsere Innenräume vor den steigenden globalen Temperaturen und der Überhitzung durch die starke Sonneneinstrahlung zu schützen [17], [18].

Insbesondere in dichten städtischen Gebieten ist ein erheblicher Temperaturanstieg aufgrund des städtischen Wärmeinseleffekts zu verzeichnen. Daher ist es wichtig, ein effizientes Sonnen- und Blendschutzsystem mit einem geringen Energiebedarf für die Aktivierung bereitzustellen. Die großflächigen Glasfassaden lassen die einfallende Sonnenstrahlung hindurch und führen zu einem hohen Kühlbedarf. Dieser muss durch eine entsprechend dimensionierte technische Gebäudeausrüstung kompensiert werden, was zu einer höheren Wärmebelastung des Außenraumes führt. Geeignete Sonnen- und Blendschutzsysteme sind dringend erforderlich, um den Energiebedarf für die Innenraumklimatisierung zu reduzieren und das Bedürfnis der Nutzer nach ausreichendem Tageslicht und Sichtkontakt nach außen zu gewährleisten. Dies muss mit einem Minimum an Material, Masse und CO₂-Ausstoß bei einem Maximum an ästhetischer und gestalterischer Flexibilität erreicht werden [19].

In diesem Zusammenhang ist es wichtig, die Begriffe Sonnenschutz und Blendschutz klar voneinander abzugrenzen. Die charakteristische Funktion eines Sonnenschutzes besteht darin, eine hohe Sonneneinstrahlung vom Gebäude abzuschirmen. Grundsätzlich wird unterschieden nach der Lage des Sonnenschutzes im Innenraum, im Außenraum oder im Fassadenzwischenraum. Außenliegende Systeme sind zwar in Bezug auf die Reduzierung der Strahlungstransmission und des Wärmedurchgangs am effektivsten, sind aber auch anfällig für Witterungseinflüsse wie Windlasten. Innenliegende Systeme hingegen sind vor Witterungseinflüssen geschützt, allerdings weisen sie einen größeren Energieeintrag durch die Solarstrahlung auf, was zu einer stärkeren Aufheizung des Innenraums führt. In diesem Projekt lag der Fokus auf der Anwendung im Fassadenzwischenraum [20].

Unter dem Begriff Blendung wird eine Störung der visuellen Wahrnehmung, die von einer zu hellen Lichtquelle im Sichtfeld ausgeht, verstanden. Um Blendungseffekte zu vermeiden, eine ausreichende Tageslichtversorgung und den Sichtkontakt nach außen zu gewährleisten, eignen sich adaptive, selektive Sonnen- und Blendschutzsysteme wie das PAOSS-System [20], [21], [22].

Textil- und folienbasierende Materialien

Im Vergleich zu herkömmlichen Fassadenmaterialien verbinden Textilien und Folien eine besondere Leichtigkeit und Flexibilität mit einer klaren Formensprache, die sie für den Einsatz in dynamischen Fassadensystemen prädestiniert. Textile Gewebe erzeugen durch ihre haptischen Qualitäten, ihre Transluzenz, ihre mikrostrukturierten Oberflächen sowie durch ihre immense Vielfalt an Farben, Mustern und Strukturen eine einzigartige ästhetische Wirkung, die sie von anderen Fassadenmaterialien unterscheidet. Sie erweitern damit das visuelle Gestaltungsspektrum der Gebäudehülle auf der Mikro-, Meso- und Makroebene. Trotz der vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten und Techniken, die textile Materialien bieten, werden ihre Einsatzmöglichkeiten in der Architektur bisher nur in geringem Umfang genutzt. Aufgabe ist es daher „das Ziel der faltenfreien, vorgespannten monochromen Haut zu verlassen und dem textilen Bauen die Qualität zurückzugeben, die es verloren hat: die eines Gewebes“ [23].

Ihr geringes Flächengewicht und ihre hohe mechanische Festigkeit eröffnen ein bisher nicht ausgeschöpftes Potenzial für ihren Einsatz in der ressourceneffizienten Architektur. Hier bieten sie sowohl eine bahnbrechende Erweiterung des Funktionsspektrums der Außenhülle als auch eine deutliche Gewichtsreduktion von Neu- und Bestandsbauten an. Erhebliche ökonomische und ökologische Vorteile kann ein vollflächig mehrschichtiges, textil- und folienbasiertes Hüllsystem aus flexiblen, in ein Profilsystem eingefassten Hochleistungsmaterialien bringen, das als äußere thermische Gebäudehülle alle Anforderungen an eine Fassade erfüllt [1], [22].

Anpassungsfähigkeit der Gebäudehülle

Eine sehr interessante Option zur Gestaltung textiler Gebäudehüllen ist die Kombination von ästhetischen und funktionalen Qualitäten mit der Möglichkeit die Fassadeneigenschaften durch den Einsatz aktiver Komponenten zu erweitern. Konventionelle Fassaden können aufgrund ihrer konstanten bauphysikalischen und konstruktiven Eigenschaften nur in geringem Maße auf klimatisch variierende Außenbedingungen oder wechselnde Nutzeranforderungen reagieren.

Ziel des Forschungsprojekts ist es daher, adaptive Gebäudehüllensysteme zu entwickeln, deren Eigenschaften in Bezug auf die Lichtdurchlässigkeit, die Energierückstrahlung und das äußere Erscheinungsbild variabel sind. Unter dem Begriff Adaptivität wird hier die Implementierung von Sensoren und Aktoren verstanden, die es in Kombination mit einer automatisierten Steuerung ermöglichen, auf unterschiedliche Umweltsituationen oder Nutzeranforderungen zu reagieren, um automatisch oder nutzergesteuert für optimale Innen- und Außenbedingungen zu sorgen. Die Synthese eines ansprechenden Designs mit der Funktionalität einer adaptiven Anpassung bereichert die architektonischen Qualitäten von textilen Gebäudehüllen [25], [26].

Aufgrund des hohen Individualisierungsgrades von Textilfassaden kann durch den Einsatz aktiver Komponenten eine präzise Anpassungsfähigkeit an stark schwankende Anforderungen erreicht werden, was zu einer deutlichen Steigerung des Nutzerkomforts und einer Reduzierung des Energieverbrauchs führt. So können neue Gestaltungselemente geschaffen werden, die die materialimmanenten Eigenschaften des Textils, wie das Weiche, das Gefaltete und das Geschmeidige, betonen und gleichzeitig verschiedene Funktionen integrieren, wie z.B. eine präzise und gezielte Steuerung der Tageslichttransmissionswerte der Fassade [27].

Pneumatisch aktiver Origami Sonnenschutz - PAOSS

Herkömmliche Faltsysteme werden durch Zugkräfte an der Peripherie geöffnet, was jedoch die Installation zusätzlicher Seilkonstruktionen an der Fassade erforderlich macht. Erste Untersuchungen zu faltbaren Sonnenschutzsystemen am Institut basierten auf Öffnungs- und Schließmechanismen auf der Basis der Einwirkung von Fliehkräften [28]. Zu diesem Zweck wurde die Faltstruktur auf einem zentral angeordneten Elektromotor montiert, der bei der Drehung die erforderlichen Fliehkräfte erzeugte.

Inzwischen wurde dieser Ansatz zu einem radialen System weiterentwickelt, das durch eine zentrale Aktivierungsquelle geöffnet und geschlossen werden kann, wobei nur einmalig eine geringe Energiezufuhr in das System erforderlich ist, während durch die Implementierung aktiver pneumatischer Komponenten zwei stabile Zustände erzeugt werden. Die Funktionsweise ist ähnlich wie bei einer Rollpfeife. Durch Luftdruck entfalten sich die Origami-Elemente, während der Rückstellmechanismus des Systems durch eine integrierte Spiralfeder gewährleistet wird, deren Kraft die Rückfaltung bewirkt.

Tagsüber reflektieren die aufgeklappten, geöffneten Strukturen die eingestrahlte Sonnenenergie und verhindern durch eine teil- oder vollflächige Regulierung der Licht- und Strahlungstransmission eine Überhitzung der Innenräume. Individuell aktivierbare Einzelelemente bieten einen gezielten, selektiven Blendschutz und stellen gleichzeitig die erforderliche Tageslichtversorgung sicher. Bei klarer Nacht kann durch diese Elemente auch die Wärmeabstrahlung an den kalten Nachthimmel und damit die Auskühlung des Gebäudes verringert werden.

Optimierung der Origami-Geometrie

Das oben beschriebene pneumatisch betätigte Sonnen- und Blendschutzsystem basiert auf der Origami-Faltgeometrie „Starshade“, die von dem Origami-Künstler R. Lang für astrophysikalische Zwecke der amerikanischen Raumfahrtbehörde (NASA) entwickelt wurde. Der originale „Starshade“ wird eingesetzt, um das hellere und damit grelle Sternenlicht bei der Erkundung unbekannter Exoplaneten im Weltraum abzuschatten. Der Transport und die Positionierung der riesigen „Starshade“-Beschattungs- und Blendschutzelemente im Weltraum erfordert eine maximale Kompaktheit ihrer Geometrie im gefalteten Zustand bei gleichzeitiger maximaler Reduzierung ihres Eigengewichts. Mit Hilfe der japanischen Faltkunst Origami wurde ein platzsparendes, effizientes und leichtes Systemdesign entwickelt, das eine Fläche von rund 34 m Durchmesser abdeckt und sich durch eine besonders hohe Differenz zwischen geschlossenem und geöffnetem Zustand auszeichnet [29], [30].

Für den Einsatz im Fassadenzwischenraum eines ETFE-Kissens musste die Grundgeometrie der „Starshade“ hinsichtlich der spezifischen Parameter einer minimalen Bauteiltiefe bei maximaler Flächendifferenz zwischen geschlossenem und offenem Zustand optimiert werden, wobei gleichzeitig die Komplexität des Systems so weit wie möglich reduziert werden sollte.

Zu diesem Zweck wurden sowohl einfache als auch doppelt geformte Faltgeometrien analysiert, um die effizienteste Faltgeometrie zu ermitteln. Die drei Hauptmerkmale einer radialen Faltform sind: die Faltart, die Anzahl der Segmente und die Anzahl der Ringe. Abbildung 26 zeigt verschiedene Faltgeometrien, die durch Variation dieser Parameter bei einem konstanten Außenradius von 50 cm erzielt wurden.

Eine zunehmende Anzahl von Segmenten führt zu einer Vergrößerung des inneren Radius, während sich die Tiefe verringert. Eine zunehmende Anzahl von Ringen führt folglich zu einer Verkleinerung des Innenradius bei gleichzeitiger Vergrößerung der Tiefe. Um die steigende Komplexität besser unter Kontrolle zu halten, wurde das Maximum auf acht Innenringe begrenzt. Doppelfaltgeometrien zeichnen sich durch nach unten gefaltete Spitzen (blau markiert) aus, die eine Verringerung der Strukturtiefe bewirken, und

erweisen sich daher als effizienter in Bezug auf die Maximierung der Flächendifferenz zwischen geschlossenem und offenem Zustand.

Unter Berücksichtigung der Beschränkung auf eine maximale Bauteiltiefe von 100 mm, um die Anwendbarkeit der PAOSS-Elemente in allen Arten von Fassadenhohlräumen zu gewährleisten, wurde die nach den oben genannten Parametern am besten geeignete Falzgeometrie festgelegt. Mit einer Aufbauhöhe von 94,5 mm, einem Innenradius von 91,8 mm und einer Differenz von 0,613 m² zwischen offenem und geschlossenem Zustand sowie dem Außenradius von 50 cm erfüllt die ausgewählte Falzgeometrie alle spezifischen Anforderungen. Die daraus resultierende maximale Schaltdifferenz des Systems beträgt ca. 82 %.

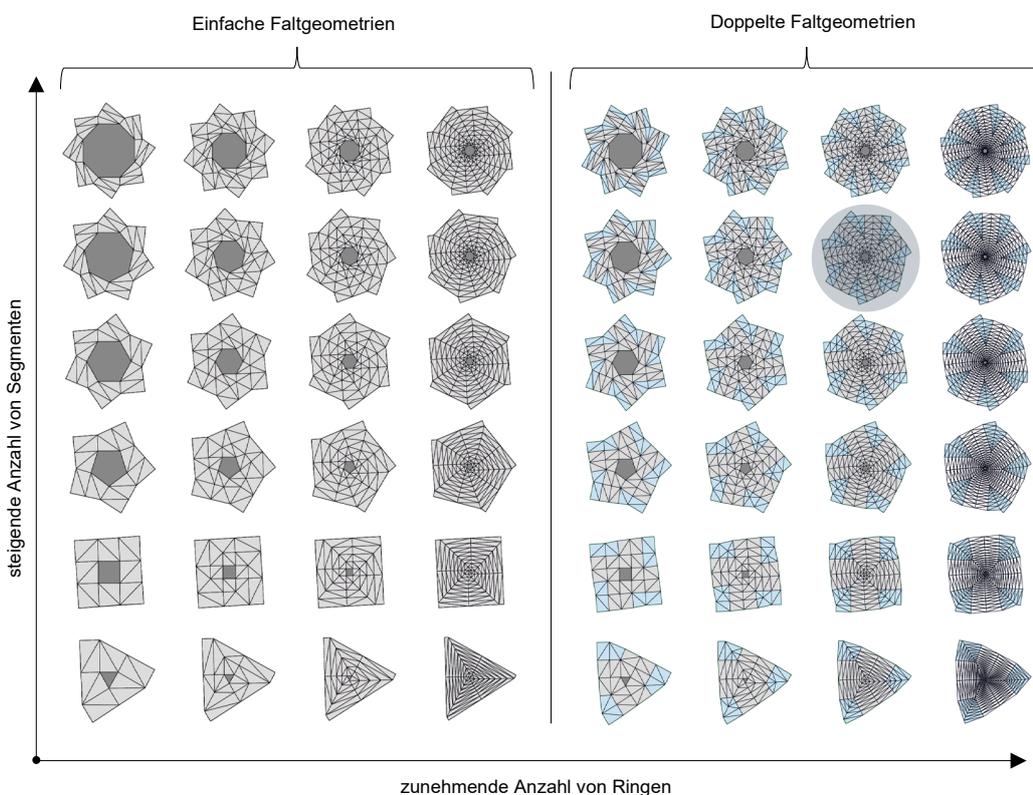


Abb. 26: Diverse untersuchte einfache und doppelte Falzgeometrien

Materialanalyse

Der Einsatz von Textilien und Folien in der Gebäudefassade hängt von ihrer UV-Beständigkeit sowie von ihrer ausreichenden Brandschutzqualität ab. Nach DIN 4102 wird mindestens die Stufe B1 (Schwerentflammbarkeit) gefordert. Um auch im verschatteten Zustand eine ausreichende natürliche Tageslichtbeleuchtung des Raumes zu gewährleisten, darf die Lichtdurchlässigkeit des Beschattungsmaterials je nach Art und Dicke des Materials zwischen 0 % und 40 % liegen [27].

Textile Materialien können in die folgenden drei Hauptkategorien eingeteilt werden: Vliese, Gewebe und Gewirke [31].

Die ersten Prototypen der PAOSS-Elemente wurden aus perforiertem und gefaltetem Tyvek hergestellt, einem flammfesten, hochdichten Polyethylen (PE)-Vliesstoff von DuPont de Nemours (Luxemburg) mit

einem flächenbezogenen Gewicht von 120 g/m². Nach einigen Fold- und Entfaltungszyklen neigt das Material aufgrund der pneumatischen Betätigung zur Faltenbildung, wodurch der Öffnungs- und Schließmechanismus der Struktur erheblich beeinträchtigt wird.

In diesem Zusammenhang sind papierartige Origami-Materialien nicht mit der pneumatischen Betätigung des Systems kompatibel, da diese Methode ein textiles Material mit einer typischen Weichheit und Flexibilität erfordert.

Weitere Materialanalysen konzentrierten sich daher auf flexible, textile Gewebe, insbesondere auf technische Verbundtextilien aus PES mit verschiedenen Beschichtungen, um die materialspezifischen Anforderungen sowie eine geringe Biegesteifigkeit für den Einsatz in radialen Foldstrukturen zu gewährleisten. Tabelle 1 enthält eine Auswahl an geeigneten Materialien mit ihren spezifischen technischen Eigenschaften.

Tab. 1: Analyse des Sonnenschutzmaterials [32]



Durchsicht ohne Sonnenschutz	Valmex TF 400 F1	Soltis Harmony 88	Sunworker	Tempotest Starscreen	Twilight Metal	Airtex Super FR	Firemaster
Material	PES	PES	PES/PVC	PES	PES/PAC	PES	PES/MAC
Beschichtung	Vinyl		PVC	PTFE	Metall	PUR	Harz
Flächenbezogene Masse [g/m ²]	420	360	300	220	350	275	400
Dicke [mm]	0,77	0,45	0,42	0,52	0,5	0,35	0,6
Öffnungsfaktor [%]	34	8	6	3,5	1,4	0	0
Gemessene solare Transmission, Reflexion und Absorption (Wellenlänge 300 nm - 2500 nm)							
T _{SOL} [%]	44,17	27,16	25,08	39,48	7,66	16,95	15,13
R _{SOL} [%]	51,75	67,14	68,56	54,32	42,08	74,65	71,91
A _{SOL} [%]	4,07	5,70	6,36	6,20	50,26	8,40	12,96
Gemessene Transmission, Reflexion und Absorption im sichtbaren Bereich (Wellenlänge 380 nm - 780 nm)							
T _{VIS} [%]	43,85	25,09	23,90	41,16	4,14	15,59	13,17
R _{VIS} [%]	51,50	73,62	76,19	57,72	37,68	82,95	78,44
A _{VIS} [%]	4,64	1,29	-	1,12	58,19	1,46	8,39

Die Fotos der ersten Zeile in Tabelle 1 geben einen Eindruck vom optischen Erscheinungsbild der untersuchten Textilien. Mit zunehmendem Öffnungsfaktor steigt die Transparenz und damit der visuelle Bezug des Nutzers zum Außenraum. Ein Öffnungsfaktor von Null impliziert eine Transluzenz ohne direkte Durchblickmöglichkeit des Materials, die insbesondere für selektive Sonnen- und Blendschutzsysteme, die einen partiellen und gezielten Blick nach außen ermöglichen, ausreichend ist. Ein höherer Öffnungsfaktor

des Textils bedeutet insbesondere einen geringeren Wirkungsgrad in Bezug auf den Sonnen- und Blendschutz. Eine geringere Materialstärke führt zu einer vorteilhaften, höheren Kompaktheit der Struktur im gefalteten Zustand sowie zu einer maximalen flächenbezogenen Gewichtsreduktion.

Die Bewertung der Materialeigenschaften im solaren und sichtbaren Bereich der Strahlung ist ein wesentlicher Parameter für die Auswahl von Sonnen- und Blendschutzmaterialien. Nach DIN EN 14500 wird das spektrale Strahlungsverhalten von Textilien mit Hilfe eines Spektrometers mit Ulbricht-Kugel gemessen, wobei zwischen den drei folgenden spektralen Parametern unterschieden wird: Reflexionsgrad (R_{SOL} , R_{VIS}), Transmissionsgrad (T_{SOL} , T_{VIS}) und Absorptionsgrad (A_{SOL} , A_{VIS}). Zu diesem Zweck wurden empirische Messungen mit dem Spektrometer des Instituts durchgeführt. Da die spektralen Daten von Textilien durch die Farbe des Materials beeinflusst werden, wurden die Textilproben alle in der gleichen Farbe (weiß) getestet, mit Ausnahme des Textils „Twilight Metal“, das nur in Silber erhältlich ist [33], [34].

Die Messungen erfolgten sowohl im für den Menschen sichtbaren Spektrum in einem Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm (VIS) wie auch in solaren Frequenzbereich von 300 nm bis 2500 nm (SOL). Bei den Berechnungen der jeweiligen spektralen Mittelwerte fanden die spektrale Helligkeitsempfindlichkeit $V(\lambda)$ für das sichtbare Spektrum sowie die relative spektrale Strahlungsverteilung $S(\lambda)$ der Sonne nach DIN EN 410 Tabelle 2 für den solaren Strahlungsbereich Eingang. Der Frequenzbereich umfasst den UV-B-Bereich von 280 nm bis 315 nm, den UV-A-Bereich von 315 nm bis 380 nm, das sichtbare Spektrum von 380 nm bis 780 nm und Teile des IR-Bereichs von 780 nm bis 2500 nm. Die erzeugten Messdaten sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Bei einem Sonnen- und Blendschutzsystem sollte der Reflexionskoeffizient möglichst hoch sein, während der Absorptionskoeffizient möglichst niedrig sein sollte, um eine Wärmeabstrahlung nach innen zu minimieren. Vorteilhaft ist ein niedriger visueller Transmissionsgrad T_{VIS} . Um ausreichendes Tageslicht zu gewährleisten und gleichzeitig Blendung zu vermeiden, wird ein Wert für T_{VIS} von $\approx 10 - 15\%$ empfohlen.

Auf der Grundlage der photometrischen Bewertung der Transmissions-, Reflexions- und Absorptionseigenschaften der geeigneten textilen Materialien mit Hilfe eines Photospektrometers und unter Berücksichtigung weiterer Parameter wie Materialstärke, flächenbezogenes Gewicht, UV- und Feuerbeständigkeit wurde das am besten geeignete Gewebe ausgewählt.

Mit einer Dicke von 0,35 mm ist das auf Polyester basierende und mit thermoplastischem Polyurethan beschichtete Airtex Super FR das dünnste und mit einem Flächengewicht von 275 g/m² auch eines der leichtesten unter den oben genannten Materialien. Seine Oberflächenstruktur ist matt gewebt, das Gewebe ist UV-beständig und wetterfest. Das Textil weist einen Öffnungsfaktor von Null auf und erscheint daher durchscheinend aber nicht durchsichtig. Darüber hinaus ist es temperaturbeständig zwischen -25 °C und +70 °C.

Nach den durchgeführten Untersuchungen hat sich Airtex Super FR als am besten geeignet für den Einsatz in den PAOSS-Strukturen erwiesen.

Kinematische Falztechnik

In Abhängigkeit von den jeweiligen materialimmanenten Eigenschaften, insbesondere der Materialsteifigkeit, wurden geeignete digitale und industrielle Fertigungsverfahren für eine gezielte und spezifische Funktionalisierung der textilen Struktur zur Erzeugung des Gelenkeffekts analysiert. Dynamische Faltelemente müssen sowohl eine Mindeststeifigkeit in der Ebene als auch Flexibilität in den Faltgelenken aufweisen.

Abb. 27 zeigt die untersuchten subtraktiven, additiven und mechanisch/thermischen Methoden. Zu den subtraktiven Methoden gehört der Materialabtrag in den Faltscharnieren, um mehr Flexibilität zu erreichen. Additive Verfahren sehen das Aufbringen dünner Schichten vor, um die lokale Steifigkeit eines dünnen Textils mit geringer Formstabilität zu erhöhen, während an den Scharnieren keine zusätzlichen Schichten hinzugefügt werden, um die Faltung zu ermöglichen. Mechanische oder thermische Verfahren versuchen dagegen, ein Formgedächtnis in der Struktur zu erzeugen, ohne Material aufzutragen oder zu entfernen.

Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen wurden sowohl subtraktive Verfahren mit einer Perforation oder Gravur der Scharniere als auch additive textile 3D-Druck- oder Beschichtungsmethoden zur präzisen Definition der Steifigkeit des Textils durchgeführt. Zusätzlich wurde die Anwendung mechanischer oder thermischer Verfahren wie Nähen oder Schweißen evaluiert.

Subtraktive Verfahren wie thermische Schneidetechniken (Laser- oder Plasmaschneiden) verhindern ein Ausfransen der Schnittkanten durch Verschmelzen der Textilizuschnitte, führen aber häufig zu schwarzen oder braunen Verfärbungen an den Schnittkanten aufgrund der Oxidation des Materials. Mechanische Verfahren (Schneiden, Plotten, Wasserstrahlschneiden oder Stanzen) bieten eine höhere Präzision ohne Kantenbearbeitung. Subtraktive Fertigungsverfahren sind für steifere Materialien besser geeignet [35], [36], [37], [38].

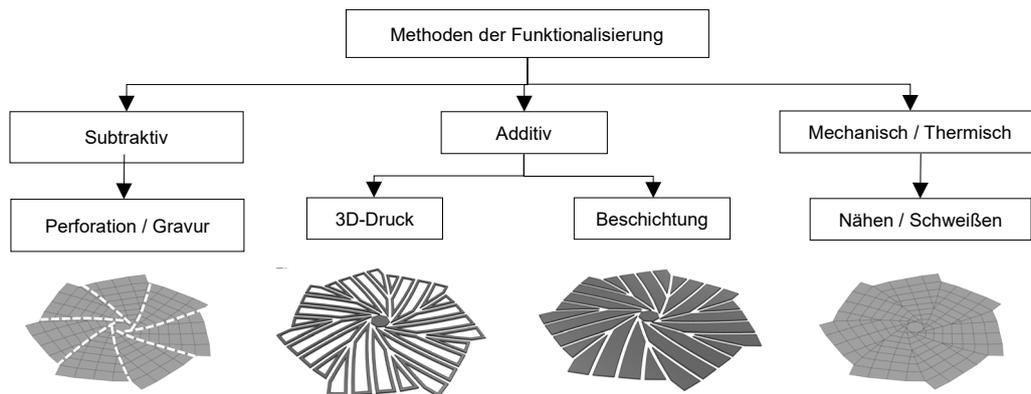


Abb. 27: Herstellungsverfahren zur Funktionalisierung einer textilen Faltschirmstruktur, um einen Gelenkeffekt zu erzeugen.

Die additiven Verfahren erfordern eine hohe Flexibilität und Weichheit des Textils. Gerade bei additiven Verfahren ist es wichtig, die Rückführbarkeit aller Einzelkomponenten in den Materialkreislauf zu gewährleisten. Daher empfiehlt sich der Einsatz von additiven Skelettstrukturen mittels FDM (Fused Deposition Modeling) aus thermoplastischem Polymer, die schichtweise z. B. auf Polyestermaterialien aufgebracht werden können und sich mit dem Textil verbinden, ohne dessen Recyclingeigenschaften zu beeinträchtigen. Die größte Herausforderung ist dabei die Haftung auf dem Textil, so dass ein beidseitiger Druck in Frage kommt [39].

Partielle Beschichtungen, die in mehreren Lagen auf einer oder auf beiden Seiten des Materials aufgebracht werden, verhindern die Winkelverdrehung von Fäden im Gewebe und erzeugen so eine partielle Membransteifigkeit. Neben dieser Verstärkung ist es darüber hinaus möglich, durch Zusätze und Hilfsstoffe leistungsfähige Materialeigenschaften wie Hitzebeständigkeit zu erzielen [40].

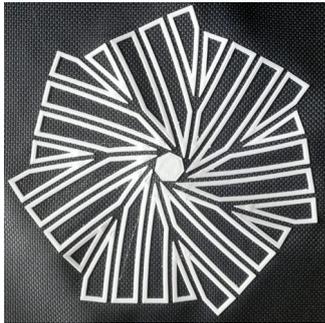


Abb. 28: 3D-gedruckte skelettartige Polymerstruktur auf Polyestergewebe

Thermische und mechanische Verfahren sind für die Erzeugung der faltbarkeit geeignet, da sie den Berg- und Talfalten im Vergleich zu subtraktiven oder additiven Herstellungsverfahren ein zusätzliches orientierendes Formgedächtnis verleihen. Ihre erfolgreiche experimentelle Validierung wurde für die Textilien Airtex Super FR, Soltis Harmony 88, Sunworker und Firemaster erreicht. Voraussetzung für die thermische Umwandlung eines Polymers sind thermoplastische Materialeigenschaften.

Durch hochfrequente Strahlung, Wärme oder elektrische Impulse geraten die Moleküle im Thermoplast in Schwingung und werden durch mechanischen Druck an der Falkante zu einer wasser- und luftdichten Schweißnaht verbunden. Die Nähte können anschließend durch Schweißen oder durch Einspritzen einer Beschichtung verfestigt werden, um eine luftdichte Kaschierung zu erreichen, die alle Anforderungen an eine klare Materialtrennbarkeit erfüllt. Durch den Einsatz digitaler, automatisierter Produktionsverfahren können die faltstrukturen generell schnell und kostengünstig mit hoher Präzision hergestellt werden.

Aktuierungsstrategie

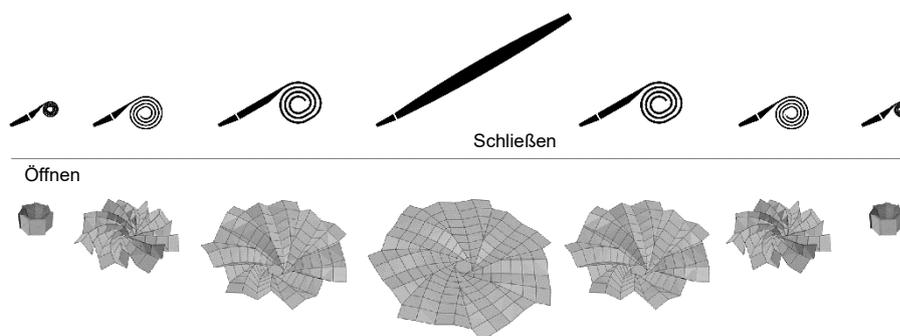


Abb. 29: Mechanismus zum Öffnen und Schließen.

Der Öffnungs- und Schließmechanismus (Abb. 29) der PAOSS-Elemente erfolgt durch spezielle pneumatische Aktuatoren, die über Luftdruck eine Entfaltung des Systems bewirken. Eine integrierte Spiralfeder sorgt - ohne Luftdruck - für die Rückstellung des Systems in den Ausgangszustand, ähnlich wie bei einer Rollpfeife [41].

Für die Integration der pneumatischen Aktoren zur Entfaltung der PAOSS kamen additive und integrale Methoden in Betracht. Die ersten Prototypen der pneumatischen Aktuatoren wurden additiv auf der Rückseite der faltstruktur angenäht. Für die Herstellung der luftdicht kaschierten Pneumatikaktoren selbst kamen Jacquard-Webtechniken zum Einsatz. In spezielle Kanäle der Aktorelemente eingebrachte Spiralfedern dienen dem Zusammenfallen der PAOSS-Elemente. Die maximale Anzahl der additiv aufgetragenen Aktuatoren ist durch die Anschlussmöglichkeiten der Luftzuführungskanäle begrenzt.

Aus ästhetischer, funktionaler und wirtschaftlicher Sicht ist die integrale Ausführung der Aktoren als Teil der textilen faltstruktur von besonderem Interesse. Auf diese Weise können wesentlich mehr Aktoren integriert werden, um eine homogenere Luftverteilung und damit einen fließenderen Öffnungsvorgang bei gleichen Herstellungskosten zu erreichen.

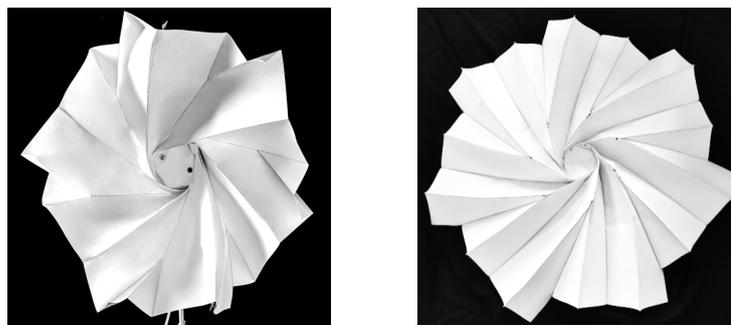
Die Luftversorgung der einzelnen Aktoren erfolgt aus der Mitte der faltstruktur. Um die Spiralfeder zur rückstellung zu integrieren, ist ein spezieller kanal notwendig, in den die feder eingelegt und in dem sie fixiert werden kann. Um die faltwerke mit den pneumatischen leitungen zu verbinden und die luftzufuhr zu ermöglichen, wurden spezielle 3D-gedruckte Verbindungselemente entwickelt, mit denen die PAOSS-Elemente an der unterkonstruktion z.B. an einem stahlseilnetz befestigt werden können.

Tabelle 2 zeigt die entwicklung vom ersten prototyp bis zum endprodukt in bezug auf die optimierung der faltgeometrie sowie die materialanalyse und -auswahl unter berücksichtigung der untersuchten kinematischen falttechniken und betätigungsstrategien.

Die PAOSS-Elemente werden automatisch gesteuert, indem sie die beleuchtungsstärke und die blendung im raum, den sie beschatten sollen, erkennen. Steigt oder sinkt die beleuchtungsstärke auf ein definiertes niveau, gibt die steuereinheit diese information weiter, um die luftzufuhr der einzelnen antriebe über einstellbare ventile gezielt zu öffnen oder zu schließen. Ziel ist es eine ausreichende tageslichtversorgung und den blendschutz durch individuelle einstellung einzelner PAOSS zu gewährleisten. Die manuelle steuerung des systems durch den gebäudenutzer wird zur individuellen anpassung der komfortanforderungen erreicht.

Die prototypische umsetzung und entwicklung der integralen methode zur einbindung der pneumatischen aktoren ist gegenstand laufender forschungsaktivitäten im rahmen der PAOSS-strukturen und wird daher in diesem bericht nicht weiter behandelt.

Tab. 2: Entwicklung von PAOSS, Fotos: ILEK / C. Eisenbarth



	Erster Prototyp	Letzter Prototyp
Dicke [mm]	185	94,5
Unterschied offen-geschlossen [m ²]	0,422	0,613
Material	Tyvek	Airtex Super FR
Aktuierung	additiv	integriert

Ausblick

Die PAOSS-Elemente sind so konzipiert, dass sie als Sonnen- und Blendschutz im Fassadenzwischenraum einer konventionellen Glasdoppelfassade oder in überdruckstabilisierten ETFE-Kissenkonstruktionen eingesetzt werden können. Mit dem Fokus auf maximale Material-, Masse-, CO₂- und Energieeinsparung führt der Einsatz in ETFE-Kissen zu Synergien bei der Nutzung der bereits vorhandenen Druckluftinfrastruktur.

Im Rahmen von nachfolgenden Forschungsprojekten ist eine prototypische Umsetzung und Anwendung geplant: Eine ETFE-Kissenkonstruktion wird so konzipiert, dass sie leicht in das von der Firma RAICO angebotene Standardprofilssystem ETFE_THERM+ implementiert werden kann. Dabei ist die Luftzufuhr unsichtbar in das Pfosten- und Riegelsystem integriert. Um eine einfache Montage und Demontage der PAOSS-Elemente zu ermöglichen, wird ein modularer Einsatz auf Basis des RAICO-Profilsystems entwickelt, der aus einer Unterkonstruktion besteht, an der die einzelnen Elemente zusammen mit den dazugehörigen Luftversorgungsschläuchen über die speziell entwickelten Anschlussgelenke befestigt werden. Die Unterkonstruktion beeinträchtigt weder die Lichtdurchlässigkeit noch die Sichtverbindung aus dem Gebäude heraus, so dass transparente Glaskonstruktionen oder filigrane, vorgespannte Seilnetzkonstruktionen geeignet sind.

7.2.4 Simulationen der mechanischen und thermischen Eigenschaften

Hygrothermische Simulation der Lagenaufbauten

Zur Bewertung der Eignung sowie der Effektivität der verschiedenen Entwürfe der textilen und folienbasierten Fassaden ist die Kenntnis der thermischen und hygrothermischen Eigenschaften essentiell. Messungen zur Ermittlung der thermischen Eigenschaften wurde daher in umfangreichem Maße unter Einsatz eines geregelten Heizkastens (Hotbox) durchgeführt. Begleitend erfolgten zudem die Bewertung und Optimierung dieser Fassadenentwürfe durch Simulationsberechnungen mit dem Berechnungstool „Multilayer-Analysis-Tool“. Für die Simulation ist die vorherige Ermittlung vielfältiger Materialkennwerte erforderlich. Einige der Eingabewerte der einzelnen Lagen finden sich in den Datenblättern der Hersteller, andere wurden in den ILEK-Laboreinrichtungen gemessen. Für transluzente Aufbauten ist der Wärmetransport über Strahlung von besonderem Interesse. Angaben zu den strahlungstechnischen Kennwerten der Werkstoffe werden von Herstellerseite nicht oder nicht im notwendigen Umfang bereitgestellt, weshalb für einige Membranwerkstoffe spektrometrische Messungen durchgeführt wurden.

Für die wärmetechnischen Simulationen ist die Kenntnis der Transmissions-, Reflexions- und Emissionswerte der Lagenmaterialien erforderlich. Durch die Anwendung zweier verschiedener Spektrometer könnten der Wellenlängenbereich vom ultravioletten über das visuelle bis hin zum nahen Infrarotlicht mit einem UV-VIS-NIR-Spektrometer sowie der mittlere und der ferne Infrarotbereich durch ein FTIR-Spektrometer abgedeckt werden.

Eine Besonderheit von Membranfassaden ist die Tatsache, dass der Wärmetransport zwischen den einzelnen Materiallagen beim Vorhandensein einer zwischenliegenden Luftschicht neben der Wärmeleitung auch von der Wärmestrahlung dominiert wird. Dies steht im Gegensatz zu massiven Fassaden aus Mauerwerk oder Beton, bei denen lediglich die Wärmeleitung den Wärmetransport verursacht.

Die Entwicklung der adaptiven textilen Fassadenmodule wurde mit der oben erwähnten hygrothermischen Simulationssoftware unterstützt. Mit dem Programm „Multilayer-Analysis-Tool“ können sowohl die Materialauswahl, die Anzahl der Materiallagen, sowie deren Abstände und Ausrichtung festgelegt und bezüglich des Wärmetransports optimiert werden. Die eingesetzte Software wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen“ am Institut entwickelt. Für die Einbindung adaptiver Membranen wurde diese Software im Rahmen des Forschungsprojekts für das Einbringen von

Heiz- oder Kühltexilien (-lagen) erweitert. Nachfolgende Abbildung zeigt die Benutzeroberfläche des Programms.

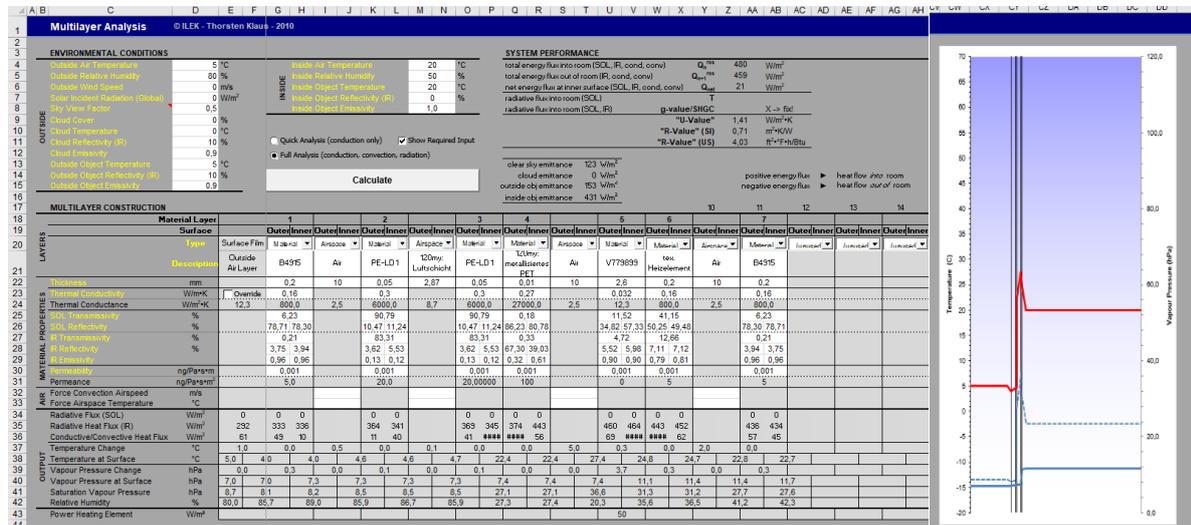


Abb. 30: Erweiterte Programmoberfläche des Programms „Multilayer-Analysis-Tool“ [42]

Mithilfe des Programms können die Lagenaufbauten bezüglich des Wärmedurchgangskoeffizienten unter Berücksichtigung des Strahlungsaustausches sowie der hygrothermischen Eigenschaften bewertet und optimiert werden.

Der Wärmedurchgangskoeffizient, wie er in dieser Arbeit verwendet wird, berechnet sich aus dem Wärmestrom durch die Fassade (Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung) und der Differenz zwischen den Temperaturen des Innen- und Außenlufttraums. Ein nach außen gerichteter Wärmestrom erhält dabei ein negatives Vorzeichen.

$$U' = \frac{q}{\Delta T} \quad (1)$$

mit :

U' = Wärmedurchgangskoeffizient der Simulation [W/m²·K]

q = Wärmefluss von Warmseite zu Kaltseite [W/m]

ΔT = Unterschied Lufttemperatur Warmseite Kaltseite [K]

Für den nachfolgend beschriebenen Lagenaufbau wurden mit der Software entsprechende U-Wert-Berechnungen durchgeführt.

Tab. 3: Lagenaufbau mit Luftpolsterfolien und Heizgewebe zum Innenraum [42]

	Außenlage	Luftschicht	Dämmlage	Luftschicht	Adaptive Lage	Innenlage
Material	PES-PVC Gewebe	10 mm	Luftpolster-Folien (1 bis 5 Lagen)	10 mm	Heizgewebe	Abstands-Gewirk aus Polyester
Bezeichnung	Verseidag B4915		LP-Keder			zwissTEX V779899

Nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch die Ergebnisse der U'-Wertberechnungen bei einem Lagenaufbau mit variabler Anzahl an Luftpolsterfolien (1 bis 5 Luftpolsterfolien) und Einsatz eines Heizgewebes unter verschiedenen Wetterszenarien.

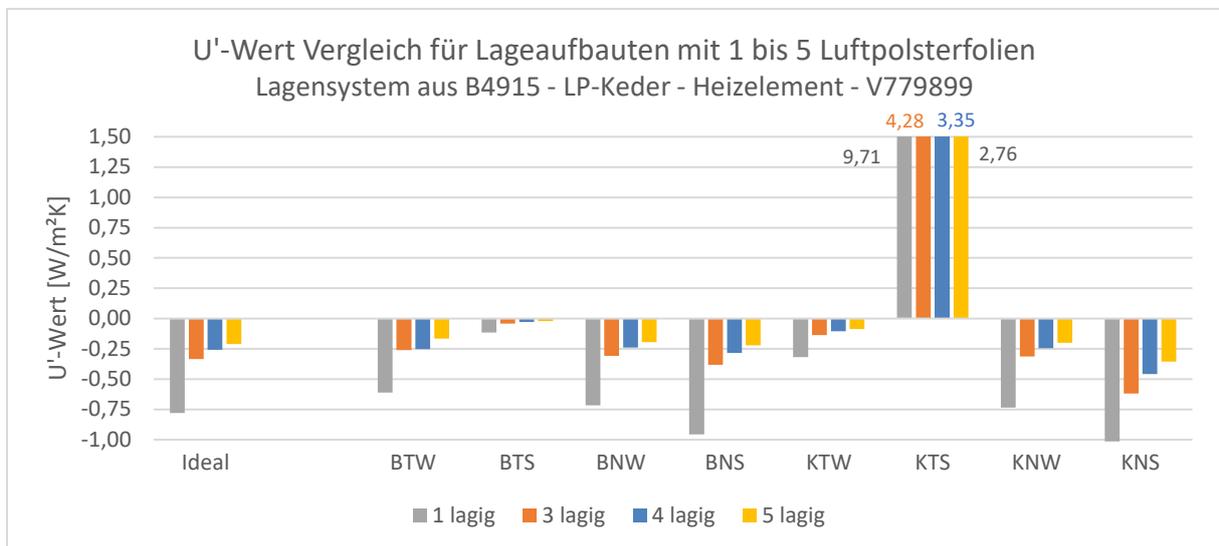


Abb. 31: U'-Wert Vergleich für Lageaufbauten mit 1 bis 5 Luftpolsterfolien (B: Bewölkter Himmel, K: Klarer Himmel, T: Tag, N: Nacht, W: Winter, S: Sommer) [42]

Die Ergebnisse für den klaren Sommertag (KTS) zeigen eine Besonderheit. Während bei allen Situationen die U'-Werte ein negatives Vorzeichen aufweisen (Wärmeverluste nach außen), ist für den Sommertag ein Wärmeeintrag in den Innenraum gegeben (positives Vorzeichen des U'-Wertes). Bedingt durch die solare Einstrahlung werden hohe positive U-Werte erreicht. Mit zunehmender Anzahl an Luftpolsterfolien nimmt der Wert ab. Die hohen U-Werte lassen sich damit erklären, dass im U'-Wert die Strahlungsanteile enthalten sind. Unter Betrachtung der untersuchten Wettersituationen ist eine Anzahl von vier Luftpolsterfolien ausreichend, um den Wärmedurchgang unter die geforderten 0,28 W/m²K zu beschränken.

Strukturmechanische Simulation

Nach der Ermittlung der auf die Fassadenmodule wirkenden Lasten erfolgte die Bemessung der beiden Konzepte. Das Profilkonzept „Adnexus“ wurde analytisch nachgewiesen. Für das Profildesign „Commodus“ erfolgte eine analytische sowie numerische Berechnung. Die analytische Bemessung erfolgte anhand einer parametrisierten Tabellenkalkulation, welche erste Ergebnisse zur Tragfähigkeit und Verformung lieferte. Berücksichtigt wurden die Momententragfähigkeit, die Querkrafttragfähigkeit, das Stabilitätsversagen, die Tragfähigkeit der Verbindungsmittel und die Verformung des Rahmens.

Maßgebendes Kriterium der Funktionsfähigkeit der modularen Rahmen stellt die Verformung dar, um die geforderte Schlagregendichtheit nach der DIN EN 12179 für die charakteristische Last aus Winddruck an den Modulstößen sicherzustellen [43]. Nachfolgend sind die Verformungen der Profilkonzepte „Adnexus“ und „Commodus“ beschrieben. Dargestellt sind die Rahmen unter Ausnutzung der Symmetrie entlang der Längsachse und um 90 ° im Uhrzeigersinn gedreht. Die angenommenen Abmessungen eines Rahmens betragen 3,00 m x 1,25 m.

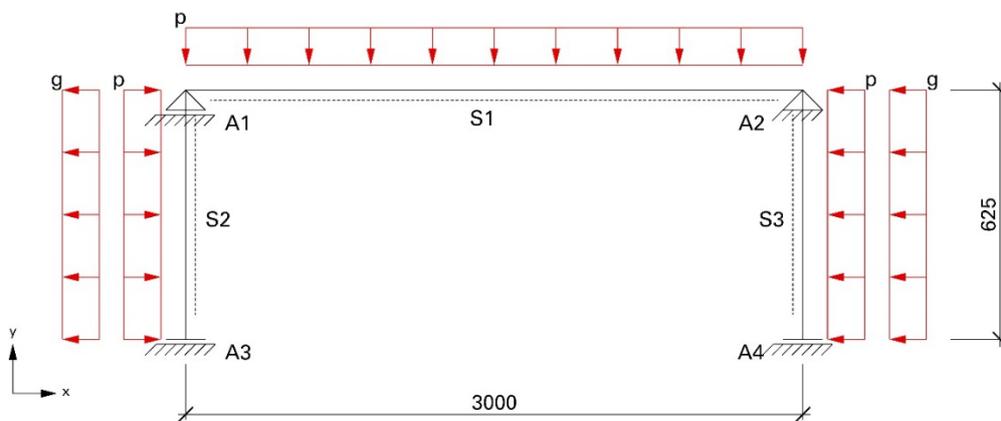


Abb. 32: Statisches System der analytischen Bemessung (mit Symmetrienausnutzung entlang der Längsachse, Belastung p: Vorspannung, Belastung g: Eigengewicht)

Verformung Konzept „Adnexus“

Die maximale Verformung des Rahmenmoduls stellt sich an den Pfosten in Feldmitte ein. Aufgrund der Vorspannung wölben sich diese in den Rahmeninnenraum um maximal 22,4 mm.

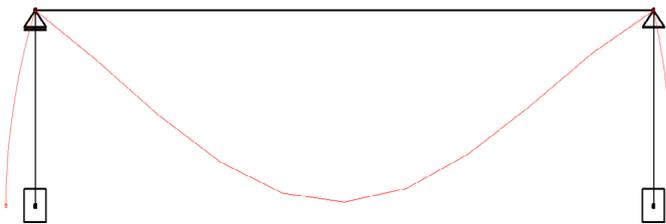


Abb. 33: Grafisch überhöhte Darstellung der maximalen Verformung des Konzepts „Adnexus“ (Analytische Berechnung)

Verformung Konzept „Commodus“

Analog zu der Verformung beim Profilsystem „Adnexus“ stellt sich die maximale Verformung des Rahmenmoduls an den Pfosten in Feldmitte ein. Der Betrag der maximalen Verformung in Feldmitte des Pfostens beträgt 20,4 mm.

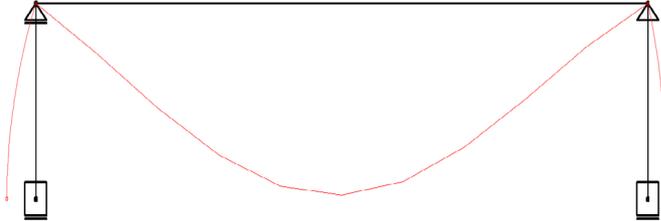


Abb. 34: Grafisch überhöhte Darstellung der maximalen Verformung des Konzepts „Commodus“ (Analytische Berechnung)

Um die Schlagregendichtheit im Modulstoß sicherzustellen, wurde mit der Finite-Elemente-Software ANSYS die Verformung unter dem Lastfall Winddruck in y-Richtung ermittelt. Die Verformung am äußeren Kanal der Satteldichtung ergibt sich zu ca. 25 mm. Da der Kanal insgesamt 50 mm Verformung aufnehmen kann (25 mm je Rahmen), ist die sich einstellende Verformung ausreichend gering. In der Querschnittsmitte des Profilsystems beträgt die Verformung ca. 19 mm (siehe Abb. 35).

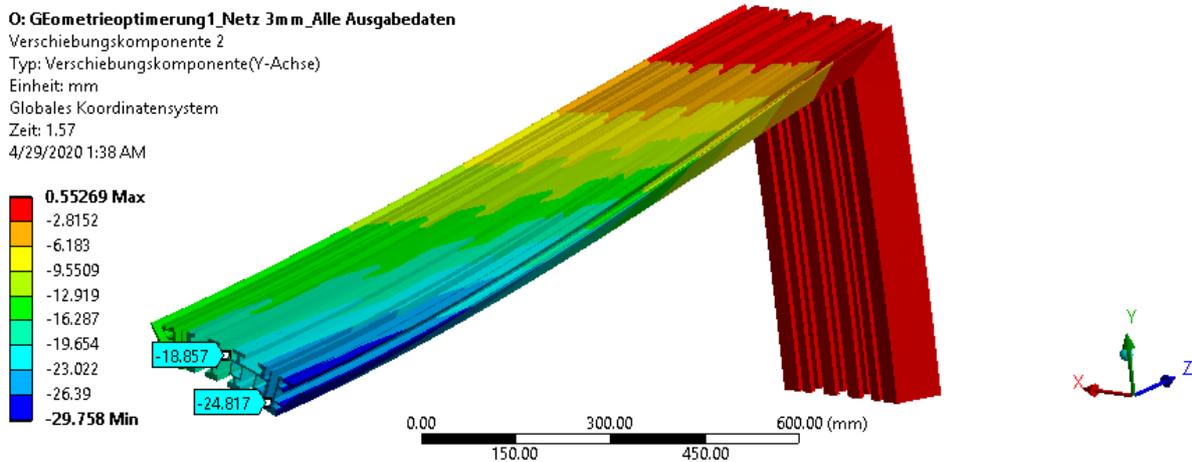


Abb. 35: Verschiebungskomponente in y-Richtung des Profilsystem (3,9-fach vergrößert) für den Lastfall Winddruck (Numerische Berechnung)

Thermische Simulation

Für die Modellierung der Rahmen zur numerischen Untersuchung des thermischen Verhaltens der unterschiedlichen Profilentwürfe wurde jeweils ein Ausschnitt des Profils herangezogen. Da die Rahmen aus einer gut wärmeleitenden Aluminiumlegierung bestehen, ist der Profilsbereich eine wärmetechnische Schwachstelle in der Fassade. Im Übergangsbereich zwischen der Hüllfläche und dem Rahmenprofil ergibt sich ein Wärmestrom in Richtung der Fassadenebene, ein querverlaufender Wärmestrom. Dies führt zu einem thermisch gestörten Bereich am Übergang von Profil zu Hüllfläche. Grundsätzlich muss daher die Schnittebene zur Ermittlung des Wärmestroms durch die Hülle selbst mit ausreichendem Abstand zum Rahmen angeordnet werden. Nach DIN EN ISO 10077-2 muss die Schnittebene mindestens

im Abstand von 90 mm zum Rahmenprofil angeordnet werden. Für die Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften wird von einer Innenraumtemperatur von 20 °C sowie von einer Außentemperatur von 0 °C bzw. -5 °C ausgegangen.

Zur Ermittlung der Wärmeströme durch die Profile kamen zwei Verfahren zum Einsatz. Neben der Berechnung mit dem Simulationsprogramm THERM (Lawrence Berkeley National Laboratory) erfolgten Vergleichsberechnungen nach DIN EN ISO 10077-2. Bei allen Profilen wurde eine Hüllfläche aus XPS-Dämmstoffplatten mit den Dicken der jeweiligen Profiltiefe in die Berechnungen einbezogen. Um den Einfluss verschiedener Hüllenaufbauten auf den Wärmedurchgang der Profile zu berücksichtigen erfolgten zusätzliche Berechnungen mit diesen unterschiedlichen Hüllaufbauten.

Konzept „Adnexus“

Nachfolgend dargestellt sind die Ergebnisse der thermischen Simulationen am Profilkonzept „Adnexus“. Bei dieser Profilvariante kommen die Komponenten Lamora und Carver sowie ein verbindendes U-Element zum Einsatz. Die Einzelsegmente werden dabei mittels Schrauben gekoppelt. Der Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmenprofils bestimmt nach DIN EN ISO 10077-2 beträgt $U_f = 2,446 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, wie in nachfolgender Tabelle dargestellt und liegt unterhalb des Anforderungswerts zum Mindestwärmeschutz von $U_f = 2,9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Zur Berechnung herangezogen wurde die Variante 1 in der Ausführung mit einer einzelnen Schraubenreihe je Verbindung. Für die Varianten 2 und 6 erfolgten keine thermischen Berechnungen, da bei diesen Querschnitten die Stegverbindungen einen geringeren Wärmestrom implizieren und die Variante 1 daher den ungünstigsten Fall darstellt.

Tab. 4: Thermische Kennwerte des Rahmenprofils Adnexus, Variante 1, bestehend aus den Komponenten Lamora und Carver sowie einem U-förmigen Verbindungsprofil. Die Einzelkomponenten sind mit einer Schraubverbindung ausgeführt. Hüllfläche aus XPS-Dämmung in Profiltiefe.

	$\Phi_{f,p}$ W/m	b_f m	$\Phi_{e,p}$ W/m	b_p m	U_p W/(m ² K)	L_f^{2D} W/(mK)	U_f W/(m ² K)
Lam. Car.	7,452	0,160	2,495	1,000	0,106	0,497	2,446

Der Isothermengraph und die Wärmestromdichteverteilung des Rahmenprofils sind in der nachfolgenden Abbildung wiedergegeben. Die großen Krümmungen der Isothermenlinien befinden sich hauptsächlich im Übergangsbereich zwischen dem Rahmenprofil und der Hüllfläche. Die Verengungsstellen der Isothermenlinien befinden sich an den Stellen, an denen die Trennung der einzelnen Aluminiumsegmente durch die EPDM-Stege erfolgt.

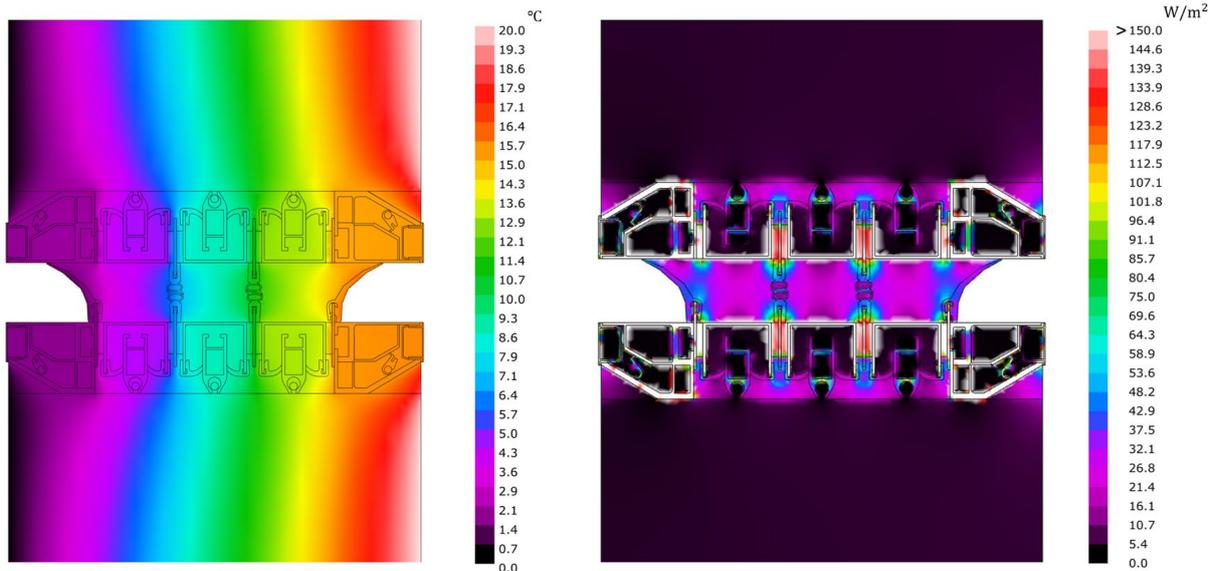


Abb. 36: Isothermenlinien (links) und Wärmestromdichteverteilung (rechts) des Rahmenprofils Lamora+ Carver mit XPS-Platten als Flächenelemente oberhalb und unterhalb des Profils in einer Breite von 324 mm

Konzept „Commodus“

Auch für das Profilkonzept „Commodus“ wurden wärmetechnische Simulationen durchgeführt. Bei diesem Konzept sind am Modulrahmenstoß jeweils Trennprofile (EPDM) berücksichtigt, um die Wärmeabfuhr durch den Modulspalt zu minimieren. Die Trennprofile wurden im Laufe der Minimierung des Wärmedurchgangskoeffizienten von einer vollflächigen Form zu einer Streifenform angepasst, um die Wärmeverluste durch das Profil zu verringern. Der Wärmedurchgangskoeffizient des so modifizierten Rahmenprofils wurde nach DIN EN ISO 10077-2 zu $U_f = 1,87 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bestimmt und liegt deutlich unterhalb des Anforderungswerts zum Mindestwärmeschutz von $U_f = 2,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Diese Berechnungen wurden ergänzt durch Simulationen mit dem Programm THERM. Die nach beiden Methoden ermittelten Wärmeströme unterscheiden sich meist geringfügig und sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tab. 5: Thermische Kennwerte des Rahmenprofils mit XPS-Dämmung in der Hülle

	Φ_g	b_g	Φ_f	b_f	$L_{\psi 2D}$	U_g	U_f
	W/m	m	W/m	m	W/(mK)	W/(m²K)	W/(m²K)
DIN EN ISO 10077-2	2,5790	1,000	5,3444	0,1528	0,3962	0,1098	1,8746
THERM						0,1290	1,7491

Der Isothermengraph sowie die Wärmestromdichteverteilung sind nachfolgend für diese Ausführungsvariante dargestellt. Die Oberflächentemperatur auf der Warmseite im Bereich des Übergangs der Hülle vom Profil zur Hüllfläche, also an der kältesten Stelle, liegt bei 13,1 °C und damit oberhalb des geforderten Wertes von 12,6 °C (bei 50 % rel. Raumluftfeuchte), der für die Schimmelpilzbildung maßgeblich ist.

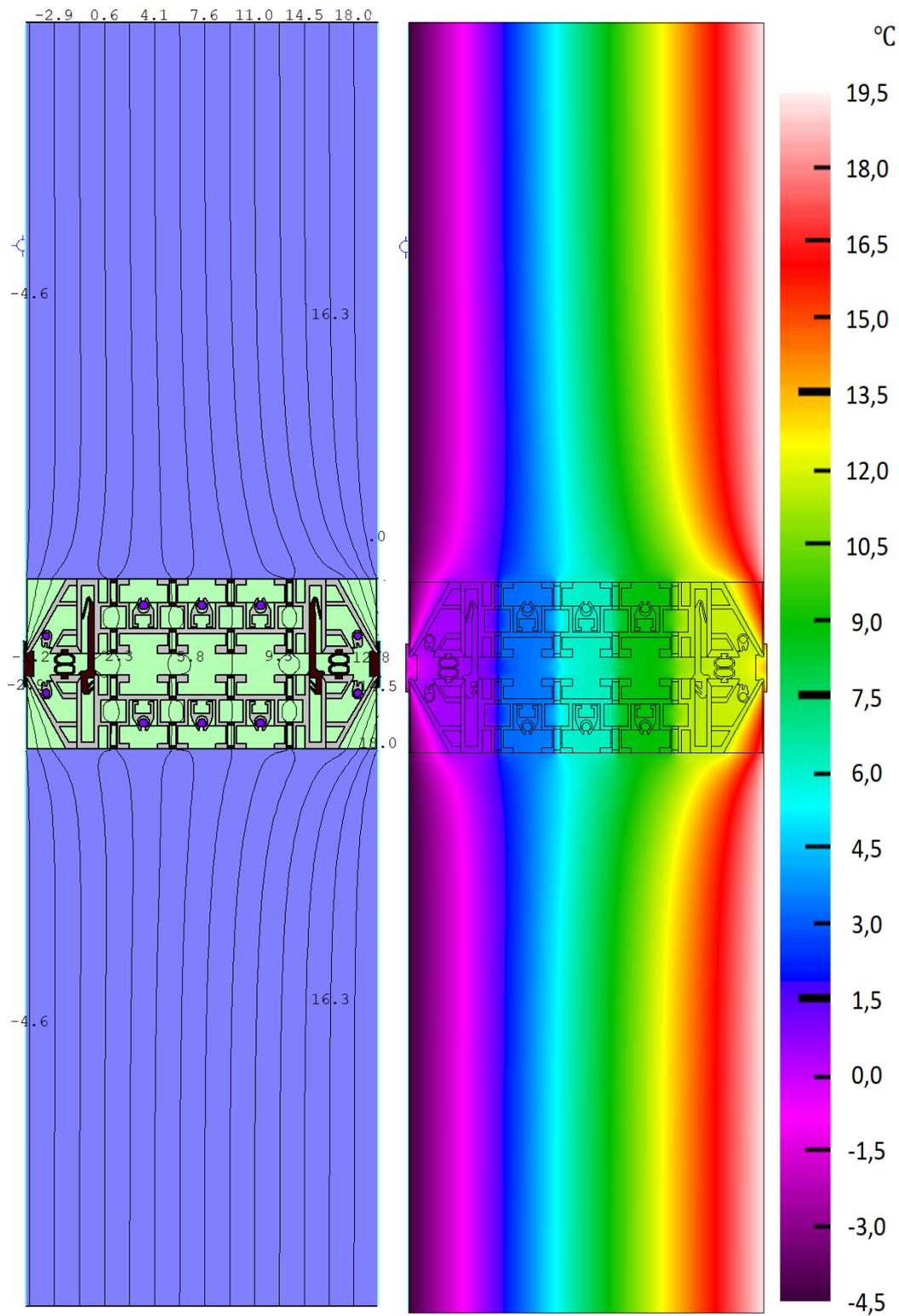


Abb. 37: Isothermengraph Profilkonzept Commodus (optimierte Variante) [44]

Konzept „Kedereinsatz für Pfosten-Riegel-Fassadenprofil-THERM+“

Beim genannten Konzept erfolgte die Entwicklung eines speziellen Profileinsatzes mit zwei Kederaufnahmeleisten für die Einbindung von ETFE-Folienfassadenelementen. Das Rahmenprofil basiert auf einem konventionellen Pfosten-Riegel Fassadensystem der Firma Raico Bautechnik GmbH, für das der Profileinsatz weiterentwickelt wurde. Die gesamte Tiefe des Kederhalterungssystems von ca. 44 mm liegt unterhalb des Grenzwerts von 60 mm nach DIN EN ISO 10077-2. Demzufolge wurde der Lagenaufbau der Hülle mit einer Höhe von 190 mm in die Simulationen einbezogen.

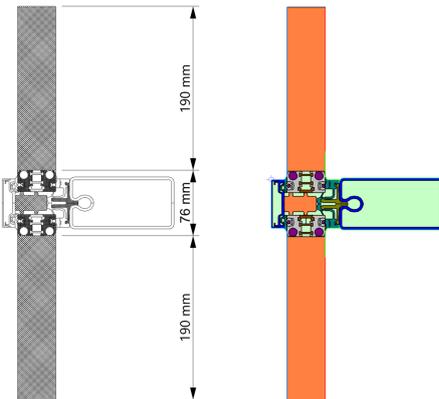


Abb. 38: Thermische Modellierung des Profilkonzepts „Kedereinsatz für Pfosten-Riegel-Fassadenprofil-THERM+“

Nachfolgend beschriebene drei Varianten des Kedereinsatzes wurden bei den Simulationen berücksichtigt:

- Variante 1: Bei dieser Variante besteht der Kederhalter aus Aluminium mit Kunststoffstegen (aus Polyamid 6,6 mit 25 % Glasfaseranteil) zur thermischen Trennung.
- Variante 2: Bei dieser Variante besteht der Kederhalter ebenfalls aus glasfaserverstärktem Kunststoff (Polyamid 6,6 mit 25 % Glasfaseranteil), wie er bei den Verbindungsstegen verwendet wird.
- Variante 3: Bei dieser Variante wird statt dem Kederhalter für die Aufnahme der Folienlagen eine Isolierglasscheibe berücksichtigt. Diese Variante entspricht der Einbausituation einer konventionellen Pfosten-Riegel-Fassade mit Isolierglaseinsatz und dient ausschließlich als Referenz, um den U_f -Wert des Grundprofils zu ermitteln. Gemäß Angabe des Herstellers *Raico Bautechnik GmbH* ist ein U_f -Wert bis zu $0,75 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ mit maximaler Wärmedämmung (inkl. Schraubeneinfluss) erreichbar.

Die Profilvarianten für die thermischen Simulationen sind in nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

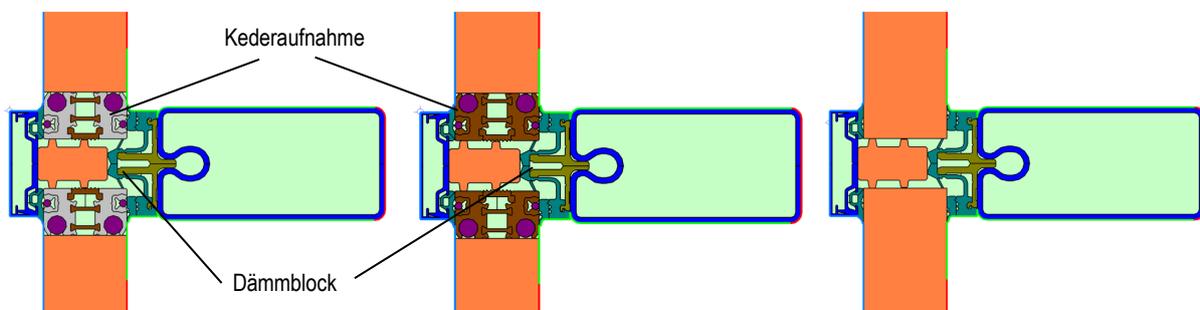


Abb. 39: Profilvarianten für die thermischen Simulationen: Variante 1 (links), Variante 2 (Mitte), Variante 3 (rechts)

Die thermischen Kennwerte der Profilvarianten sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tab. 6: Thermische Kennwerte des Rahmenprofils „Kedereinsatz für Pfosten-Riegel-Fassadenprofil-THERM+“

	$\Phi_{f,p}$ W/m	b_f m	$\Phi_{e,p}$ W/m	b_p m	U_p W/(m ² K)	L_f^{2D} W/(mK)	U_f W/(m ² K)
1. Variante	4,021	0,076	5,634	0,380	0,704	0,483	2,831
2. Variante	2,838	0,076	5,480	0,380	0,704	0,416	1,951
3. Variante	0,999	0,063	5,272	0,380	0,704	0,314	0,729

Alle drei Varianten genügen den Anforderungen zum Mindestwärmeschutz mit dem kritischen U_f -Wert von 2,9 W/(m²K). Im Vergleich zur Variante mit Aluminium-Kederhalter erbringt der Einsatz der Kunststoff-Kederhalter eine signifikante Senkung des U_f -Werts um 45 %. Der beste U_f -Wert von ca. 0,73 W/(m²K) (ohne Schraubeneinfluss) wird mit der dritten Variante erreicht, der auch vergleichbar groß mit dem vom Hersteller angegebenen U_f -Wert von 0,75 W/(m²K) (mit Schraubeneinfluss) ist. Der Isolierglaseinsatz stellt eine zusätzliche Dämmschicht im Rahmenprofil dar.

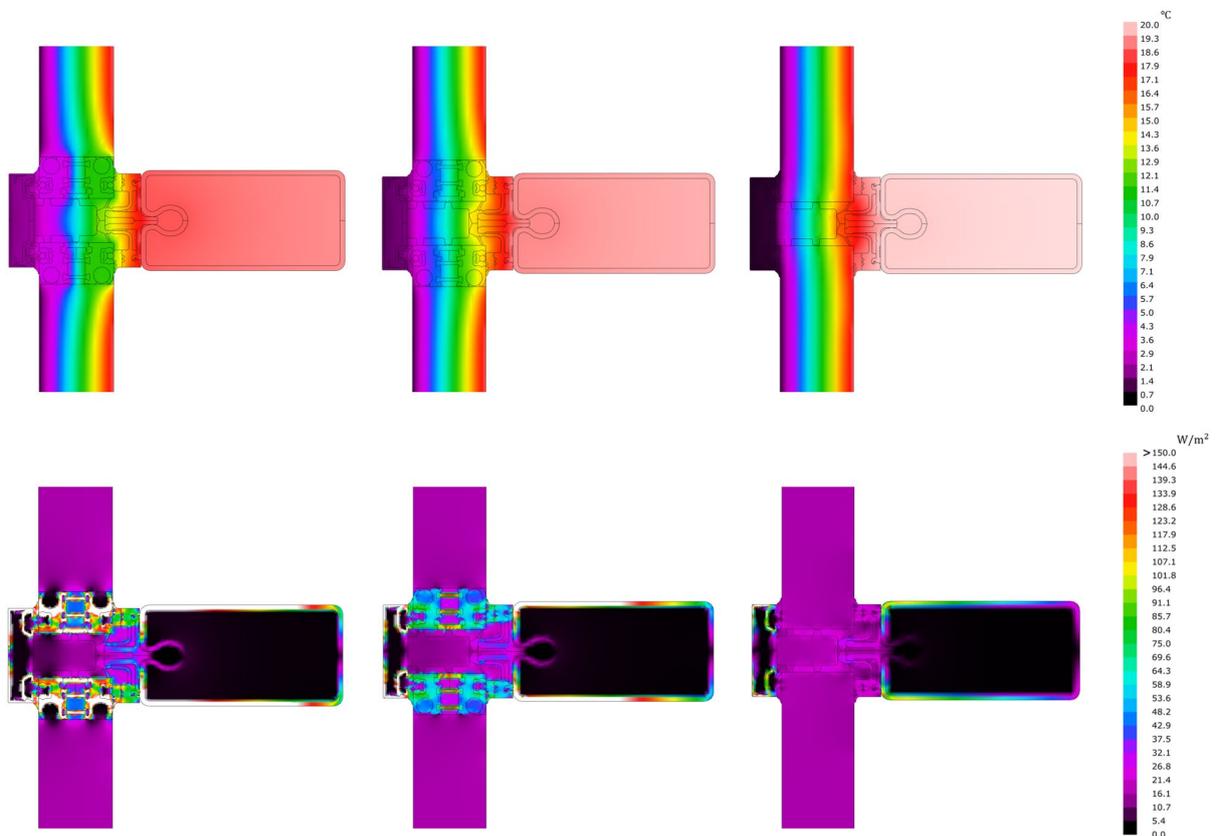


Abb. 40: Isothermengraphen (oben) und Wärmestromdichteverteilungen (unten) der Profilvarianten 1 (links) bis 3 (rechts) [45]

Vom Isothermengraph der ersten Variante in Abbildung 40 ist zu bemerken, dass sich der signifikante Knick der Isothermen an der Ebene Kunststoffstege-Dämmblock befindet. Anhand der Wärmestromdichteverteilung ist erkennbar, dass die wesentlichen Wärmeströme aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der Stahlprofile und Aluminiumkederhalter verursacht werden. Die Wärmestromdichte der Kunststoffstege ist niedriger als bei den Aluminiumkederhaltern. Die Dämmwirkung der Kunststoffstege als thermische Bremse für die Wärmeübertragung alleine ist jedoch nicht groß genug. Im Isothermenbild der zweiten Variante ist erkennbar, dass sich die großen Krümmungen der Isothermen in den Verbindungsbereichen Hüllfläche-Kederhalter und Kederhalter-Dämmblock befinden. Dies lässt sich mit der ca. 10-

fach größeren Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffkederhalter ($\lambda = 0,30 \text{ W/(mK)}$) im Vergleich mit dem Dämmmaterial ($\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$) erklären. Dennoch zeigt die Wärmestromdichteverteilung in Abbildung 40, dass aufgrund des Materialwechsels eine deutlich geringere Wärmeübertragung durch die Kederhalter stattfindet. In der Isothermendarstellung der dritten Variante mit Isolierglaseinsatz ist erkennbar, dass die Isothermen lediglich mit geringfügiger Krümmung von oben nach unten durch das Rahmenprofil laufen. Diese Ausführungsvariante weist die niedrigsten Wärmestromdichten von allen drei Varianten auf. Dies lässt sich dadurch erklären, dass im Klemmbereich des Isolierglases im Einstands Bereich beidseitig durch das Isolierglas die Dämmwirkung groß ist.

7.2.5 Planung und Herstellung der Profile

Konzept „Adnexus“

Die Konzepte „Adnexus“ und „Commodus“ wurden konsequent weiterentwickelt hinsichtlich der Erfüllung der strukturmechanischen Anforderungen. Für den Profilentwurf „Adnexus“ erfolgte die Herstellung von Mustern mit den Abmessungen 50 cm x 50 cm, wodurch Erfahrungen und Optimierungspotenziale aus fertigungstechnischer sowie montagetechnischer Sicht gewonnen werden konnten. Das Konzept „Adnexus“ wurde als eine preiswerte Lösung zur Herstellung von Fassadenmodulen identifiziert.

Beim Bau des Prototyps der „Adnexus“-Module wurde offensichtlich, dass die Maßtoleranzen aller Bauteile und der Schraubenlöcher gering gehalten und stets kontrolliert werden müssen. Des Weiteren sollten die U-Profile in den Zwischenlagen an ihren Ecken abgedichtet werden, um die Dichtheit des Profilsystems zu erhöhen. Nachfolgende Abbildungen zeigen den hergestellten Prototyp „Adnexus“.



Abb. 41: Ansicht Prototyp „Adnexus“, Foto: ILEK / Lorenz Riedel



Abb.42: Innenlagen Prototyp „Adnexus“, Foto: ILEK / Lorenz Riedel



Abb. 43: Modulstoß Prototyp „Adnexus“, Foto: ILEK / Lorenz Riedel



Abb. 44: Dichtungsebenen Prototyp „Adnexus“, Foto: ILEK / Lorenz Riedel

Einen wesentlichen Vorteil der beiden Profilentwürfe „Adnexus“ und „Commodus“ stellt die Tatsache dar, dass die Anzahl von Kederaufnahmen dem jeweiligen Projektbedarf und der jeweiligen Lagenanzahl entsprechend angepasst werden kann. Allerdings weisen beide Entwürfe einen Nachteil auf: Die Verbindungstechnik der einzelnen Profilkomponenten durch Verschraubung ist zeitaufwändig und komplex in der Fertigung. Für kleinere Fassadenprojekte wird dies sicherlich durch die Tatsache aufgewogen, dass die Profildesigns marktverfügbar sind (Profilkonzept „Adnexus“) und damit ohne weitere Kosten für Herstellungswerkzeuge bezogen werden können. Für den großflächigen Einsatz in der Fassadenanwendung jedoch ist eine Vereinfachung der Verbindungstechnologie der Komponenten nötig. Entsprechende Lösungen finden sich im Bereich von Fenster-, Türprofilen oder auch Elementfassaden durch das Verbinden der Komponenten mittels eingewalzter Stege. Die entsprechende Weiterentwicklung erfolgt in einem Nachfolgeprojekt unter dem Kurztitel „FoilTex“ als AIF-gefördertes Vorhaben in Kooperation mit zwei Firmenpartnern (Dipl. -Ing. Hölscher GmbH & Co. KG und Novavert GmbH & Co. KG). Eine prototypische Herstellung des entsprechend optimierten Profilentwurfs ist Inhalt dieses Nachfolgeprojekts.

Konzept „Keder-THERM+“

Die nachfolgende Abbildung 45 zeigt den Profileinsatz mit den beiden Kederaufnahmen zur Einbindung von zwei weiteren Lagen (in der Mitte mit eingeschobenem Kederstab und rechts ohne Einsatz).

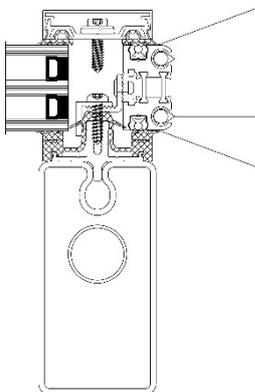


Abb.: 45: Therm+-Profil mit Einsatz zur Aufnahme einer Außen- und Innenmembran sowie von zwei weiteren Funktionsschichten“, Fotos: ILEK / S. Kalmbach

Die Herstellung dieses Profileinsatzes erfolgte als 3D-gedrucktes Muster, um damit die Montierbarkeit der ETFE-Folie und der Zwischenlagen zu prüfen. Für den Einbau wurde folgende Vorgehensweise ermittelt. Jedes der vier Teile des Rahmens, der aus den Profileinsätzen hergestellt wird, muss separat in die Kederschlaufen der Zwischenlagen eingeschoben werden bevor die vier Teile des Profileinsatzes zusammengefügt werden können. Im Anschluss erfolgt die Montage der beiden ETFE-Folie in das hierfür vorgesehene Klemmsystem. Der Rahmen mit den montierten Zwischenlagen und den ETFE-Folien wird schließlich in die Stahlprofile der Pfosten-Riegel-Fassade eingesetzt und dort mit den bewährten Standardklemmsystemen gehalten.

Einen weiteren Entwurf für einen Profileinsatz zeigt Abbildung 46 (rechte Zeichnung), bei diesem kommt ein U-förmiges Profil in das von RAICO entwickelte obere und untere Klemmsystem der ETFE-Folie zum Einsatz. Dieses ermöglicht die Aufnahme einer einzelnen Zwischenlage. Auch dieses Element wurde 3D-gedrukt und bezüglich der Einbausituation erprobt. Der Einbau einer Zwischenlage mit diesem Profileinsatz ist einfacher, da damit die Montage der Zwischenlage in den bereits montierten Rahmen ermöglicht wird. Zudem lässt das Klemmsystem das Nachspannen zu.

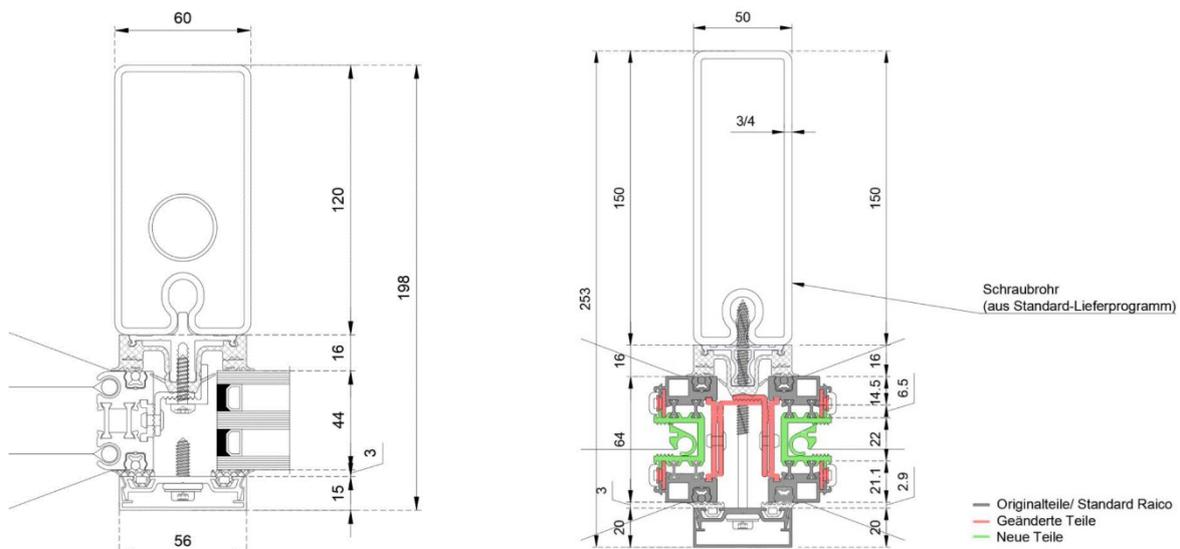


Abb.: 46: Entwicklung Therm+-Profil: Links finale Version der Entwicklung im Projekt "Adaptive Membranfassaden" Rechts: Weiterentwicklung mit U-förmigem Profil im Rahmen des ZIM-Projektes „FoilTex“

Die 11. Etage des Demonstratorhochhauses des Sonderforschungsbereiches 1244 ist für den Einbau einer ETFE-Kissen-Fassade vorgesehen. Das Hochhaus ist derzeit mit einer Primärfassade ausgestattet, die lediglich als Wetterhülle dient (Abbildung 47).



Abb.: 47: Primärfassade Demonstratorhochhaus, Foto: ILEK / W. Haase

Diese soll etagenweise durch Funktionsfassaden ersetzt werden. Vorgesehen ist der Einsatz des entwickelten Profilkonzepts für ETFE-Kissenfassaden in der 11. Etage des Demonstratorhochhauses des Sonderforschungsbereiches 1244 sofern eine Finanzierung der Pfosten-Riegel-Profile und der Presswerkzeuge für eine Variante des Profileinsatzes gefunden werden kann. Zudem ist die 8. Etage dem Einbau des weiterentwickelten modularen Profilsystems in Verbindung mit textilen und folienbasierten Hüllen vorbehalten.

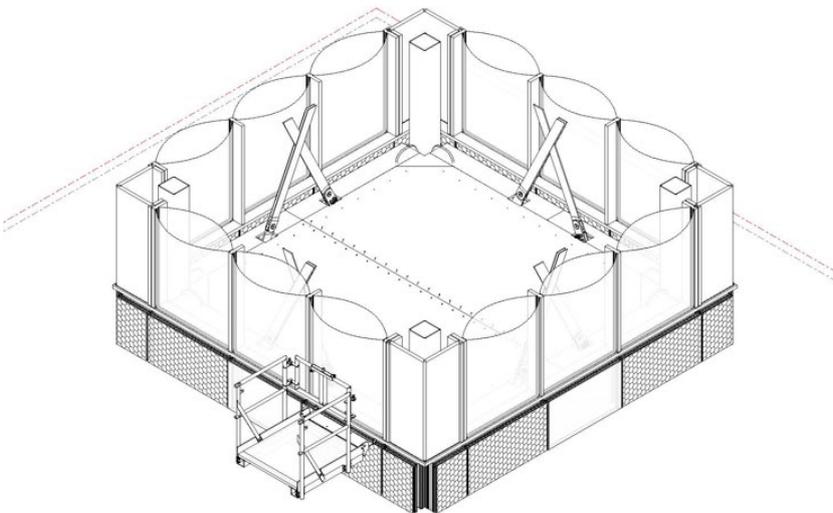


Abb.: 48: Entwurf einer ETFE-Kissen-Fassade der 11. Etage – Horizontal-Schnitt



Abb.: 49: Rendering der Fassaden von Etagen 9 – 12 des Demonstratorhochhauses

7.3 AP 3 Prüfung der Profil- und Hüllsysteme

Für die Prüfung der Profil- und Hüllsysteme verfügt das ILEK über eine umfangreiche messtechnische Infrastruktur. Die für die Untersuchungen vorgesehenen prüftechnischen Anlagen für die thermischen Versuche werden nachfolgend vorgestellt. Auf den Einsatz mechanischer Prüfeinrichtungen konnte verzichtet werden, da die Profilentwürfe mittels Finite-Elemente-Analysen hinreichend genau modelliert und nachgewiesen wurden.

7.3.1 Mechanische Simulation

Bei der Auslegung und den statischen Nachweisen der Profilentwürfe kam die Methode der Finite-Elemente zur Anwendung. In die Berechnungen einbezogen wurden der Einfluss der Vorspannung der Membranhülllagen sowie die relevanten äußeren Lasten. Auf die Ergebnisse wurde bereits im Kapitel 7.2.3 eingegangen.

7.3.2 Thermische Versuche – Bestimmung der Wärmeübertragung mittels Heizkasten

Zur messtechnischen Erfassung des Wärmedurchgangs von Mehrlagensystemen verfügt das ILEK über einen geregelten Heizkasten, eine sogenannte Hotbox. Die empirische Ermittlung der U-Werte ist damit möglich. Es bieten sich sowohl die numerische Berechnung mit der Software „Multilayer-Analysis-Tool“ wie auch die Messung im geregelten Heizkasten zur Bestimmung des Wärmedurchgangs von Hüllsystemen an. Der Einsatz der Software zur Charakterisierung setzt voraus, dass alle im Systemaufbau befindlichen Werkstoffe bezüglich deren Eigenschaften spezifiziert sind. Insbesondere die Ermittlung der Transmissions-, Reflexions- und Absorptionseigenschaften sowohl im gesamten solaren Strahlungsspektrum

wie auch im infraroten Wellenlängenbereich (3 μm bis ca. 50 μm) ist aufwändig. Im Projektrahmen wurden überwiegend Messungen mit der Hotbox zu Spezifizierung der unterschiedlichen Hüllaufbauten herangezogen.

Zur Bestimmung von Wärmedurchgangseigenschaften werden zwei Heizkasten-Verfahren beschrieben: das Verfahren mit kalibriertem Heizkasten (CHB) und das Verfahren mit dem geregelten Heizkasten (GHB). Das ILEK verfügt über einen geregelten Heizkasten (GHB), dessen Messkasten von einem Schutzkasten umgeben ist (in Anlehnung an DIN-Norm EN ISO 8990: Abb. 50). Der Heizkasten besteht aus drei zusammenfügbaren Teilen, einem Warm- und einem Kaltsegment sowie einem Mittelteil, der zur Aufnahme der zu untersuchenden Proben bestimmt ist. Auf der Warmseite befinden sich elektrische Heizelemente und auf der Kaltseite ist ein großflächiges Kühlblech mit Kühl-Flüssigkeitskreislauf, das mit einem Kühlaggregat verbunden ist, angeordnet (Abb. 51). Die Wärmedurchgangseigenschaften werden bei stationären Lufttemperaturen der Warm- sowie der Kaltseite sowie bei konstanter Leistungszufuhr auf der Warmseite bestimmt. Von der Warmseite aus stellt sich ein Wärmestrom durch die Probe zur Kaltseite ein, dessen Betrag gemessen wird. Der Wärmetransport erfolgt hierbei durch Wärmeleitung, konvektiven Wärmetransport sowie durch Wärmestrahlung. Dabei wird die Temperatur im Mess- sowie dem Schutzkasten konstant gehalten, um im Zusammenspiel mit der Kühlung der Kaltseite eine bestimmte Temperaturdifferenz zwischen den Lufttemperaturen der beiden Seiten der Probe sicherzustellen. Die Regelungsaufgabe der Warmseite übernimmt ein Mess- und Regelcomputer, der als „SHRINK!“ bezeichnet wird.



Abb. 50: Hotbox mit Kühlaggregat

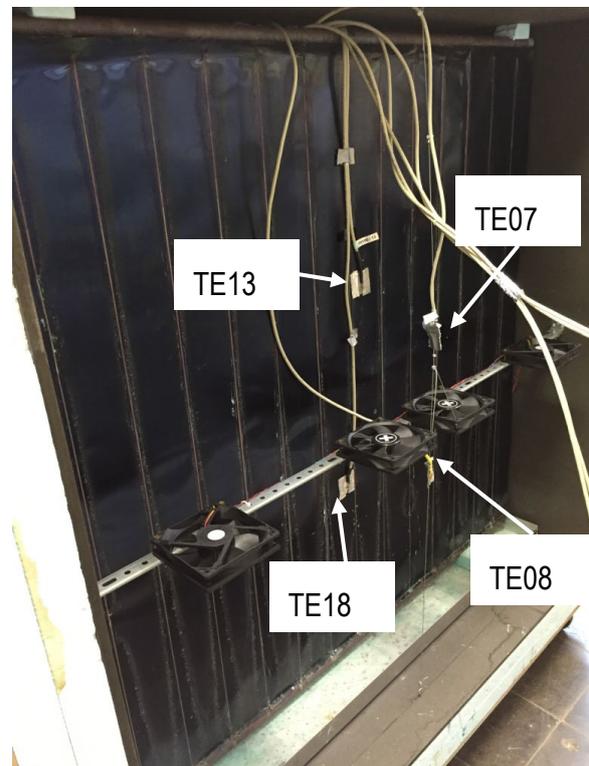
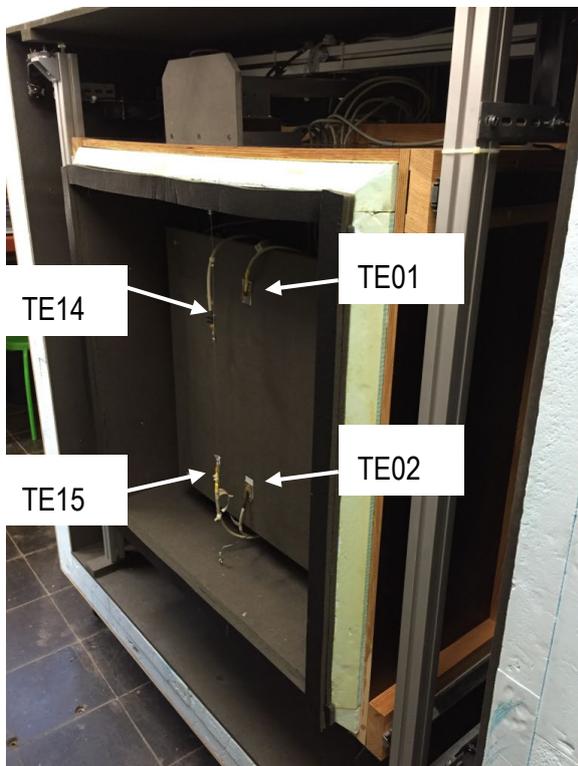


Abb. 51: Links: Hotbox Warmseite mit Temperatursensoren zur Lufttemperaturmessung (TE15+16) und Messung der Temperatur der Heizfläche (TE01+02); rechts: Hotbox Kaltseite mit Temperatursensoren zur Lufttemperaturmessung (TE7+8) sowie zur Messung der Temperatur der Oberfläche des Kühlbleches (TE13 +18)

Versuchsablauf

Nach dem Einbau und der Instrumentierung der Proben wird der Heizkasten verschlossen. Es beginnt zunächst das Aufheizen der Warmseite, bei gleichzeitigem Abkühlen der Kaltseite. Für die Warmseite wird über die Benutzeroberfläche des „SHRINK!“ zunächst eine gewünschte Solltemperatur im „automatic modus“ eingestellt, worauf die Warmseite intermittierend aufgeheizt wird, bis die entsprechende Heizleistung für die eingestellte Solltemperatur gefunden worden ist. In diesem Fall wechselt das Gerät in den sogenannten „constant mode“, bei dem eine konstante Heizleistung zugeführt wird. Dieser Vorgang dauert mindestens 12 Stunden, kann aber auch nach einigen Tagen noch nicht erreicht sein. Die auf der Kaltseite gewünschte Temperatur wird manuell am Kühlgerät eingestellt. Dieses hält konstant die eingestellte Temperatur am Kühlblech. Nach dem Einstellen der Heiz- und Kühlleistung benötigt die Hotbox mindesten weitere 24 Stunden bis sich ein stationärer Zustand eingestellt hat und die Sensor-Daten zur Auswertung herangezogen werden können. Als Auswertezeitraum wurde jeweils ein Zeitfenster von mehreren Minuten herangezogen, in welchem sämtliche Temperaturen möglichst konstant verlaufen. Die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) und die Wärmedurchlasskoeffizienten (1/R-Wert) werden anschließend aus den Messwerten der Wärmeflussplatten sowie der Temperatursensoren mit den folgenden Formeln berechnet:

$$U = \frac{q_{mittel}}{T_{LR WS} - T_{LR KS}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{q_{mittel}}{T_{OF WS} - T_{OF KS}} \quad (3)$$

mit :

$U =$	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m ² ·K]
$q_{mittel} =$	Mittlerer Wärmefluss von Warmseite zu Kaltseite	[W/m]
$T_{LR KS} =$	Lufttemperatur Warmseite	[°C]
$T_{LR WS} =$	Lufttemperatur Kaltseite	[°C]
$R =$	Wärmedurchlasswiderstand des Lagenaufbaus	[m ² ·K/W]
$T_{OF WS} =$	Oberflächentemperatur Warmseite	[°C]
$T_{OF KS} =$	Oberflächentemperatur Kaltseite	[°C]

Da die Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen den freien Oberflächen der Proben, jeweils von der vierten Potenz der absoluten Oberflächentemperaturen abhängt (Strahlungsleistung) und damit stark nichtlinear ist, wurden meist vier unterschiedliche Temperaturen der Luft auf der Warmseite bei möglichst gleicher Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltseite herangezogen, um für den jeweiligen Zustand den Wärmedurchgangskoeffizient zu bestimmen. In nachfolgenden Tabellen ist der Übersichtlichkeit wegen lediglich die Zusammenfassung der durchgeführten Messung dargestellt.

Lagenaufbauten

Im Rahmen von intensiv betreuten studentischen Abschlussarbeiten erfolgte die Vermessung einer Vielzahl von Hüllaufbauten, um deren wärmetechnische Eigenschaften zu bestimmen. In den nachfolgenden Tabellen 7 bis 10 sind einige der Hüllsysteme zusammen mit den ermittelten U- und R-Werten dargestellt.

Tab. 7: Wärmetechnische Kenndaten von unterschiedlichen Hüllsystemen. Quelle: About Seoud, I. (2022), [46]

Index	Lagenaufbau	Gesamt Dicke	Temperatur			Thermische Kennwerte (Hotbox- Messungen)		Zielvorgaben			
			Delta-T Luft	Temp. WS Luft	Temp. KS Luft	Wärmedurchlasswiderstand (1/R-Wert)	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	Wohngebäude		Nichtwohngebäude	
								Außen- und U-Wert < 0,28 [W/m²K]	Dach U-Wert < 0,20 [W/m²K]	Fenster U-Wert < 1,30 [W/m²K]	Transparente Außenbauteile U-Wert < 1,5 [W/m²K]
5-1	PTFE/glas (B18089), 12 mm Luft, ETFE, 100 mm Glasgespinst, ETFE, 12 mm Luft, PTFE/Glas (B18089)	125,8 mm	17,20	34,67	17,47	0,550	1,638	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
5-2			18,95	39,39	20,44	0,502	1,786	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
5-3			19,14	29,51	10,37	0,597	1,531	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
5-4			19,17	24,38	5,21	0,721	1,283	NEIN	NEIN	JA	JA
5-5			19,24	19,67	0,43	0,836	1,119	NEIN	NEIN	JA	JA
			Mittelwert			0,641	1,471	NEIN	NEIN	NEIN	JA
6-1	PTFE/Glas (B18089), 12 mm Luft, ETFE, 80 mm Aerogel-gefülltes Abstandsgewebe, ETFE, 12 mm Luft, PTFE/Glas (B18089)	106 mm	19,48	40,12	20,64	5,801	0,173	JA	JA	JA	JA
6-2			20,30	35,82	15,52	6,093	0,164	JA	JA	JA	JA
6-3			20,98	31,03	10,05	6,935	0,144	JA	JA	JA	JA
6-4			21,31	26,39	5,08	6,731	0,148	JA	JA	JA	JA
			Mittelwert			6,390	0,157	JA	JA	JA	JA

Tab. 8: Wärmetechnische Kenndaten von unterschiedlichen Hüllsystemen. Quelle: Alomar, H. (2022), [47]

Index	Lagenaufbau	Gesamt Dicke	Temperatur			Thermische Kennwerte (Hotbox- Messungen)		Zielvorgaben			
			Delta-T Luft	Temp. WS Luft	Temp. KS Luft	Wärmedurchlasswiderstand (1/R-Wert)	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	Wohngebäude		Nichtwohngebäude	
								Außen- und U-Wert < 0,28 [W/m²K]	Dach U-Wert < 0,20 [W/m²K]	Fenster U-Wert < 1,30 [W/m²K]	Transparente Außenbauteile U-Wert < 1,5 [W/m²K]
8-1	PTFE/glas, 12mm Luft, 50 mm Akustikvlies, 20 mm Luft, 50 mm Akustikvlies, 12 mm Luft, PTFE/Glas	144 mm	18,97	26,83	7,86	2,254	0,429	NEIN	NEIN	JA	JA
8-2			18,98	30,68	11,70	2,092	0,465	NEIN	NEIN	JA	JA
8-3			18,57	35,28	16,71	1,989	0,490	NEIN	NEIN	JA	JA
8-4			18,64	39,50	20,86	1,974	0,496	NEIN	NEIN	JA	JA
			Mittelwert			2,077	0,470	NEIN	NEIN	JA	JA
9-1	PTFE/glas, 12mm Luft, 50 mm Akustikvlies, 12 mm Luft, PTFE/Glas	74 mm	21,22	22,62	1,40	1,254	0,732	NEIN	NEIN	JA	JA
9-2			20,91	27,25	6,34	1,227	0,747	NEIN	NEIN	JA	JA
9-3			18,48	30,24	11,76	1,145	0,804	NEIN	NEIN	JA	JA
9-4			19,39	34,94	15,55	1,122	0,92	NEIN	NEIN	JA	JA
			Mittelwert			1,187	0,801	NEIN	NEIN	JA	JA
10-1	16 mm Polycarbonat Scheibe mit Aerogel gefüllt	16 mm	18,82	20,81	1,99	0,521	1,424	NEIN	NEIN	NEIN	JA
10-2			21,80	25,51	3,71	0,49	1,492	NEIN	NEIN	NEIN	JA
10-3			18,81	30,99	12,18	0,476	1,543	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
10-4			19,06	35,66	16,60	0,465	1,608	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
			Mittelwert			0,488	1,517	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
11-1	16 mm Polycarbonat Scheibe mit Aerogel gefüllt, 30 mm Luft, 16 mm Polycarbonat Scheibe mit Aerogel gefüllt	62 mm	19,54	20,59	1,05	1,197	0,745	NEIN	NEIN	JA	JA
11-2			20,14	25,50	5,36	1,105	0,807	NEIN	NEIN	JA	JA
11-3			21,16	30,09	8,93	1,05	0,849	NEIN	NEIN	JA	JA
11-4			21,86	35,45	13,59	1,002	0,889	NEIN	NEIN	JA	JA
			Mittelwert			1,089	0,823	NEIN	NEIN	JA	JA

Tab. 9: Wärmetechnische Kenndaten von unterschiedlichen Hüllsystemen. Quelle: Cai, Z. (2022), [48]

Index	Lagenaufbau	Gesamt Dicke	Temperatur			Thermische Kennwerte (Hotbox- Messungen)		Zielvorgaben			
			Delta-T Luft	Temp. WS Luft	Temp. KS Luft	Wärmedurchlasswiderstand (1/R-Wert)	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	Wohngebäude			Transparente Außenbauteile U-Wert < 1,5 [W/m²K]
								Außen- und U-Wert < 0,28 [W/m²K]	Dach U-Wert < 0,20 [W/m²K]	Fenster U-Wert < 1,30 [W/m²K]	
12-1	PTFE-Glasgewebe, 12mm Luft, 3-lagige Luftpolsterfolie LP-Keder, 12mm Luft, PTFE-Glasgewebe	51,13 mm	20,02	15,43	-4,59	2,263	1,628	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
12-2			21,00	20,86	-0,13	2,378	1,698	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
12-3			19,29	25,93	6,64	2,526	1,774	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
12-4			18,54	30,83	12,29	2,586	1,828	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
12-5			20,01	36,32	16,31	2,679	1,896	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
			Mittelwert			2,486	1,765	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
13-1	PTFE-Glasgewebe, 12mm Luft, 5-lagige Luftpolsterfolie LP-Keder, 12mm Luft, PTFE-Glasgewebe	68,15 mm	20,96	14,82	-6,14	1,478	1,137	NEIN	NEIN	JA	JA
13-2			20,48	19,58	-0,90	1,539	1,180	NEIN	NEIN	JA	JA
13-3			19,13	24,55	5,42	1,615	1,230	NEIN	NEIN	JA	JA
13-4			19,46	29,85	10,18	1,659	1,272	NEIN	NEIN	JA	JA
13-5			19,06	34,80	15,74	1,728	1,317	NEIN	NEIN	NEIN	JA
			Mittelwert			1,604	1,227	NEIN	NEIN	JA	JA
14-1	PTFE-Glasgewebe, 12mm Luft, 5 Lagen Alu-Luftpolsterfolien mit 4 Lagen 12mm Luftschnitt, 12mm Luft, PTFE-Glasgewebe	88,60 mm	21,03	15,31	-5,72	1,148	0,992	NEIN	NEIN	JA	JA
14-2			20,02	18,40	-1,63	1,199	1,000	NEIN	NEIN	JA	JA
14-3			19,47	24,54	5,07	1,253	1,040	NEIN	NEIN	JA	JA
14-4			19,84	29,22	9,38	1,045	0,897	NEIN	NEIN	JA	JA
14-5			19,17	34,08	14,90	0,874	0,767	NEIN	NEIN	JA	JA
			Mittelwert			1,104	0,939	NEIN	NEIN	JA	JA
15-1	PTFE-Glasgewebe, 12mm Luft, 10 Lagen Alu-Luftpolsterfolien mit 9 Lagen 12mm Luftschnitt, 12mm Luft, PTFE-Glasgewebe	163,60 mm	27,23	23,63	-3,60	0,470	0,454	NEIN	NEIN	JA	JA
15-2			24,79	24,85	0,06	0,477	0,459	NEIN	NEIN	JA	JA
15-3			20,83	27,48	6,65	0,499	0,481	NEIN	NEIN	JA	JA
15-4			20,81	30,41	9,60	0,511	0,488	NEIN	NEIN	JA	JA
15-5			19,53	35,18	15,65	0,525	0,501	NEIN	NEIN	JA	JA
			Mittelwert			0,496	0,477	NEIN	NEIN	JA	JA

Tab. 10: Übersicht der Lagenaufbauten der Hüllkonzepte mit wärmetechnischen Kennwerten Quelle: Pfeil, C. (2017) [49], Baur, T. (2017), [50]

Index	Lagenaufbau	Gesamt Dicke	Temperatur			Thermische Kennwerte (Hotbox- Messungen)		Zielvorgaben			
			Delta-T Luft	Temp. WS Luft	Temp. KS Luft	Wärmedurchlasswiderstand (1/R-Wert)	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	Wohngebäude			Transparente Außenbauteile U-Wert < 1,5 [W/m²K]
								Außen- und U-Wert < 0,28 [W/m²K]	Dach U-Wert < 0,20 [W/m²K]	Fenster U-Wert < 1,30 [W/m²K]	
1-1	ETFE 250 µm Standard Silber 50% Dekor 16 mm Punkte, 50 mm Luft, ETFE 150 µm, 50 mm Luft, ETFE 250 µm	200,65 mm	20,44	29,81	9,37	3,441	2,339	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
1-2			21,24	26,20	4,96	3,260	2,214	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
1-3			20,53	20,57	0,04	3,009	2,055	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
1-4			10,38	18,97	8,59	2,708	1,880	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
			Mittelwert			3,105	2,122	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
1-5	Polyester-PVC B4915, 85 mm Luft, Polyester-PVC B4915, 85 mm Luft, Polyester-PVC B4915	172,70 mm	18,95	19,66	0,71	3,090	2,270	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
1-6			19,85	25,95	6,10	3,400	2,430	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
1-7			20,86	34,08	13,22	4,080	2,600	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
1-8			23,99	38,63	14,64	4,490	2,810	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
1-9			31,43	48,96	17,53	4,840	3,080	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
			Mittelwert			3,980	2,638	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
2-17	Polyester-PVC B1915, 85 mm Luft, Polyester-PVC B1915, 85 mm Luft, Polyester-PVC B1915	172,70 mm	15,61	27,72	12,11	3,730	2,320	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
2-18			16,11	13,06	-3,05	2,620	1,730	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
2-19			19,14	20,11	0,97	3,670	2,360	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
2-20			19,91	33,72	13,81	4,130	2,550	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
2-23			23,57	25,20	1,63	3,540	2,260	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
			Mittelwert			3,538	2,244	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
4-29	Glas-PTFE B18089, 85 mm Luft, Glas-PTFE B18089, 85 mm Luft, Glas-PTFE B18089	172,10 mm	19,32	20,21	0,89	3,720	2,370	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
4-30			19,62	25,74	6,12	3,950	2,490	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
4-31			19,89	31,72	11,83	4,120	2,570	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
4-32			17,82	30,95	13,03	3,860	2,420	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
			Mittelwert			3,913	2,463	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
5-1	Polyester-PVC B1915, 150 mm Akustikvlies, Polyester-PVC B1915	151,80 mm	19,83	20,31	0,48	0,426	0,393	NEIN	NEIN	JA	JA
5-2			19,56	24,63	5,07	0,448	0,416	NEIN	NEIN	JA	JA
5-3			20,41	30,23	9,82	0,476	0,443	NEIN	NEIN	JA	JA
5-4			20,48	35,14	14,66	0,499	0,466	NEIN	NEIN	JA	JA
			Mittelwert			0,462	0,430	NEIN	NEIN	JA	JA

Von den transluzenten Hüllaufbauten unterschreiten die Systeme mit Aerogellagen im Zwischenraum den geforderten U-Wert sowohl für transparente wie auch für opake Bauteile meist deutlich.

Basierend auf der Recherche, der Profilentwicklung und den hygrothermischen Simulationen wurde für den Lagenaufbau des ersten Membranfassadenmoduls ein opaker Schichtaufbau gewählt. Dieser verfügt über ein regelbares Heizgewebe wodurch aktiv auf den U-Wert des Lagenaufbaus Einfluss genommen werden kann. Zudem bietet er eine gute Basis, um weitere adaptive Konzepte zu integrieren.

Der Lagenaufbau besteht aus vier Komponenten (Tab. 11). Ein PVC-beschichtetes (Bezeichnung: B4915) Polyestergewebe des Herstellers Verseidag kommt als Außenlage zum Einsatz. Dabei handelt es sich um eine weiße Membran vom Typ III. Bei 1100 g/m² Flächengewicht beträgt die Höchstzugkraft 6000 N/5 cm in Kettrichtung. Das Brandverhalten entspricht der Klasse B1 nach DIN 4102 sowie B-s2 d0 nach EN 13501. Nach einer 12 mm starken Luftschicht folgen aluminiumkaschierte Luftpolsterfolien als Wärmedämmlagen. Ausgewählt wurde die einseitig mit metallisiertem PET kaschierte Luftpolsterfolie aus PE der Foliendicke 120 µm von Oldenburg Kunststofftechnik. Es folgt eine weitere Luftschicht von 12 mm Dicke sowie ein textiles Heizelement. Die Innenraumoberfläche bildet ein 2,6 mm dickes Abstandsgewirk aus Polyester der Firma zwissTEX Germany GmbH, auf dem das Heiztextil an der zur Kaltseite gerichteten Oberfläche aufkaschiert ist.

Tab. 11: Opaker Lagenaufbau mit Luftpolsterfolien als Dämmlage

	Außenlage	Luftschicht	Dämmlage	Luftschicht	Adaptive Lage	Innenlage
Material	PES-PVC Gewebe, B4915	12 mm	10 x Luftpolster-Folien jeweils mit 12 mm Luftzwischenraum	12 mm	Heizgewebe	Abstandsgewirke

Der genannte Schichtaufbau wurde prototypisch realisiert und ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Die Ermittlung des U-Werts erfolgte unter Anwendung der Simulationssoftware „Layer-Tool“. Für den Lagenaufbau mit 12 Luftpolsterfolien konnte der U-Wert zu 0,273 W/m²K ermittelt werden. Der Berechnung zu Grunde lag gemäß DIN EN ISO 8990 eine Temperaturdifferenz von 20 K bei einer Innentemperatur von 20 °C. Der Aufbau erfüllt damit die Anforderungen an den U-Wert von 0,28 W/m²K und stellt gleichzeitig einen sehr leichten Fassadenaufbau mit einer flächenbezogenen Masse von ca. 4,3 kg/m² dar.



Abb. 52: Lagenaufbau mit integriertem Heizgewebe, Foto: ILEK / G. Metzger

7.4 AP 4 Realisierung und Test des 1:1 Prototyps

7.4.1 Planung und Herstellung

Fassadenkonzept LED-Fassade

Klassische Fassadenkonzepte berücksichtigen kaum die Interaktion der Fassade mit dem Außenraum. Ein Grund hierfür besteht darin, dass diese meist statisch sind und somit keine Kommunikation erlauben. Im Rahmen des Forschungsprojekts sollte daher für den Einsatz in einer ETFE-Kissenfassade wie auch in einer mehrlagigen Textilfassade eine mit Leuchtdioden (LED) bestückte Zwischenlage entwickelt werden. Diese mit Leuchtdioden ausgestattete Fassade sollte in der Lage sein, Informationen darzustellen sowie das farbliche Erscheinungsbild der Fassade zu verändern. Auch sollte sie eine flächige Innenraumbeleuchtung bei der Anwendung zum Innenraum hin ermöglichen. Das entwickelte LED-bestückte Textil stellt dabei eine additiv ergänzbare, zusätzliche Lage in einem nach bauphysikalischen Erfordernissen ausgelegten Hüllaufbau dar.

Hierzu wurde ein textiler Prototyp eines 3D-Textils für die Aufnahme einzelner LED-Streifen in Kooperation mit einem Industriepartner entworfen und hergestellt. Die LED-Streifen werden in die Kanäle des 3D-Textils eingeschoben und so fixiert. Von der Ansichtsseite vorgehängt findet sich ein weiteres Abstandsgewirke, welches als Diffuser fungiert und ein homogenes und einzigartiges Erscheinungsbild ermöglichen. Die Abstandsgewirke sind in der Lage das Leuchtdioden-System aufzunehmen und lassen sich mittels Kederverbindungen im Lagenaufbau einer ETFE-Kissen-Fassade oder auch einer mehrlagigen Textilfassade einbinden. Die LED-bestückten Abstandsgewirke tragen sicherlich auch zu einem verbesserten U-Wert bei. Sie wurden allerdings diesbezüglich nicht evaluiert und sind daher auch nicht als Ersatz für eine Wärmedämmschicht vorgesehen, sondern in Ergänzung einer solchen zu sehen.

Durch die streifenweise Anordnung der LEDs in übereinander angeordneten Linien ergibt sich eine Flächen-Matrix. Jede Leuchtdiode ist individuell ansteuerbar. Dadurch kann die Fassade medial bespielt werden. Dies geschieht über ein eigens hierfür entwickeltes User-Webinterface, welches online aufgerufen werden kann. Fotos und Videos können benutzerfreundlich hochgeladen und auf der Fassade angezeigt werden. Durch die Streuung des Lichts an dem Diffuser-Textil, wird das Licht bei einer transluzenten Ausführungsvariante der Hülle sowohl im Außenraum als auch im Innenraum wahrgenommen. Dieses Fassadenelement kann wie ein Bildschirm genutzt werden. Vorteil gegenüber einem Bildschirm ist die textile Natur des Fassadenelements, das durch die Biegeweichheit in jede Form gebracht werden kann und durch die Transluzenz das Tageslicht hindurch lässt.

Im Prototyp ist eine LED-Matrix bestehend aus 75 x 192 RGB-LEDs verbaut (Abb. 54). Jedes dieser LEDs ist individuell ansprechbar und kann bis zu einer Frequenz von 30 Frames per Second (FPS) die Farbe ändern. Zur Steuerung und Synchronisierung der LEDs werden zwei Microcontroller eingesetzt. Eine weitere Recheneinheit stellt eine Webseite zur Interaktion mit den Nutzern bereit, verwaltet die darzustellenden Motive und konvertiert die hochgeladenen Bilder und Videos in das für die LED-Matrix notwendige Datenformat. Der Prototyp zeichnet sich dadurch aus, dass er wie ein sehr großer Bildschirm verwendet werden kann, jedoch transluzent und flexibler ist.

Die Stromversorgung, sowie die Recheneinheiten sind in einem separaten nebenstehenden Schrank mit Lüftung eingebracht. Die 12 Netzteile mit einer Spannung von 5 Volt sichern die Stromversorgung der 14.400 LEDs. Das Versorgungs- und Steuerungskonzept des LED-Systems ist in Abbildung 53 dargestellt.

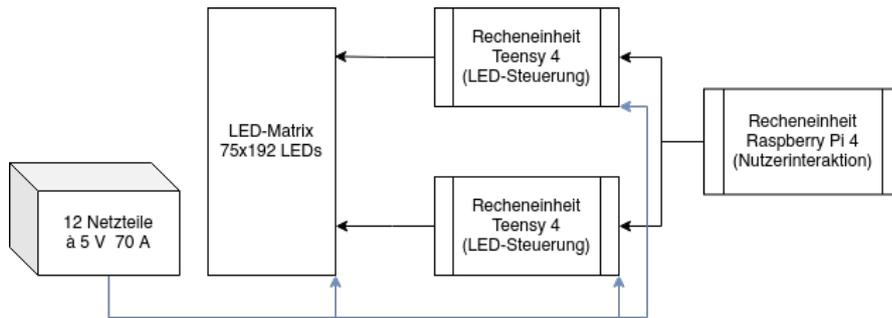


Abb. 53: Schematische Darstellung der Stromversorgung der Komponenten



Abb. 54: Konzept WALL-E, Außenansicht der LED-Fassade im ILEK-Testgebäude

Der textile Träger der Leuchtdiodenstreifen

Der textile Träger der LED-Streifen besteht aus drei Schichten. Die unterste Schicht ist ein dünner Stoff aus Polyester, welcher mit dem darüber liegenden 3D-Textil vernäht ist. Auf dieses 3D-Textil ist ein Abstandsgewirke in Breite der LED-Streifen angebracht. Dieses dient zur Druckverteilung innerhalb des Textils, um mögliche Schäden durch Verformungen zu vermeiden sowie zur Sicherstellung der Position der LED-Streifen. Durch das Verbinden der zwei Textilien ergibt sich ein Zwischenraum, in welchem die LED-Streifen eingebracht werden. Ein 10 mm starkes Abstandsgewirke, welches in einem Rahmen über die Matrix gespannt wird, dient als Lichtdiffusor-Schicht, welche das Licht der LED-Streifen so streut, dass die einzelnen Pixel nicht mehr sichtbar sind. Dadurch ergibt sich eine homogen beleuchtete Fläche. Das Textil kann verformt werden, ohne dessen Funktion zu beeinträchtigen. Alle verwendeten Textilien sind wasserbeständig, sowie schwer entflammbar (B1).

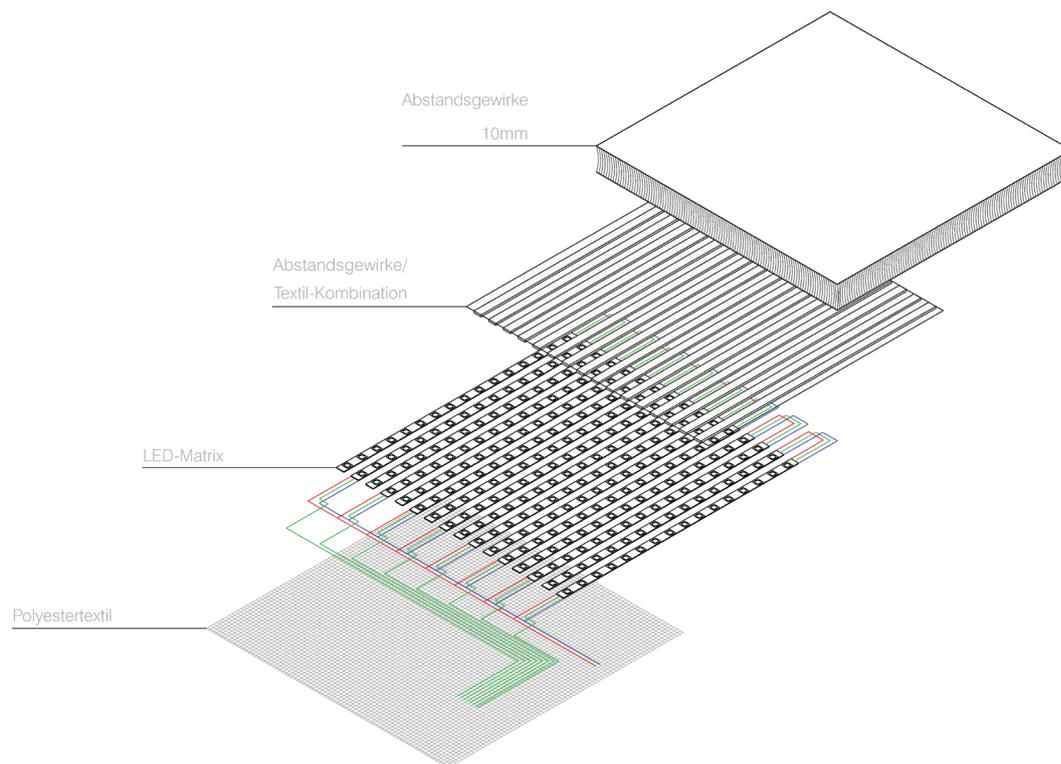


Abb. 55: Lagenaufbau des LED-Textils

Das Einziehen der LED-Streifen erfolgte mit Führungsschienen, was den Vorteil bietet, dass die Wartung und der Tausch einfach und schnell bewerkstelligt werden können. Bei den LED-Streifen wurde der Typ OctoWS2811 (später OctoWS2812B) gewählt. Bei diesen LEDs können über einen einzigen Datenkanal alle LEDs einzeln angesprochen werden. Die insgesamt 192 Streifen mit jeweils 75 LEDs wurden in alternierender Richtung in das Textil gezogen. So konnten die Datenleitungen der LED-Streifen durchgehend verbunden werden. Mehrere Reihen konnten mit einer Datenleitung gesteuert werden. Insgesamt waren somit lediglich 16 Datenkanäle nötig (eine Datenleitung pro 12 Streifen beziehungsweise pro 900 LEDs). Die LED-Streifen sind mit einer wasserbeständigen Silikonschicht überzogen, um Schäden durch Feuchte vorzubeugen.

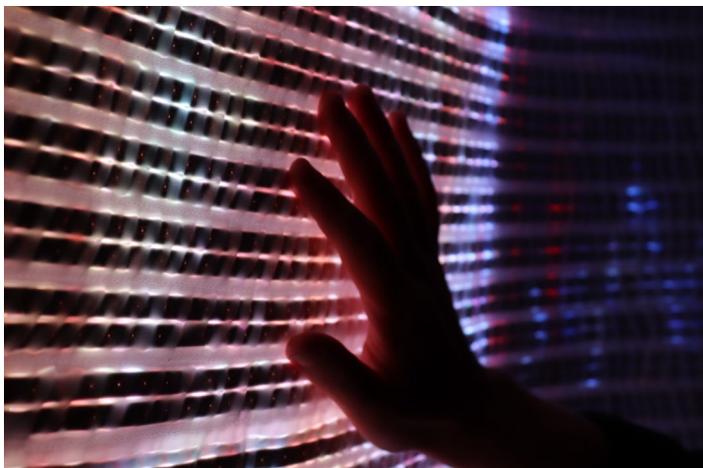


Abb. 56: Darstellung der LEDs abgewandten Textilseite

Mikrocontroller

Teensy 4 - Mikrocontroller

Der Teensy 4-Mikrocontroller ist ein kleines und leistungsstarkes USB-basiertes Entwicklungsboard. Ein Mikrocontroller führt meist lediglich ein Programm aus, wodurch es sich von einem vollwertigen Rechner unterscheidet. Beim Prototyp wird das Board genutzt, um die Datenübertragung von einer seriellen USB-Schnittstelle auf die LEDs zu ermöglichen. Dabei werden die einzelnen Bilder vom Byte-Format in die LED-spezifische Wellenform (PWM-Signal) konvertiert.

Genutzt werden zwei Teensy 4.0 Controller mit jeweils einem OctoWS2811-Adapter-Board, welches die nötigen Widerstände und Ethernet-Anschlüsse für das LED-Datenkabel integriert.

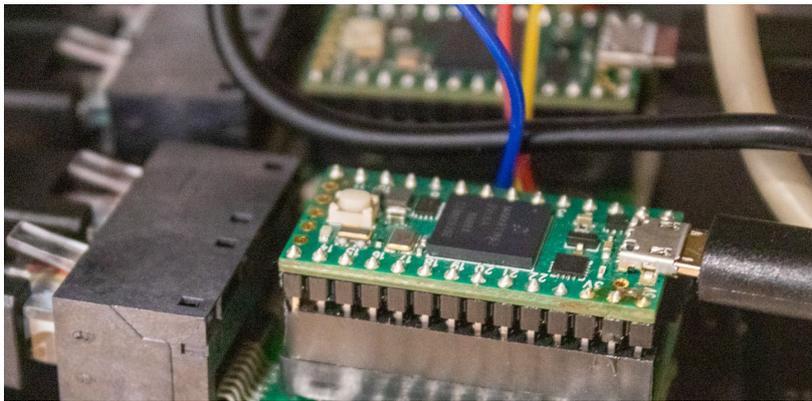


Abb. 57: Steuermodule der LED-Streifen (Teensy 4)

Anschlüsse

Die zwei zum Einsatz kommenden Teensy 4-Mikrocontroller besitzen jeweils 8 digitale Ausgangspins, über welche die Farbcodierung mittels PWM-Signale an die LEDs übermittelt werden. Pro Ausgangspin werden 900 LEDs (12 LED-Streifen) angesteuert. Angeschlossen werden die LED-Streifen mit je einem Datenkabel eines Ethernet-Kabels. Das Ethernet-Kabel kann mit Hilfe des OctoWS2811-Adapter-Boards an den Teensy angeschlossen werden. Die Bildwiederholrate der LEDs wird zudem zwischen den beiden Teensy-Mikrocontrollern synchronisiert. Die Mikrocontroller erhalten die anzuzeigenden Daten im Byte-Format von einem Einplatinenrechner (Raspberry Pi 4) über eine serielle USB-Schnittstelle. Die beiden Mikrocontroller werden für ihre Stromversorgung an einem der zwölf 5V-Netzteile angeschlossen. Dabei ist zu beachten, dass alle zwölf Netzteile (am 5V Ausgang) gleich geerdet sind, um Störungen in der Datenübertragung zu vermeiden (der Dateninput der LEDs ist zur 5V-Leitung geerdet).

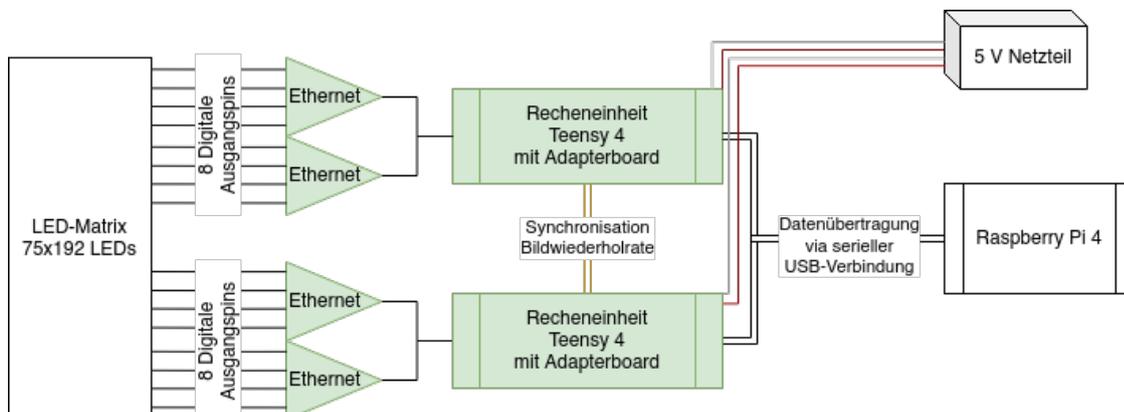


Abb. 58: Schematischer Aufbau der Hardwarekomponenten

Software der Teensy-Mikrocontroller

Auf den Mikrocontrollern wird eine angepasste Version des Open Source verfügbaren Programmcodes "VideoDisplay" ausgeführt. Die angepasste Version ist bereits als Pull-Request in die OctoWS2811-Treiber-Bibliothek aufgenommen worden (https://github.com/PaulStoffregen/OctoWS2811/blob/master/examples/VideoDisplay_Teensy4/VideoDisplay_Teensy4.ino).

Die vom Raspberry Pi 4 gesendeten Bilder im Byte-Format werden durch die Programmierung der Mikrocontroller in ein PWM-Signal umgewandelt und über die Datenleitung an die LEDs gesendet.

Steuereinheit - Raspberry Pi 4 - System on a Chip (SoC)

Der Raspberry Pi 4 ist ein günstiger, kreditkartengroßer Einplatinencomputer. Auf diesem Computer können rechenintensive Programme ausgeführt werden. So werden sowohl die Konvertierung der Videos für die LEDs als auch die nutzerseitige Steuerung der LEDs über eine Webseite, auf dem Raspberry Pi 4 abgewickelt. Um die Verwaltung und die Skalierbarkeit des Projekts zu vereinfachen, werden die Programme über ein "Fleet Management Tool" auf dem Raspberry Pi ausgeführt.



Abb. 59: Zentrale Recheneinheit Raspberry Pi 4

Anschlüsse

Zwei Micro-USB-Kabel verbinden die Teensy-Mikrocontroller mit dem Raspberry Pi 4. Durch die USB-Schnittstelle wird eine serielle Verbindung zu den Teensy-Mikrocontrollern hergestellt, über welche die Daten im Byte-Format übertragen werden. Für die Internetverbindung, welche für Verwaltungszwecke und für die Bereitstellung des Web-Interfaces benötigt wird, ist ein Ethernetkabel an den Raspberry Pi angeschlossen. Die Stromversorgung kann entweder mit einem Netzteil über den USB-C-Anschluss oder einem PoE-Hat (Power over Ethernet) erfolgen. Um ein langsames Hochfahren der Netzteile zu ermöglichen und so die Stromspitze beim Starten des Fassadenelements zu verhindern, steuert die Software über die GPIO-Ports (General Purpose Input/Output = programmierbare digitale Kontaktstifte) des Raspberry Pi 4 sechs Relais, welche mit wenigen Sekunden Abstand nacheinander die Netzteile aktivieren (Abb. 60).

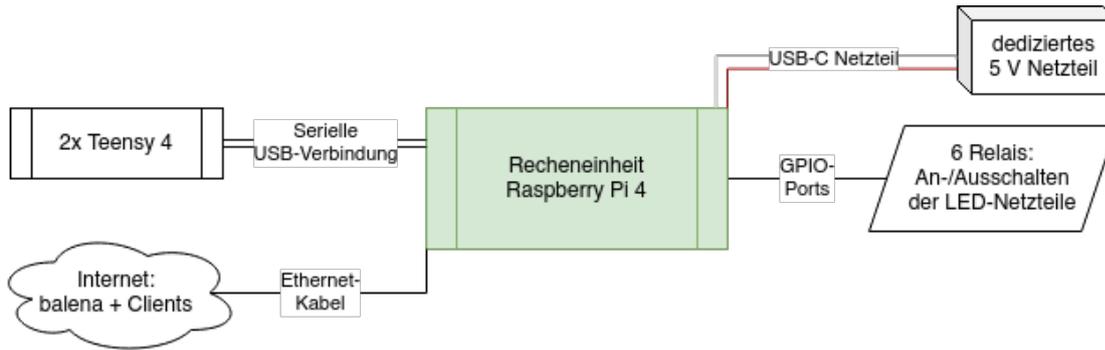


Abb. 60: Schematischer Aufbau der Verbindungen der Komponenten

Software zur Nutzerinteraktion

Die Software ist in zwei Teile gegliedert. Als "Frontend" wird der Programmteil bezeichnet, mit dem die Nutzer interagieren. Dies ist eine Webseite, welche eine grafische Oberfläche für das Hochladen von neuen Videos und Fotos bietet. Diese grafische Oberfläche kommuniziert mit dem zweiten Teil, dem Application Programming Interface, kurz API. Diese "Backend"-Schnittstelle bietet verschiedene Programmfunktionen an, welche die eigentliche Verwaltung der Daten auf dem Gerät ermöglichen. Jede Aktion auf dem "Frontend" löst eine Anfrage bei der API aus, die sich um die reibungslose Anzeige der Videos und Fotos kümmert. Die Dateien werden in eine Warteschleife eingereicht und für die Anzeige auf dem LED-Textil konvertiert. Im letzten Schritt werden die konvertierten Dateien auf die Mikrocontroller übertragen. Diese Softwarekomponenten werden in einer Verwaltungseinheit (<https://www.balena.io/>) auf dem Raspberry Pi 4 ausgeführt, die einfache Update- und Verwaltungsfunktionen für eine Remote-Wartung bietet (Abb. 61).

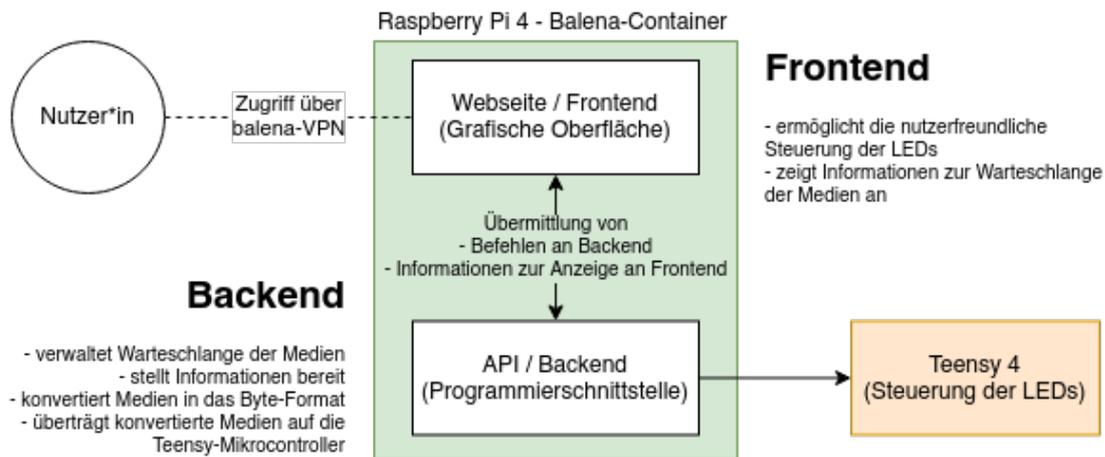


Abb. 61: Schematischer Aufbau der Softwarekomponenten

Frontend (Webseite)

Die Nutzer-Oberfläche ist als eine Webapp mit Backend-API ausgeführt. Das Frontend läuft auf einem Apache-Webserver und ist eine Webseite, die in den Programmiersprachen HTML, PHP, CSS und JavaScript programmiert ist. Hier können Bilder und Videos zur Anzeige auf dem Fassadenelement hochgeladen werden. Weitere interaktive Komponenten sind hierfür ebenfalls denkbar. Die Oberfläche ist mit einem Login Passwort geschützt. Das Frontend kann per IP-Adresse des Raspberry Pis oder per VPN im

Browser aufgerufen werden. Der Webserver fungiert auch als Proxy für die API, die ebenfalls auf dem Raspberry Pi 4 läuft. Durch diesen Proxy wird die Backend API auf die Unterseite "/api/" gespiegelt, damit die Webapp auf einer einzigen Internet-Adresse ausgeführt werden kann.

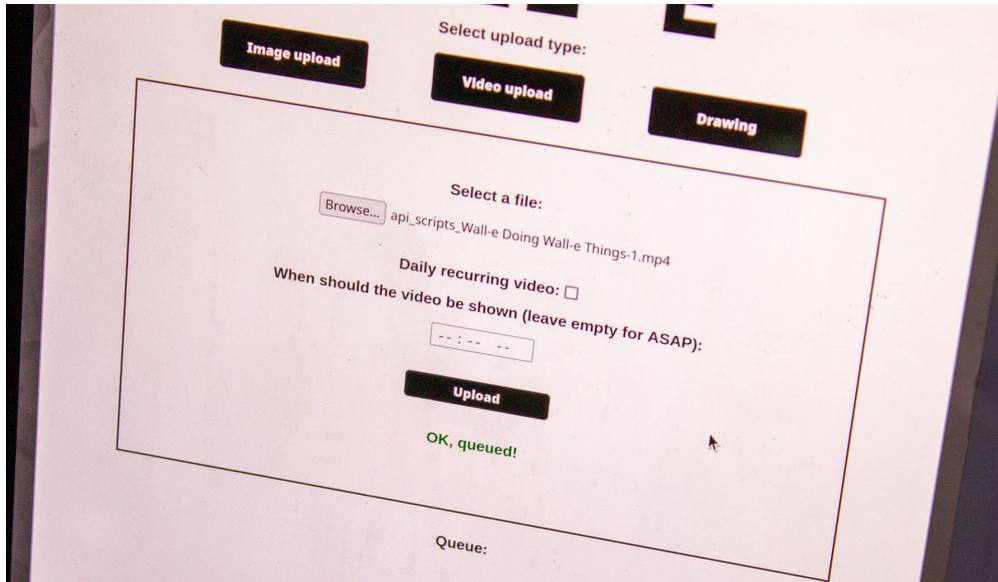


Abb. 62: Webbasierte Benutzeroberfläche zum Ausführen der LED-Fassade

Backend (API - application programming interface)

Das Backend besteht aus einer Python-API (FastAPI), welche die Warteschlange der hochgeladenen Medien verwaltet. Die API bietet über unterschiedliche Web-Adressen (URLs) Funktionen an, um die Warteschlange der Medien zu verwalten. So werden unter anderem über API-Anfragen das Hochladen von Medien, die Anzeige der Warteschlange, das Entfernen aus der Warteschlange und das Ein- und Ausschalten der Fassade abgewickelt. Das Python-Programm speichert die Medien temporär im Speicher des Raspberry Pi 4, wo sie nacheinander in einen Prozess zur Übertragung der Daten weitergegeben werden. Das geschieht, indem ein neues Programm (Subprocess) gestartet wird, welchem über Command-Line-Flags die nötigen Informationen übergeben werden. Command-Line-Flags sind Einstellungsmöglichkeiten, die beim Starten eines Programms direkt übergeben werden.

Balena Fleet Management

Mit Infrastruktur und Software von balena können Softwarecontainer für eine große Anzahl von Linux-basierten System-on-a-chip-Computern erstellt, bereitgestellt und verwaltet werden. Die Softwarecontainer (Docker-Container) haben den Vorteil, dass sie alle erforderlichen Programme vorinstalliert haben und ohne weitere Konfiguration auf allen Computern gleich ausgeführt werden können. Mit balena können Einstellungen und Updates der Softwarecontainer einfach von jedem PC aus gesteuert werden. Die Anzahl der Geräte kann somit einfach skaliert werden. Durch ein VPN, welches balena zur Verfügung stellt, kann zudem außerhalb des lokalen Netzwerks auf die Benutzeroberfläche der Geräte zugegriffen werden.

Die Einstellungsvariablen, wie das Frontend-Passwort, die Helligkeit der LEDs als Gamma-Wert, die Zeitzone oder die seriellen Anschlussnamen der Teensy-Mikrocontroller können ebenfalls über balena "flottenübergreifend" eingestellt werden.

Stromversorgung

Um den Strombedarf der OctoWS2811-LEDs zu decken, werden 12 Einheiten von 5-Volt Netzteilen benötigt. Diese geben den Strom über Kabel an Verteilerschienen, an denen die LED-Streifen angeschlossen sind. Die maximal benötigte Leistung der LED-Fassade ergibt sich aus der benötigten Leistung einer LEDs bei voller Helligkeit ($50 \text{ mA} * 5 \text{ V} = 0,25 \text{ W}$) multipliziert mit der Anzahl an LEDs (14400 St.). Daraus ergibt sich eine maximale Leistungsaufnahme von 3600 Watt.



Abb. 63: Netzwerkschrank ausgestattet mit der Steuereinheit und den 5 Volt Netzteilen

Um die anfängliche Stromspitze beim Starten der Netzteile abzufedern, werden über GPIO-Ports Relais gesteuert, die mit geringer Verzögerung alle Netzteile nacheinander einschalten. Dafür ist die Phase des ~230 Volt Wechselstroms mit den Relais verbunden.

Jedes Netzteil versorgt 16 LED-Streifen. Dazu wurden 4 Kabel (2 x Pluspol, 2 x Minuspol) an die 5 Volt Anschlüsse eines Netzteils geschraubt. Die Aufteilung auf die jeweils acht LED-Streifen erfolgt mittels Schraubverteilungsschienen auf jeweils acht LED-Streifen. Jeder LED-Streifen erhält seine eigene Stromversorgung, da die Spannung bei der Länge der LED-Streifen nicht für eine höhere Anzahl an LEDs ausreichend wäre. Außerdem kann somit die Wärmebelastung der LEDs reduziert werden, indem die Wärme auf die Verteilungsschienen abgeführt wird. In diesem Aufbau wurden insgesamt 48 Kabel (zusammengefasst in 24 Doppelkabel) in 24 Verteilerschienen aufgeteilt. Pro Kabel fließen nun bei Maximalbelastung ca. 30 Ampere, die Kabel wurden dementsprechend dimensioniert. Alle Verbindungen sind zur einfachen Wartung als "Schraub-Klemm-Verbindungen" ausgeführt.

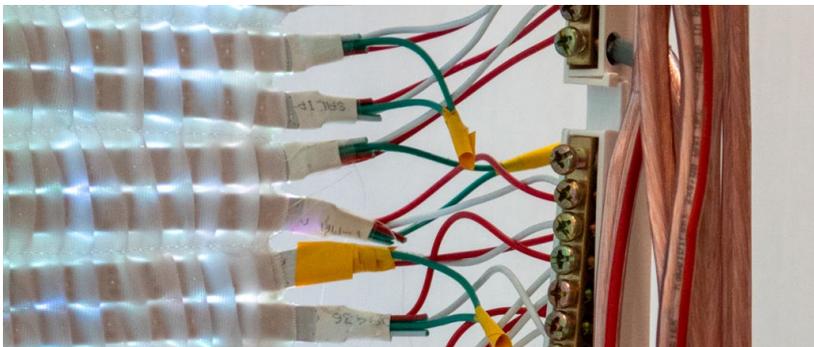


Abb. 64: Darstellung der Schraubverbindungen zur einfachen Wartung

Übersicht

Nachfolgend in Tabelle 12 dargestellt sind die Komponenten des LED-Systems. Bei der Erstellung des Prototyps der LED-Fassade sowie dessen Beschreibung haben die Studierenden Timo Bilhöfer sowie Markus Pfaff zum Erfolg beigetragen.

Tab. 12: Übersicht der Komponenten des LED-Systems

Abmessungen	3,00 m x 1,25 m
Anzahl LED	14400 St.
Anzahl LED-Streifen	192 St.
Anzahl LED / Streifen	75 St.
Anzahl Teensy4	2 St.
Anzahl Channel	16 St.
Anzahl Channel / Teensy	8 St.
Anzahl LED / Channel	900 St.
Anzahl Raspberry Pi	1 St.
Anzahl Netzteile	12 St.
Leistung / Netzteil	350 W
Stromstärke / Netzteile	70 A
Ausgabespannung Netzteil	5 V
Anschluss Leistung	4200 W

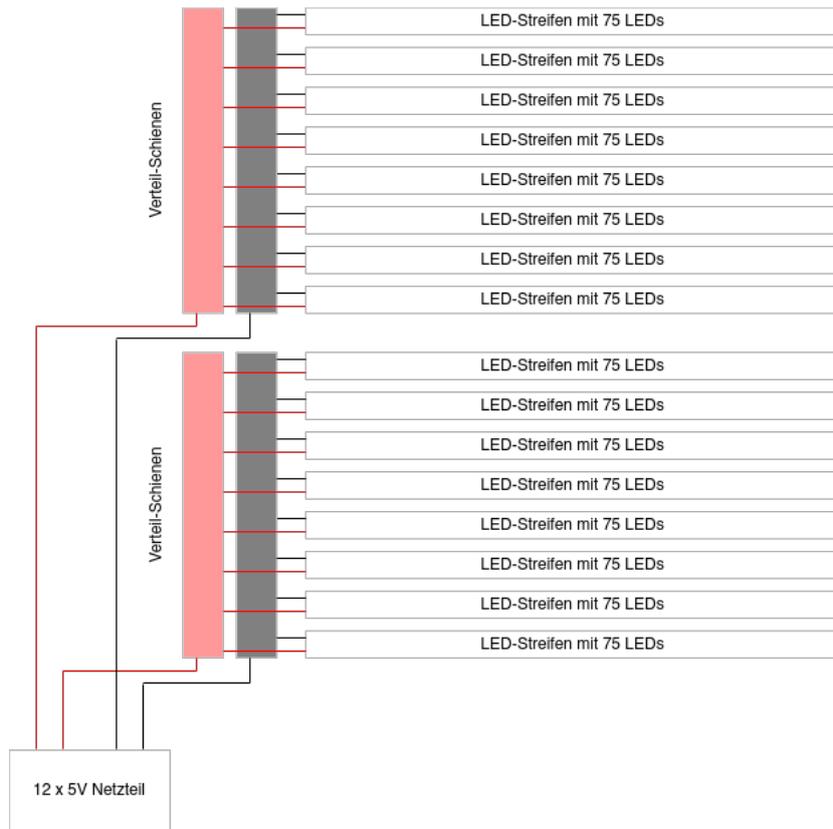


Abb. 65: Schematische Darstellung der Verschaltung der LED-Streifen

Interaktionskonzepte

Parallel zur technischen Entwicklung der Fassade, wurden verschiedene Konzepte zur Interaktion mit dem Textil untersucht. Nachfolgend sind diese dargestellt.

Eine spielerische Verbindung zum Gebäude kann über eine "Montagsmaler"-App hergestellt werden. Über ein freies virtuelles Zeichenfeld wird die Möglichkeit gegeben, in Echtzeit Zeichnungen auf der Fassade erscheinen zu lassen, deren Motiv andere Menschen erraten müssen.

Ein weiteres Konzept sieht vor, über Farben und Animationen im Innen- und Außenraum gezielt die Empfindungen der Nutzer positiv zu beeinflussen.

Weiter ausgearbeitet wurde das Konzept mit dem Titel WALL-E. Konzeptionell lebt ein virtueller Mensch als "Schattenfigur" in der Fassade, welcher die Nutzer zur Interaktion anregt. Interagiert wird mit dem Nutzer einerseits durch Rückmeldung und Reaktion, andererseits auch durch "selbstständige" Aktionen, die den Nutzer auffordern, zu interagieren. Es wird hierbei menschliches Verhalten nachgeahmt, indem Körpersprache und Gefühle zum Ausdruck gebracht werden. Die Schattenfigur verfügt über eigene "Charaktermerkmale", die das Interesse des Nutzers zur Interaktion wecken sollen. Interaktionen können beispielsweise die Aufforderung zu einer Partie "Schere, Stein, Papier" sein. Auch hierbei werden Emotionen und Körpersprache des Nutzers über eine Microsoft Kinect aufgenommen, eine Kamera, die speziell zum Erfassen und Interpretieren von Körperbewegungen entwickelt wurde.

Herausforderungen, Schwierigkeiten & Ausblick

Zur Gewährleistung einer hohen Zuverlässigkeit des Systems ist der Einsatz von abgeschirmten und flexiblen Datenkabel anstelle der einfachen ungeschirmten Ethernet-Kabel sinnvoll.

Da die Spannung der LEDs von 5 Volt sehr gering ist, wird eine hohe Stromstärke zum Betreiben des Fassadenelements benötigt. Dies führt dazu, dass eine große Anzahl an Netzteilen benötigt wird, um den ~230 Volt Wechselstrom auf 5 Volt Gleichstrom umzuwandeln. Damit verbunden muss der Kabeldurchmesser auf die hohe Stromstärke angepasst werden, wodurch sich die Materialkosten maßgeblich erhöhen. Die Flexibilität des Textils wird dabei ebenfalls eingeschränkt, da die große Kabeldichte das Gewicht des Fassadenelements erhöht und die Anzahl der Verbindungsstellen zwischen Kabel und LED-Streifen eine bedeutende Schwachstelle beim Transport darstellen. Schließlich ist die hohe Stromstärke auch in den LED-Streifen problematisch, da sie eine erhöhte Wärmeentwicklung und Kurzschlussgefahr bedeutet. Gerade bei Sonneneinstrahlung kann die Wärmeentwicklung zu einer unangenehmen hohen Raumtemperatur führen. Um die Anzahl der Netzteile, den Kabeldurchmesser und die Wärmeentwicklung zu reduzieren, empfiehlt es sich LEDs mit einer höheren Spannung zu wählen, beispielsweise WS2815-LED-Streifen mit 12 V oder ähnliche Modelle. Der Vorteil von WS2815-LED-Streifen besteht darin, dass die Software ohne weitere Anpassung mit diesen LED-Streifen kommunizieren kann. Zudem reduziert sich die Stromstärke auf ca. 41 % des Werts der 5 V-LEDs.

Auswirkungen des Betriebs des LED-Systems auf die Innenraumtemperatur

Zur Ermittlung der Außen- und Innenraumwirkung des textilen, mit LEDs bestückten Aufbaus wurde dieser innen vor der geschloßhohen Glasfassade eines Testraumes im Erdgeschoß (Raum 0.2, Grundfläche: 8,4 m²) des institutseigenen Fassadentestgebäudes angebracht. Die Außenwand des Gebäudes weist einen U-Wert von 0,3 W/(m²K) auf, die Innenwände sind mit einem U-Wert von 0,48 W/(m²K) ausgeführt, der U-Wert des Bodens liegt bei 0,21 W/(m²K) und die Zwischendecke weist einen U-Wert von 0,49 W/(m²K) auf. Während eines 48-stündigen Dauerbetriebs mit ununterbrochener Bespielung der LEDs bei maximaler Helligkeit erfolgte ein kontinuierliches Monitoring zur Ermittlung des Einflusses des LED-Systems auf die Innenraumtemperatur. Gegenüber dem identischen Vergleichsraum (Raum 0.1, Heizungsollwert 21 °C, keine Nutzerbelegung) wurde eine Temperaturerhöhung um etwa 10 K während des

Nachtbetriebs und bis zu 15 K beim Tagesbetrieb festgestellt (Abb. 66). Dies ist von besonderer Relevanz, da das LED-System als Bestandteil eines mehrlagigen textilen Hüllaufbaus oder einer ETFE-Kissenkonstruktion vorgesehen ist und im Betrieb keinesfalls dazu führen darf, dass es zu einem Wärmestau im Hüllaufbau kommt.

Eine geringere Wärmeentwicklung bei gleicher Leistungsaufnahme der LEDs lässt sich effizient über die Reduktion der Stromstärke bewerkstelligen. Dies ist u.a. möglich, durch den Wechsel zu LEDs mit einer höheren Versorgungsspannung und damit einer deutlich verringerten Stromstärke. Eine Reduzierung der Verlustleistung über die Verringerung der Helligkeit ist ebenso möglich. Die Wärmeentwicklung wird verursacht in den elektronischen Komponenten wie den Netzteilen, den LED-Streifen und den elektrischen Leitungen zwischen den Bauteilen. Der Vorteil von LEDs gegenüber einem klassischen Bildschirm besteht darin, dass diese keine Hintergrundbeleuchtung benötigen. Die Darstellung von Schwarz entspricht dabei der Deaktivierung der entsprechenden LEDs, wobei diese keine Leistung benötigt. Durch die Verwendung von LEDs mit höherer Betriebsspannung, einer reduzierten Helligkeit bei der Darstellung der Inhalte sowie weiteren Anpassungen der Hardware ist eine signifikante Reduzierung der Verlustleistung und der damit verbundenen Wärmeentwicklung möglich. In Verbindung mit einer verstärkten Durchlüftung des mit LEDs belegten ETFE-Kissenzwischenraums kann die Verlustwärme des LED-Systems abgeführt werden. Entsprechende Lüftungssysteme beziehungsweise Druckluftversorgungseinheiten sind Bestandteil jeder überdruckstabilisierten Kissenfassade und stellen somit keinen zusätzlichen infrastrukturellen Aufwand dar. Beim Einsatz in textilen Mehrlagenhüllen ist für den Sommerfall die Lüftungsmöglichkeit des mit LEDs belegten Zwischenraums mit ausreichendem Luftaustausch vorzusehen.

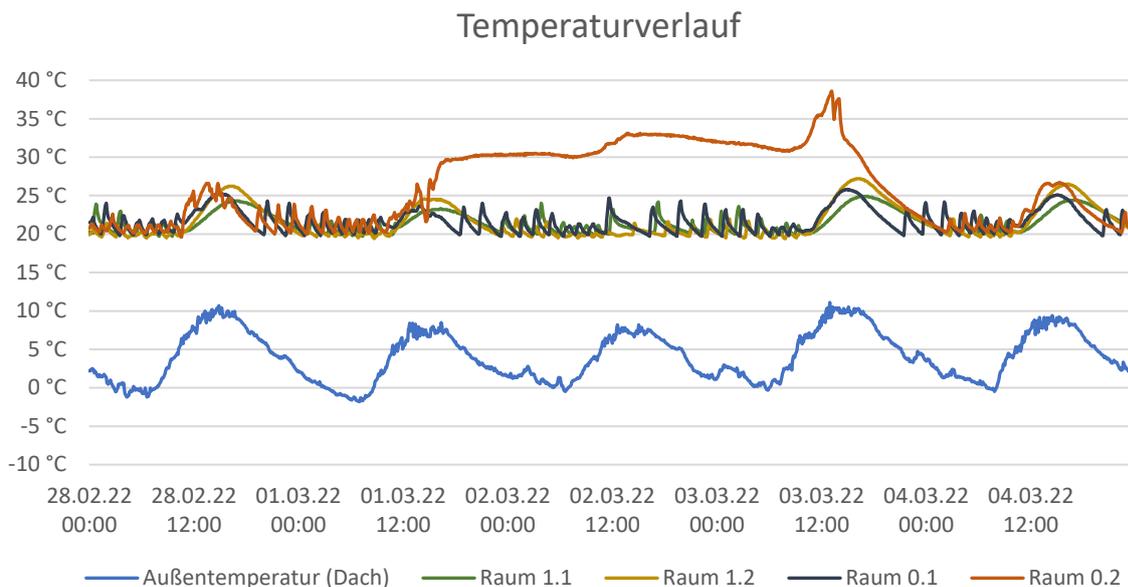


Abb. 66: Darstellung der Entwicklung der Innenraumtemperaturen des mit dem LED-System belegten Raumes (0.2) und dem Referenzraum ohne LED-System (0.1) vom 28.02.22 bis 04.03.22

7.4.2 Installation und Inbetriebnahme

Gebäudeanschluss der Fassadenelemente in Modulbauweise

Unter Berücksichtigung der im Fassadenbau üblichen Standards für modulare Systeme wurde die Konstruktion des Gebäudeanschlusses exemplarisch für das neuentwickelte Membranfassadenmodul für die Anwendung am Demonstratorhochhaus des SFB1244 erstellt. Der Anschluss des Fassadenmoduls an die Tragstruktur des Gebäudes wurde als hängend gewählt. Dabei sind die oberen beiden Eckpunkte des Fassadenmoduls unverschieblich in vertikaler Richtung an das Gebäude angeschlossen. Die unteren

beiden Eckpunkte sind ausschließlich gegen Horizontalverschiebungen gehalten und in vertikaler Richtung frei hängend ausgeführt.

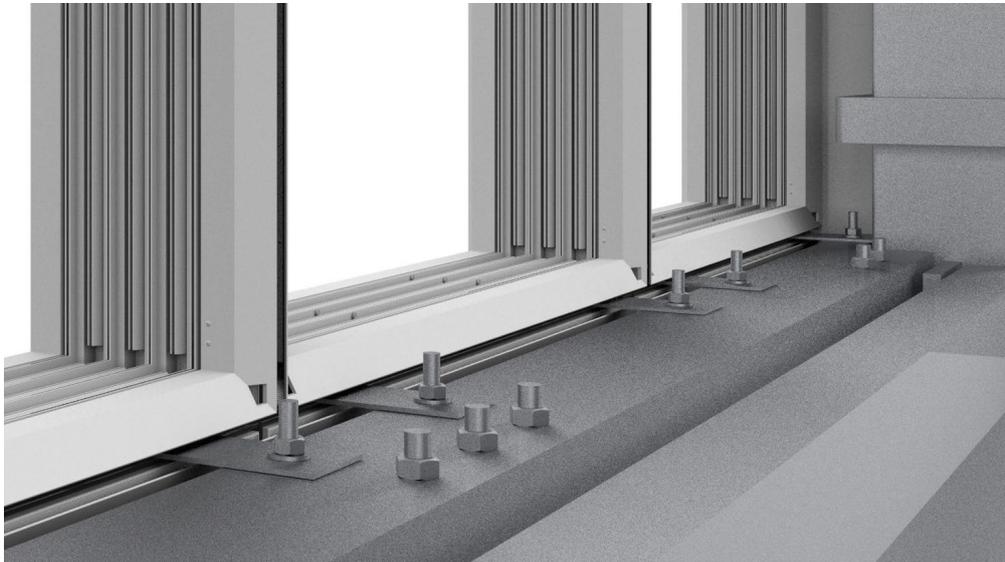


Abb. 67: Rendering des unteren Anschlusses der Fassade mit dem Profilsystem „Commodus“ an die Tragstruktur des Demonstratorhochhauses [14]

Auswahl der Messtechnik

Das Konzept des Monitorings zur Evaluierung der adaptiven Membranfassadenmodule gliedert sich in drei Bereiche. Diese werden nachfolgend als die Makro-, die Meso- und die Mikroebenen bezeichnet. Auf der Makroebene werden globale Informationen über die Umgebungsbedingungen des Demonstratorhochhauses erhoben. Hierzu zählt die Global- und Direktstrahlung, die Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität, die Temperatur, die relative Luftfeuchte, der Luftdruck, die Windrichtung sowie die Windgeschwindigkeit. Für die Messung dieser Kenngrößen kommt die Wetterstation WS500 der Firma G. Luft Mess- und Regeltechnik GmbH, das Pluvio² (Regenmesser / Niederschlagsmesser) der Firma OTT HydroMet, sowie der Solys 2 (Sun Tracker), das CHP1 (Pyrheliometer) und das CMP11 (Pyranometer) der Firma KIPP&ZONEN zum Einsatz.



Abb. 68: Globale Messtechnik zur Ermittlung der Außenbedingungen (Makroebene)

Auf der Mesoebene (Abb. 69) werden die Innenraumbedingungen erfasst. Dies geschieht durch eine gezielte Verteilung von Helligkeits-(Lux-)sensoren, Feuchtesensoren, Thermoelementen zur Temperaturmessung sowie Pyranometer im Raum. Ebenfalls zur Mesomessebene gehören Außenpyranometer in der Fassadenebene zur Bestimmung der solaren Einstrahlung auf die Fassade.

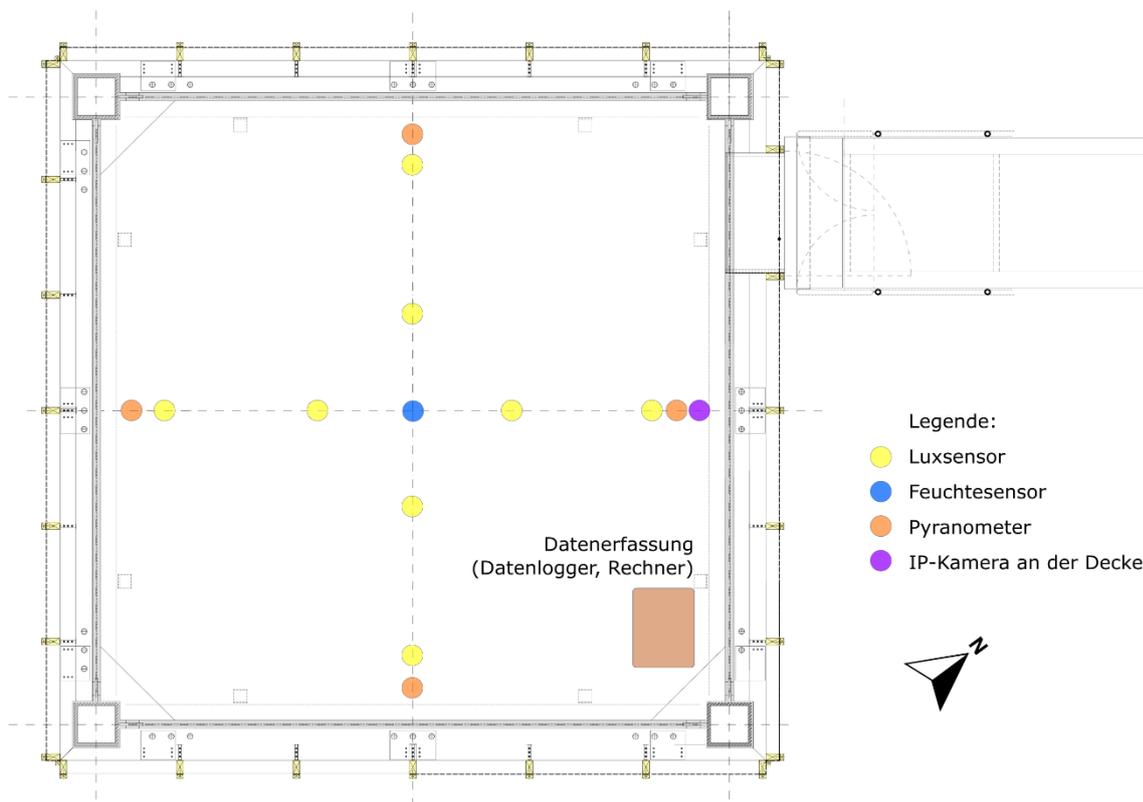


Abb. 69: Übersicht der Platzierung der Sensorik für das Rauminnere (Mesoebene)

Unter der Mikroebene ist das Monitoring direkt an den adaptiven Membranfassaden zu verstehen. Abhängig vom Lagenaufbau sind drei bis fünf Temperatur- und Feuchtesensoren über die Tiefe des Lagenaufbaus vorgesehen. Diese Sensoren befinden sich sowohl auf der Innen- und Außenseite sowie auf den Zwischenlagen ausgewählter Hüllaufbauten. Dies ermöglicht die Erfassung des Temperaturprofils im Textilaufbau sowie die Ermittlung der relativen Luftfeuchte im Textil und der damit verbundenen Bestimmung des Taupunktes. Zudem werden an ausgewählten Hüllaufbauten die Wärmeströme mittels im Lagenaufbau integrierter Wärmeflussplatten ermittelt.



Abb. 70: Lokale Messtechnik für die Ermittlung des individuellen Verhaltens der adaptiven Membranmodule (Mikroebene)

7.4.3 Messdatenauswertung und Optimierung der Betriebsweise

Messdatenerfassung

Die Messdatenerfassung der Makroebene konnte bereits beginnen, jedoch war es nicht möglich die entwickelten adaptiven Fassadenmodule im vorgesehenen Demonstratorhochhaus einzubauen sowie zu untersuchen. Alle nötigen Vorarbeiten für den Einbau sind jedoch bereits durchgeführt worden, damit die

entwickelten Fassadenelemente mit der jeweiligen sensorischen Ausstattung direkt nach dem Einbau vermessen werden können.

Zur strukturierten Datenerfassung, -bereitstellung und Visualisierung wurde ein individuelles Monitoring-Konzept inklusive der notwendigen Software entwickelt. Dieses sieht vor, dass unabhängig vom Datenloggersystem, die Daten zentral in einer SQL-Datenbank gesichert werden. Im Falle von industriellen Datenerfassungssystemen geschieht dies einheitlich über das SCPI-Protokoll (Standard Commands for Programmable Instruments). Dabei handelt es sich um einen Industriestandard, welcher bei den meisten industriellen Messgeräten zur Verfügung steht. Dieser ermöglicht es, ohne spezielle proprietäre Software, die Datenlogger über eine Ethernet- oder USB-Schnittstelle zu steuern. Weitere Datenerfassungseinheiten, welche eine individuelle Programmierung von Microcontrollern erfordern (z. B. Arduino-Boards), werden mit einer eigens entwickelten Firmware ausgestattet, welche über eine serielle Schnittstelle die Steuerung der Messwertabfrage ermöglicht. Durch die zentrale Steuerung aller Datenerfassungssysteme können die Daten weiterführend über die Datenpipelines in eine einheitliche SQL-Datenbank gesichert werden (Abb. 71).

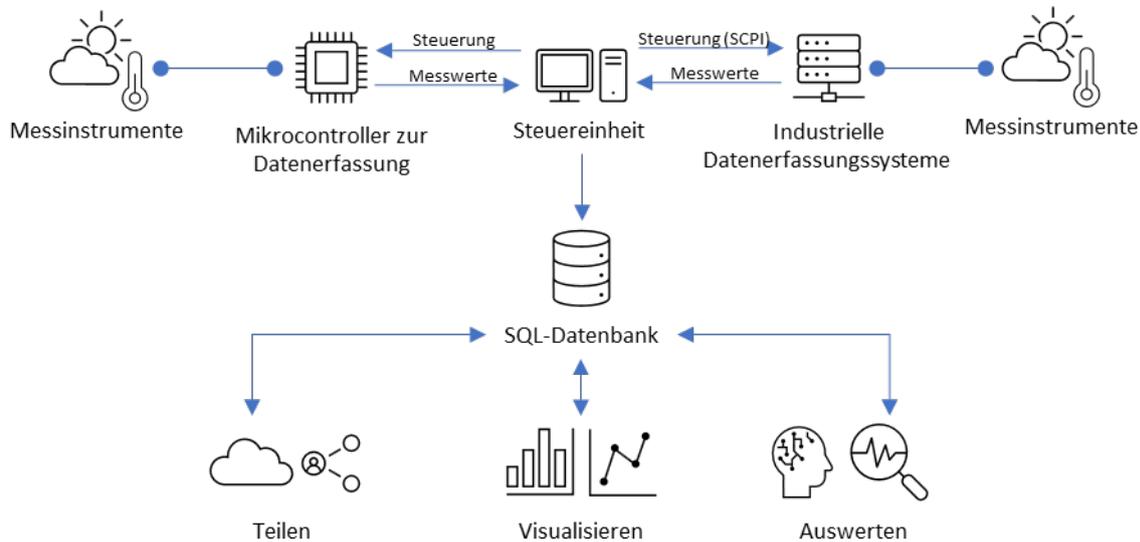


Abb. 71: Schematischer Aufbau der entwickelten Datenerfassung

8 Zusammenfassung und Ergebnisverwertung

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden zahlreiche Einzellagen untersucht sowie Varianten für Hüllaufbauten entwickelt und wärmetechnisch vermessen. Es stehen somit transluzente wie auch opake ultraleichte Fassadenaufbauten mit entsprechenden wärmetechnischen Spezifikationen für den praktischen Einsatz zur Verfügung. Es erfolgte zudem die Entwicklung dreier Profilsysteme, die in statischer wie auch thermodynamischer Hinsicht untersucht und bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit nachgewiesen wurden. Diese Profilsysteme sind geeignet zur Aufnahme der entwickelten Hüllsysteme in der Anwendung als Modul- oder als Pfosten-Riegel-Fassaden. Hergestellt wurden mehr als zehn Varianten der Hüllaufbauten für die wärmetechnische Vermessung im Heizkasten mit den Abmessungen von 1,23 m x 1,23 m. Die Evaluierung der textilen und folienbasierten Fassadenmodule im Einsatz an einem Stockwerk des Demonstratorhochhauses des SFB1244 auf dem Campus der Universität Stuttgart ist vorgesehen und wird auf der Basis eines intensiven, mindestens einjährigen Monitorings Aufschluss geben über die Eigenschaften der textilen Hüllen unter transienten Umwelteinflüssen.

Als weiterführende Forschungsthematik wird eine Vereinfachung der Verbindungstechnik der einzelnen Profilssegmente des Modulprofils gesehen. Zudem werden sich aus dem Langzeitmonitoring sicherlich

einige Ansätze zur Optimierung der Hüllaufbauten ergeben. Aufgrund der geringeren thermischen Masse der textilen Hüllaufbauten reagieren diese wesentlich dynamischer auf Veränderungen des Außenklimas. Daher wird auch die Entwicklung von Steuerungs- und Regelungskonzepten für den Betrieb der Gebäudetechnik bei Bauten mit textilen Mehrlagenhüllen eine zukünftige Forschungsthematik darstellen.

Die Entwicklung der adaptiven Membranfassadenmodule erfolgte von Beginn an in enger Abstimmung mit den Partnern aus der Industrie. Neben den jeweiligen Abstimmungen mit einzelnen Partnern wurden zum vertieften Austausch mit allen Unterstützern zwei Projekttreffen organisiert, welche zahlreich besucht wurden. Neben der Präsentation der aktuellen Entwicklungen bot sich hierbei jeweils die Gelegenheit die Entwürfe der Hüllsysteme, der Ergebnisse der Messungen und Simulationen sowie die Profilentwürfe zu diskutieren.

Eine Einbindung von Studierende in die Forschungsarbeit erfolgte im Rahmen von zwei Seminaren/Entwürfen, die im Wintersemester 2019 und im Sommersemester 2020 durchgeführt wurden. Zudem konnten einige Abschlussarbeiten im Themenfeld der Forschung vergeben und erfolgreich abgeschlossen werden. Für den Entwurf im Sommersemester 2020 konnte eine Kooperation mit der Universität in Metz realisiert werden.

Besonders hervorzuheben sind zudem zwei Veröffentlichungen, welche bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens publiziert wurden. Diese sind nachfolgend aufgeführt.

Publikationen:

C. Eisenbarth, W. Haase, und W. Sobek, Adaptive Membrane Façades, in 14th Conference on Advanced Building Skins, Bern, CH, Okt. 2019, S. 10.

C. Eisenbarth, W. Haase, und W. Sobek, Potentiale adaptiver Membranfassaden - Gebäudehüllen für die gebaute Umwelt von Morgen, in Smart Day 2019 - Lösungen für ein intelligentes Zuhause, Stuttgart, DE, Nov. 2019, S. 21–25.

Literaturverzeichnis

- [1] W. Haase und Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Hrsg., *Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen: mit Anl. 1. Recherchebericht: Beispiele zur konstruktiven Ausführung mehrlagiger gedämmter Membranbauwerke ; Anl. 2. Dokumentation: Simulationstool für mehrlagige Aufbauten.* in Forschungsinitiative Zukunft Bau F, no. 2798. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl, 2011.
- [2] A. Renner, „Die neue Energieeinsparverordnung – EnEV 2014“, in *Bauphysik Kalender 2015*, 1. Aufl., N. A. Fouad, Hrsg., Wiley, 2015, S. 1–32. doi: 10.1002/9783433605158.ch1.
- [3] „DIN 4108-2:2013-02, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden_- Teil_2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1929159.
- [4] „DIN EN ISO 10077-1:2018-01, Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen_- Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten_- Teil_1: Allgemeines (ISO_10077-1:2017); Deutsche Fassung EN_ISO_10077-1:2017“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2705603.
- [5] „DIN 4108-3:2018-10, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden_- Teil_3: Klimabedingter Feuchteschutz_- Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2873064.
- [6] „DIN 4109-1:2018-01, Schallschutz im Hochbau_- Teil_1: Mindestanforderungen“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2764537.
- [7] F. Schmid und Universität Stuttgart, Hrsg., *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: [Abschlussbericht].* in Forschungsinitiative Zukunft Bau F, no. 2948. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2015.
- [8] „DIN 4102-1:1998-05, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen_- Teil_1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/7505142.
- [9] „DIN EN 13501-1:2019-05, Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten_- Teil_1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Deutsche Fassung EN_13501-1:2018“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2870379.
- [10] „Landesrecht BW LBO | Landesnorm Baden-Württemberg | Gesamtausgabe | Landesbauordnung für Baden-Württemberg (LBO) in der Fassung vom 5. März 2010 | gültig ab: 01.03.2010“. Zugegriffen: 21. November 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.landesrecht-bw.de/jportal/?quelle=jlink&query=BauO%20BW&psml=bsbawueprod.psml&max=true&aiz=true>
- [11] „Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des RatesText von Bedeutung für den EWR“, S. 39.
- [12] P. Adamczewski, „Hochhausfassaden aus Membranen“, Technischen Universität Berlin, 2008.
- [13] W. Haase und Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Hrsg., *Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen: mit Anl. 1. Recherchebericht: Beispiele zur konstruktiven Ausführung mehrlagiger gedämmter Membranbauwerke ; Anl. 2. Dokumentation: Simulationstool für mehrlagige Aufbauten.* in Forschungsinitiative Zukunft Bau F, no. 2798. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl, 2011.
- [14] Riedel, L.: *Profilentwicklung für ein adaptives mehrlagiges textiles Fassadensystem, Masterarbeit, 2020.*

- [15] C. Eisenbarth, W. Haase, Y. Klett, L. Blandini, und W. Sobek, „PAOSS : Pneumatically Actuated Origami Sun Shading“, *J. Facade Des. Eng.*, Bd. 9, Nr. 1, S. 147–162, Apr. 2021, doi: 10.7480/jfde.2021.1.5535.
- [16] Meagher, M. (2014). *Responsive Architecture and the Problem of Obsolescence*. *Archnet-IJAR International Journal of Architectural Research*, 8(3), S. 95–104.
- [17] Blandini, L., & Grasmug, W. (2018). *The search for dematerialised building envelopes – the role of glass and steel*. *Steel Construction*, 11, S. 140–145.
- [18] Blandini, L. (2020). *Glasfassaden: Neue Herausforderungen und Entwicklungsmöglichkeiten im 21. Jahrhundert*. *Glasbau, Ernst & Sohn*, S. 93–101.
- [19] Magli, S., Lodi, C., Lombroso, L., Muscio A., & Teggi S. (2015). *Analysis of the urban heat island effects on building energy consumption*. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 6(1), S. 91–99.
- [20] Knaack, U., Koenders, E., Alexandrakis, E., Bewersdorff, D., Haake, I., Hickert, S., & Mankel, C. (2018). *Bauphysik der Fassade - Prinzipien der Konstruktion*, Birkhäuser, S. 135.
- [21] Haas-Arndt, D., & Ranft, F. (2007). *Tageslichttechnik in Gebäuden*. Müller (C.F.), Heidelberg.
- [22] Hammer, R., & Wambsganß, M. (2020). *Planen mit Tageslicht - Grundlagen für die Praxis*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [23] Blaser, W. (1999). *Werner Sobek, art of engineering*. *Ingenieur-Kunst*, Birkhäuser.
- [24] Haase, W., Klaus, T., Schmid, F., Schmidt, T., Sedlbauer, K., Sobek, W., & Synold, M. (2011). *Adaptive textile und folienbasierte Gebäudehüllen*. *Bautechnik*, 88(2), S. 69–75.
- [25] Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., & Auer, T. (2007). *Fassaden - Prinzipien der Konstruktion*. Birkhäuser.
- [26] Sobek, W., Haase, W., & Teuffel, P. (2000). *Adaptive Systeme*. *Stahlbau*, 69, S. 544–555.
- [27] Zapala, E. (2018). *Faltstrukturen in der textilen Gebäudehülle: Eine Erweiterung tradierter Entwurfsgrundlagen unter Berücksichtigung schall- und lichttechnischer Aspekte*. *Dissertation, Universität Stuttgart*.
- [28] Sobek, W., Morgan, C. L., Bogdan, I. (2004). *Poetry—Rotating umbrellas. Show me the future: Engineering and design by Werner Sobek*, S. 50–51.
- [29] Arya, M., Warwick, S., Webb, D., Lisman, D., Shaklan, S., Bradford, S., Steeves, J., Hilgemann, E., Trease, B., Thomson, M., Freebury, G., McGown, J., & Gull, J. (2017). *Starshade mechanical design for the Habitable Exoplanet imaging mission concept (HabEx)*, *Proceedings Vol. 10400, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets VIII, SPIE Optical Engineering + Applications*, 2017, San Diego.
- [30] Sigel, D., Trease, B. P., Thomson, M. W., Webb, D. R., Willis, P., & Lisman, P. D. (2014). *Application of Origami in Starshade Spacecraft Blanket Design*. *ASME 2014 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (DETC)*.
- [31] Sobek, W., Speth, M. (1993). *Von der Faser zum Gewebe*. *Textile Werkstoffe im Bauwesen*. *db Deutsche Bauzeitung*, 127, S. 74–81.
- [32] Bender, A.-L.. *Weiterentwicklung und Optimierung einer adaptiven, textilbasierten Faltstruktur zum selektiven Sonnen- und Blendschutz*. *Masterarbeit, Universität Stuttgart*, 2020.
- [33] *DIN EN 410*. (2011). *Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen*.

- [34] DIN EN 14500. (2018). *Abschlüsse - Thermischer und visueller Komfort - Prüf- und Berechnungsverfahren*.
- [35] Fahrenwaldt, H. J., Schuler, V., & Twrdek, J. (2014). *Thermisches Trennen. Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 241–263.
- [36] Gries, T., Veit, D., & Wulfhorst, B. (2014). *Textile Fertigungsverfahren: eine Einführung*. Carl Hanser, München.
- [37] Lütke, M., Klotzbach, A., Wetzig, A., & Beyer, E. (2009). *Laserschneiden von Faserverbundwerkstoffen*. *Laser Technik Journal*, 6, S. 23–26.
- [38] Machova, K., Zschetzsche, J., Füssel, U., Friedrich, C., Riedel, M., Schuster, H., & Rückert, R. (2011). *Innovatives Schneiden technischer Textilien mittels Plasmastrahl*. *Schweissen und Schneiden*, 63(10), S. 599–603.
- [39] Deleersnyder, K., & Ruys, L. (2015). *3D-Druck auf Textilien*. *Textilplus*, 07/08, p. 23–25.
- [40] Gries, T., & Klopp, K. (2007). *Füge- und Oberflächentechnologien für Textilien: Verfahren und Anwendungen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [41] Eisenbarth, C., Haase, W., & Sobek, W. (2019). *Adaptive membrane façades*. *14th International Conference on Advanced Building Skins, Bern*.
- [42] Bolay, J.: *Entwicklung adaptiver textiler Fassadenmodule, Masterarbeit, 2020*.
- [43] „DIN EN 12179:2000-09, Vorhangfassaden_ - Widerstand gegen Windlast_ - Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN_12179:2000“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/8512061.
- [44] Du, H.: *Simulative Untersuchung des wärmetechnischen Verhaltens von Rahmenprofilen adaptiver textiler Fassadensysteme, Masterarbeit, 2022*.
- [45] K. Zhu, „Numerische Untersuchungen des wärmetechnischen Verhaltens von Rahmenprofilen adaptiver textiler Fassadensysteme“.
- [46] Aboul Seoud, I.: *Untersuchung und Vermessung bauphysikalischer Funktionslagen für mehrlagige textile Gebäudehüllen, Masterarbeit, 2021*.
- [47] Alomar, H.: *Untersuchung und Vermessung bauphysikalischer Funktionslagen für mehrlagige textile Gebäudehüllen, Masterarbeit, 2022*.
- [48] Cai, Z.: *Messtechnische Untersuchungen an Membranfassaden-Systemen zur Bewertung des Wärmedurchgangs, Masterarbeit, 2023*.
- [49] Pfeil, C.: *Untersuchungen zur thermischen Bewertbarkeit mehrlagiger Membranhüllen für modulare Hochhausfassaden, Bachelorarbeit, 2017*.
- [50] Baur, T.: *Untersuchungen zur thermischen Bewertbarkeit von mehrlagigen transluzenten und opaken Leichtbaugebäudehüllen, Bachelorarbeit, 2016*.