

Schlussbericht zum Vorhaben

Thema:

**Verbundvorhaben: Fassadenladen - Hochtechnologie mit bio-
genen Werkstoffen - Ein universeller Baukasten als Neuinterpre-
tation des Fensterladens (FabiOW)**

Teilvorhaben 1: wiss. Begleitung, Koordinierung (THN)

Teilvorhaben 2: Werkstoffprüfung (FAU-LKT)

Teilvorhaben 3: Bauphysikalische Bewertung (Fh-IBP)

Teilvorhaben 4: Materialentwicklung (TECNARO)

Teilvorhaben 5: Prototyp (Joma-Polytec)

Teilvorhaben 6: Produktbezogene Untersuchungen (ROMA KG)

Zuwendungsempfänger:

**Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
(Projektleitung), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-
Nürnberg / Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Fraunhofer-Institut
für Bauphysik (IBP), TECNARO Gesellschaft zur industriellen
Anwendung nachwachsender Rohstoffe mbH, Joma-Polytec
GmbH, ROMA KG**

Förderkennzeichen

22031012, 22013515, 22013615, 22013815, 22013915, 22013715

Laufzeit:

01.02.2016 – 31.07.2018

Monat der Erstellung:

Nürnberg, Dezember 2018

(THN-AR)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Verbundvorhaben: Fassadenladen - Hochtechnologie mit biogenen Werkstoffen - Ein universeller Baukasten als Neuinterpretation des Fensterladens (FabiW)

Teilvorhaben 1: wissenschaftliche Begleitung, Koordinierung (THN)

Teilvorhaben 2: Werkstoffprüfung (FAU-LKT)

Teilvorhaben 3: Bauphysikalische Bewertung (Fh-IBP)

Teilvorhaben 4: Materialentwicklung (TECNARO)

Teilvorhaben 5: Prototyp (Joma-Polytec)

Teilvorhaben 6: Produktbezogene Untersuchungen (ROMA KG)

Zuwendungsempfänger:

Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (Projektleitung), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg / Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), TECNARO Gesellschaft zur industriellen Anwendung nachwachsender Rohstoffe mbH, Joma-Polytec GmbH, ROMA KG

Förderkennzeichen:

22031012, 22013515, 22013615, 22013815, 22013915, 22013715

Laufzeit:

01.02.2016-31.07.2018

Monat der Erstellung:

08/2019

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Projektpartner / Bearbeiter

FabioW
Vorspann

Teilvorhaben 1: wissenschaftliche Begleitung, Koordinierung (THN) Förderkennzeichen: 22031012

- Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Fakultät Architektur (THN-AR)
Prof. Dr.-Ing. Roland Krippner (Projektleitung), Ing. M.A. Architekt Marcel Neberich
Dr.-Ing. Peter Bonfig, München
- Fakultät Bauingenieurwesen (THN-BI)
Prof. Dr.-Ing. Eric Simon, Dr.-Ing. Ute Keßner, Simon Thomas B.Sc.
- Fakultät Betriebswirtschaft (THN-BW)
Prof. Dr. Ralph Blum, Laura Roos
- Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik / Institut für Energie und Gebäude - ieg
(THN-MB-VS/ieg)
Prof. Dr. Wolfram Stephan, Dipl.-Ing. (FH) Mario Franz

Teilvorhaben 2: Werkstoffprüfung (FAU-LKT) Förderkennzeichen: 22013515

- Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT), Department Maschinenbau,
Technische Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Dipl.-Ing. Katharina Kurth

Teilvorhaben 3: Bauphysikalische Bewertung (Fh-IBP) Förderkennzeichen: 22013615

- Fraunhofer-Institut für Bauphysik / Standort Holzkirchen / Abteilung Energiesysteme (Fh-IBP)
Dipl.-Ing. Almuth Schade

Teilvorhaben 4: Materialentwicklung (TECNARO) Förderkennzeichen: 22013815

- TECNARO GmbH (74360 Ilsfeld-Auenstein)
Dr. rer.nat. Michael Schweizer

Teilvorhaben 5: Prototyp (Joma-Polytec) Förderkennzeichen: 22013915

- Joma-Polytec GmbH (72411 Bodelshausen)
M.Sc. Matthias Berndorfer, Wolfgang Wölki

Teilvorhaben 6: Produktbezogene Untersuchungen (ROMA KG) Förderkennzeichen: 22013715

- ROMA KG (89331 Burgau)
Christian Täumler, Christian Könitzer

Inhaltsverzeichnis

FabioW
Vorspann

I Ziele

1	Aufgabenstellung	4
1.1	Gesamtziel des Vorhabens.....	4
1.2	Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen	4
1.3	Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens	4
2	Stand der Technik.....	6
2.1	Adaptive Gebäudehüllen	7
2.2	Bionisch inspirierte Ansätze für adaptive Fassaden und Smart Materials.....	7
2.3	Biogene Kunststoffe und Komposite in der Gebäudehülle	7
2.4	Beanspruchungen von Baukonstruktionen / Simulationsprogramme	8
3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8

A Erzielte Ergebnisse

1	Material	9
1.1	Anforderungsprofil	9
1.2	Materialcharakterisierung potentieller Grundmaterialien	12
1.3	Materialentwicklung und -charakterisierung	14
1.4	Fertigung der Extrusionsprofile.....	22
1.5	Profilcharakterisierung (R 1.2.3).....	25
2	Baukomponente „Fassadenladen“	30
2.1	Profilentwicklung	30
2.2	Anordnungsstrategie.....	33
2.3	Leistungscharakteristik	36
2.4	Funktionsmodelle.....	41
2.5	Weitere Funktionsmodelle	44
2.6	Schnittstellen zum Gebäude.....	46
2.7	Statische Vorbemessungen.....	50
3	Simulation	58
3.1	Modellerstellung.....	58
3.2	Bewertung der energie- und lichttechnischen Kennwerte	66
3.3	Temperaturmessungen am Demonstrator.....	73
4	Bemessung	78
4.1	Untersuchung zum Leistungsprofil und zu Kennwerten der Funktionsmodelle	79

4.2	Goniophotometer	80	FabioW Vorspann
4.3	Kalorimetrischer Fassaden- und Dachprüfstand	82	
4.4	Zusammenstellung der Kennwerte (Tab. 26)	84	
5	Marktanalysen – Marktpotenzial	89	
5.1	Deduktive Herleitung – Bestimmung des Bedarfs im BuV-Markt	89	
5.2	Zusammenführung der Ergebnisse	94	
5.3	Fehlersensitivitätsanalyse.....	95	
5.4	Planung und Durchführung eines Konzepttests zur Messung der Marktakzeptanz: Motivation, Ausgangssituation und Aufgabenstellung	98	
Anhang.....		107	
B Verwertung			
C Erkenntnisse von Dritten			
D Veröffentlichungen			
A1 Teilvorhaben 1: wissenschaftliche Begleitung, Koordinierung (THN) Förderkennzeichen: 22031012			
A2 Teilvorhaben 2: Werkstoffprüfung (FAU-LKT) Förderkennzeichen: 22013515			
A3 Teilvorhaben 3: Bauphysikalische Bewertung (Fh-IBP) Förderkennzeichen: 22013615			
A4 Teilvorhaben 4: Materialentwicklung (TECNARO) Förderkennzeichen: 22013815			
A5 Teilvorhaben 5: Prototyp (Joma-Polytec) Förderkennzeichen: 22013915			

I Ziele

1 Aufgabenstellung

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Der Fensterladen als universale, weit verbreitete und tradierte Fassadenkomponente 'adaptiver' Lösungen soll mit aktueller und nachhaltiger Hochtechnologie neu interpretiert werden. Angestrebt ist ein industriell gefertigtes Produkt als modulares Baukastensystem, das für den Gebäudebestand und auch für Neubaumaßnahmen (Wohnungs- und Bürogebäude) Lösungen bereitstellt. Für die neue Version der tradierten Baukomponente wird der Begriff Fassadenladen eingeführt. Die mannigfaltigen zukunftsweisenden Werkstoffe biogenen Ursprungs sollen für diese Aufgabe diskutiert und herangezogen werden.

Im Gegensatz zu Holzwerkstoffen sind biogene Werkstoffe auch in lichtdurchlässigen Varianten verfügbar. Damit können grundsätzlich die gestiegenen Anforderungen an eine effiziente Tageslichtnutzung besser erfüllt werden. Durch die Herstellungs- und Verarbeitungstechniken (z.B. Extrusion), die Thermoplaste bereitstellen, ergeben sich im Vergleich zu tradierten Fensterläden aus Holz erweiterte technische Merkmale.

Der Fassadenladen soll besonders den vertikal zonierte unterschiedlichen Funktionen wie Sonnenschutz und gute Tageslichtnutzung, Sichtkontakt nach draußen, Zuluft-/Abluftöffnungen in effizienter Weise gerecht werden. Es können diverse Werkstoffe biogenen Ursprungs, auch in Kombination, zum Einsatz kommen. Exponiert vor der Fassade angeordnet steht die Eignung der biogenen Werkstoffe im Kontext üblicher Bauvorschriften (z.B. Brandverhalten) auf dem Prüfstand.

Es ist davon auszugehen, dass mit den erfolgreich getesteten biogenen Werkstoffen des Fassadenladen-Baukastensystems sich auch andere Flächenbauteile der Gebäudehülle herstellen lassen. Dadurch würde das Marktpotenzial enorm erweitert und der Anteil an nachwachsenden Rohstoffen im Bauwesen zusätzlich erhöht.

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

FabioW ist ein anwendungsbezogenes Forschungs-, und Entwicklungsprojekt. Das interdisziplinäre Verbundvorhaben, dass im Förderprogramm Nachwachsend Rohstoffe eingereicht wurde, erfüllt die förderpolitischen Ziele des Programms in dem es

- einen Beitrag für eine nachhaltige Rohstoffbereitstellung leistet
- die Umwelt besonders durch umweltverträgliche Produkte und CO₂-Emissionsverminderung entlastet
- weitere Verwendungsmöglichkeiten nachwachsender Rohstoffe im Nichtnahrungsmittelsektor erschließt
- die Möglichkeiten des Einsatzes von biogenen Kunststoffen im Außenbereich unterstreicht und so ein neues Bewusstsein in der Öffentlichkeit für das Potenzial und den technischen Stand dieser Werkstoffe schafft

1.3 Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens

Seit Jahrhunderten ist der Fensterladen ein wichtiges Element zum Schutz und zur Regulierung von Gebäudeöffnungen und kennt vielfältige Umsetzungen vorwiegend mit traditionellen nachwachsenden Rohstoffen. Dieser wird als Drehflügel, Schiebe- oder Faltelement in vielen Ausprägungen mit unterschiedlicher Gewichtung der Funktionen und daraus resultierenden Anforderungen eingesetzt. In fast allen Fällen bedecken die Läden temporär Gebäudeöffnungen, um Sonnenschutz, Sichtschutz, Einbruchschutz und auch besseren bedarfsangepassten Wärmeschutz zu gewährleisten. Neben plattenartigen Flächen bestehen die meisten Varianten aus Rahmen mit Füllungen aus starren oder auch beweglichen Profilen.

Diese sind so angeordnet, dass ein gewisser Luftaustausch und Lichteinfall auch im geschlossenen Zustand gewährleistet ist. Auch können Segmente von innen bei geschlossenem Laden ausgeklappt werden, um mehr Lichteinfall, aber vor allem besseren Ausblick zu erzielen. Es sind auch Lösungen mit perforierten Flächen oder lichtdurchlässigen Geweben bekannt, die eine bessere Tageslichtnutzung erlauben. Eine Bedienung bzw. Steuerung des Ladens ist in aller Regel von der Raumseite aus gegeben. Je nach Bewegungsprinzip und Segmentierung des Ladens sind die Apertur der Gebäudeöffnung und somit auch der Einfall solarer Strahlung veränderbar.

Der Gestalt prägende Charakter von Fensterläden für die gesamte Fassade bzw. das Gebäude ist offensichtlich. Rollläden, Markisen und Jalousien werden, die Schwerkraft nutzend, vertikal verfahren, die Öffnung wird schrittweise von oben nach unten bedeckt, was nachteilig für die Tageslichtnutzung ist. Die paketierte Strukturen (z.B. in Rollladenkästen) bedecken zudem oft Bereiche, die für die Tageslichtnutzung am wertvollsten sind. Jalousien sind windempfindlich und spielen ihre Vorteile eigentlich nur in Verbindung mit hohen Sonnenständen (Südfassaden) aus. Bei flachen Sonnenständen muss die Jalousie vollständig geschlossen werden, die Fassade wird 'blind', Sichtkontakte, Tageslichtnutzung und gute Hinterlüftung sind eingeschränkt.

Der Fassadenladen soll besonders den vertikal zonierten unterschiedlichen Funktionen wie Sonnenschutz und gute Tageslichtnutzung, Sichtkontakt nach draußen, Zuluft-/Abluftöffnungen in effizienter Weise gerecht werden. Es können diverse Werkstoffe biogenen Ursprungs, auch in Kombination, zum Einsatz kommen. Exponiert vor der Fassade angeordnet, steht die Eignung der biogenen Werkstoffe im Kontext üblicher Bauvorschriften (z.B. bezüglich Brandverhalten) auf dem Prüfstand. Angestrebt ist ein industriell gefertigtes modulares Baukastensystem, das für den Gebäudebestand und auch für Neubaumaßnahmen (Wohnungs- und Nichtwohnungsgebäude) Lösungen bereitstellt.

In Bezug auf das Bauteil werden insbesondere die folgenden wissenschaftlich-technischen Ziele angestrebt:

- Der 'Fassadenladen' soll einen effektiven Sonnenschutz bei guter Tageslichtnutzung gewährleisten.
- Auch bei geschlossenem Zustand ermöglichen gegen Schlagregen geschützte Öffnungen im Laden eine natürliche Belüftung der Räume, bei Tag und bei Nacht (Nachtauskühlung als Teil des sommerlichen Wärmeschutzes). So kann er die Aufgabe einer 'Prallscheibe' wie bei einer zweischaligen Fassadenlösung erfüllen.
- Der Laden kann im Gegensatz zu üblichen Aluminium-Lamellenjalousien auch bei sehr windigen Witterungslagen seine Aufgaben erfüllen.
- Darüber hinaus kann der Fassadenladen einen wirkungsvollen Beitrag als temporäre Wärmeschutzmaßnahme leisten. Inwieweit die Funktion im Widerspruch zu anderen Funktionen wie z.B. Lüftung steht und diese Eigenschaft die Varianz der möglichen technischen Lösungen einschränkt, muss im Rahmen der Bearbeitung geklärt werden.

Die Tragwerksplanung als Teilprojekt in der Verantwortung der im Vorhaben beteiligten Bauingenieure ist im vorliegenden Fall eine nachgelagerte Untersuchung mit folgenden Zielen:

- Erkenntnisse über die Beanspruchung aus Wind, Schnee, Temperatur und Eis auf die zu erprobenden Konstruktionen.
- Numerische Modellierung der Beanspruchungen und Validierung über entsprechende Versuche.
- Konzeption geeigneter Versuche mit einem wirtschaftlichen Stichprobeneinsatz.
- Berechnung der Beanspruchungen und Beanspruchbarkeit der Konstruktion. Berechnungen der Auswirkungen wie Spannungen, Deformationen, zeitabhängige Verformungen.
- Entwicklung geeigneter Konstruktion mit Gebrauchstauglichkeitsnachweisen.
- Einsatz von geeigneten Profilen als Grundeinheiten für die Konstruktion.

Die Beurteilung von Fassadensystem im Rahmen einer integralen Planung erfolgt im Allgemeinen durch Simulationsstudien. Solche Methoden werden an der THN (Institut für Energie und Gebäude, Prof. Stephan, Energiecampus Nürnberg, Prof. Dentel) seit Jahren erfolgreich eingesetzt und weiterentwickelt.

Fassaden werden u.a. durch technische Kennwerte bzgl. des Energiedurchgangs (U-Wert, g-Wert) des Lichtdurchganges (Tageslichtverhältnis) und der Lüftungsquerschnitte (effektive Fläche) beurteilt. Nicht nur die Einzelkennwerte, die im Laborversuch und durch Detailsimulationen ermittelt werden können, sondern die erzielbaren thermischen, lichttechnischen und lufttechnischen Bedingungen in den an die Fassaden angrenzenden Zonen beeinflussen maßgeblich den Erfolg von neuen Fassadensystemen.

In Bezug auf den Werkstoff werden insbesondere die folgenden wissenschaftlichen Ziele angestrebt:

- Recherche, Bewertung und Auswahl von für den Fassadenladen potentiell geeigneten biogenen Werkstoffsystemen sowie kunststoffgerechte Konzeption und Entwicklung von Fassadenladen-Funktionsmodellen
- Charakterisierung der anwendungs- und verarbeitungsrelevanten Eigenschaften neu entwickelter biogener Werkstoffe, um diese optimieren und erfolgreich für den Fassadenladen und weitere Produkte anwenden zu können
- Anwendungsnahe Prüfung und Charakterisierung von Fassadenladen-Funktionsmodellen zur Bewertung des Einsatzpotentials
- Ableitung von Wirkzusammenhängen zwischen Werkstoff, Verarbeitung und anwendungsrelevanten Bauteileigenschaften, um grundlegende, allgemeingültige Erkenntnisse zu erlangen
- Analyse der Verarbeitbarkeit biogener Werkstoffe, um die Möglichkeiten einer serienmäßigen Produktion mittels Extrusion sicherzustellen

Dabei tritt die Joma-Polytec GmbH als Entwickler und Lieferant des Extrusionswerkzeuges sowie der extrudierten Profile für den Fassadenladen auf. Dazu soll in einer Studie, zusammen mit dem Materiallieferanten TECNARO GmbH eine geeignete Kunststoffmischung, welche auf nachwachsenden Rohstoffen basiert, gefunden werden. Hierzu bekommt die Joma-Polytec GmbH von der TECNARO GmbH eine auf den Untersuchungen des LKT beruhende Vorauswahl von möglichen Mischungen, um diese unter Produktionsbedingungen auf einer Extrusionslinie im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit zu testen. Hauptaufgabe wird dann das Entwerfen und Fertigen eines Extrusionswerkzeuges und der Kalibriereinheit sein sowie die Verfahrensentwicklung zur Produktion der Kunststoffprofile, mit welchen in einem weiteren Schritt die Funktionsmodelle des Fassadenladens hergestellt werden.

Ferner sollen mit der Erarbeitung von Nutzungs- und Anforderungsprofilen unterschiedlicher Zielgruppen, künftige Absatzmärkte in geeigneter Weise segmentiert und die Marktpotentiale bestimmt werden. Marktpotentiale, die erfahrungsgemäß hohen Unsicherheiten unterliegen können, sollen sowohl mit deduktiven als auch induktiven Methoden bestimmt werden, wobei die entsprechende Ansätze für das Fassadenladenkonzept im Rahmen des Projektes zu entwickeln sind.

2 Stand der Technik

Im Vorfeld der Erarbeitung der Projektskizze wurden umfangreiche Recherchen zum Stand der Wissenschaft und Technik in beiden Forschungsgebieten von Dr.-Ing. Peter Bonfig durchgeführt. Der Bearbeiter befasst sich seit einigen Jahren mit dieser Thematik, die 2007 an der Technischen Universität München zu der Dissertationsschrift 'Wirkungsprinzipien von beweglichen Fassadenteilen aus nachwachsenden Rohstoffen' geführt hat. Die Arbeit behandelt Strategien, mit denen die Durchlässigkeit der Fassade für Strahlung, Schall und Stoffströme an wechselnde Außenbedingungen angepasst werden kann. Die Aktualisierung des Wissensstandes beruht auf Literatur-, Patent- und Internetrecherchen und dem Besuch

von Symposien sowie der R+T 'Weltleitmesse für Rollläden, Tore und Sonnenschutz'. Darüber hinaus wurden Gespräche mit maßgeblichen Akteuren geführt, die zurzeit im Bereich der veränderbaren Gebäudehülle forschen.

FabioW
Ziele

2.1 Adaptive Gebäudehüllen

Die Rolle von Gebäudehüllen, die sich an wechselnde Außenbedingungen anpassen können, hat im Kontext nachhaltiger und energieeffizienter Gebäudekonzepte in den letzten zwei Jahrzehnten enorm an Bedeutung gewonnen. Bei den für Fassadenbauteile aktuell verwendeten Materialien, ob der Witterung ausgesetzt oder nicht, spielen mit Ausnahme von Holz nachwachsende Rohstoffe eine eher untergeordnete Rolle. Es dominieren Glas, Faser-verbund- und mineralische Werkstoffe, Metalle sowie konventionelle Kunststoffe.

Dies steht im Widerspruch dazu, dass bewegliche Fassadenteile aus nachwachsenden Rohstoffen in einer langen Bautradition stehen, in der man es verstanden hat, mit lokalen Baumaterialien und meist einfachen Konstruktionen den Anforderungen des Klimas an die Gebäudehülle gerecht zu werden. Auch haben sich technisch wie funktional komplexe Systeme herausgebildet, bei denen unterschiedliche Einzelfunktionen wie z.B. Tageslichtnutzung, Sonnenschutz, Lüftung oder Einbruchschutz auf mehrere Bauteile in teils verschiedenen Ebenen und Anordnungen verteilt sind.

Nachfolgend einige Beispiele zu den recherchierten unterschiedlichen Strategien im FuE-Arbeitsfeld der adaptiven Gebäudehülle. Adaption mittels geometrischer und kinematischer Wirkprinzipien: Innovative Entwicklungen zu allen gängigen Strukturen (z.B. Lamellen, Stabstrukturen, perforierte Flächen, Prismen etc.):

Einsatz von Folien (beschichtet, bedruckt), auch in mehreren Ebenen angeordnet.

Weiterentwicklung von lamellenartigen Strukturen als Gravuren in Glasplatten und als neuartige bionisch inspirierte kinematische Lösungen wie Flectofin®

Bewegliche, selbst regelnde Systeme im Scheibenzwischenraum von Mehrscheibenisoler- verglasungen, z.B. mit verspiegelten Lamellen, oder mittels Glaszylinderstäben zur Sonnenlichtbündelung oder mittels Mikroprismen

2.2 Bionisch inspirierte Ansätze für adaptive Fassaden und Smart Materials

Eine ganze Gruppe von Architekten, die allesamt im Umfeld von Prof. Stefan Behling gearbeitet haben, befasst sich mit bionisch inspirierten anpassungsfähigen Gebäudehüllen. Zu nennen ist die Dissertation von Dirk Henning Braun¹ und die Entwicklung 'Flectofin®'². Auch die Grundlagenstudie 'BioSkin'³ sucht nach einer Zusammenführung von Bionik und Fassadentechnologien.

In den neunziger Jahren kamen mit dem Stichwort 'Intelligente Fassade' selbstregelnde Funktionsschichten für Glasprodukte ins Gespräch. In der Zwischenzeit gibt es konkrete prototypische Anwendungen, auch sind erste Produkte auf dem Markt. Es werden diverse Ansätze verfolgt, wobei unterschiedliche Auslöser für die reversiblen physikalisch strukturellen Veränderungen der Komponenten in Frage kommen.

Schaltbare Verglasungen auf der Basis von Flüssigkristallen werden aktuell vom Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) an der Universität Stuttgart entwickelt.

2.3 Biogene Kunststoffe und Komposite in der Gebäudehülle

Seit 2000 befasst sich die Forschungsgruppe des Instituts für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart mit dem materialgerechten Design von Kunststoffen und Kompositen in der Architektur. Gemeinsam mit der TECNARO GmbH und

¹ Braun, Dirk Henning: Bionisch inspirierte Gebäudehüllen. Konzeption einer Bionisch inspirierten Gebäudehülle nach dem Vorbild natürlicher Hüllen und Häute. Stuttgart: Fakultät Architektur und Stadtplanung, 2008

² <http://www.itke.uni-stuttgart.de/forschung.php?id=56> <29.03.2015>

³ <http://www.bionicfacades.net> <29.03.2015>

weiteren Partnern wurden in dem Projekt: Frei formbare Halbzeuge aus vorwiegend nachwachsenden Rohstoffen für die Anwendung in Innen- und Außenräumen (2012-2013) erforscht (Förderprogramm: Europäischer Fond für regionale Entwicklung EFRE)⁴. Das Umformen der dickwandigen Biokunststoffplatten wurde mittels Tiefziehen durchgeführt.⁵ Ferner erfolgten auch erste Untersuchungen zur Witterungsbeständigkeit von biogenen thermoplastischen Werkstoffen. Die Forscher bilanzieren, dass „nach wie vor keine Bauprodukte aus thermoplastischen, biobasierten Kunststoffen auf dem Markt (sind), die hinsichtlich Brandverhalten und Dauerhaftigkeit an die Anforderungen bei Fassadenanwendungen optimiert wurden.“⁶

FabioW
Ziele

Die Joma-Polytec GmbH hat bereits vor einigen Jahren ein Biopolymer der TECNARO GmbH erfolgreich extrudiert, sodass hier bereits erste Erfahrungen im Bereich der Verarbeitung gesammelt werden konnten.

2.4 Beanspruchungen von Baukonstruktionen / Simulationsprogramme

Auf dem Gebiet der Beanspruchungen von Konstruktionen im Bauwesen ist die Wissenschaft weit fortgeschritten, was durch eine Vielzahl von einschlägigen Normen untermauert wird. Bei kleinteiligen Konstruktionen sind die Einwirkungen noch nicht ausreichend erforscht. Zum Beispiel ist das Ausmaß des Eisansatzes an exponierten Konstruktionen nicht genau bekannt. Die Beurteilung von Fassadensystem mittels Simulationsverfahren ist Teil von Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA-ECBCS). International bestehen zahlreiche Datenbanken und anerkannte Verfahren zur Modellierung. Forschungsarbeiten von Prof. Dr. Joachim Stoll (TH Nürnberg) beschreiben die Grundlagen eines „Fenster- und Fassadenmodells“. Dieses ist seit 2009 in die VDI 6007-BI.2 die die Grundlagen zur Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden formuliert, integriert. Einsatz finden diese Ansätze in Thermischen Simulationsprogrammen, wie TRNSYS (nur energie- und strömungstechnische Modelle), EnergyPlus und Dymola/Modelica mit energie-, licht- und strömungstechnischen Modellen.

3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

SKZ - Das Kunststoff-Zentrum / SKZ - Testing GmbH
Friedrich-Bergius-Ring 22
97076 Würzburg

Prüfung der Witterungsbeständigkeit (Farbechtheit und Charpy-Kerbschlagzähigkeit / Allgemeine Xenon-Bewitterungstests (DIN EN ISO 4892-1 und -2, DIN EN 513)) vor und nach 1.000 Stunden künstlicher Bewitterung an biopolymeren Profilmustern (03.05.2018 bis 04.07.2018).⁷

⁴ <http://www.itke.uni-stuttgart.de/forschung.php?id=218> <29.03.2015>

⁵ vgl. Knippers, Jan et al.: Frei formbare Halbzeuge aus vorwiegend nachwachsenden Rohstoffen für die Anwendung in Innen- und Außenräumen. Forschungsbericht. Stuttgart, April/2014, S. 8

⁶ Knippers, Jan et al.: Frei formbare Halbzeuge aus vorwiegend nachwachsenden Rohstoffen für die Anwendung in Innen- und Außenräumen. Abschlussbericht zum Förderprogramm "EFRE Umwelttechnik" des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. (Laufzeit: 20.12.2011 – 30.11.2013). Forschungsbericht. April/2014, S. 42

⁷ Prüfzeugnis Nr. 130244/18, beauftragt durch die ROMA KG/Ludwigshafen, v. 17.07.2018

II Ergebnisse

A Erzielte Ergebnisse

1 Material

1.1 Anforderungsprofil

Es wurden zunächst momentan am Markt verfügbare Biopolymerklassen recherchiert und hinsichtlich Ihrer Eignung als Fassadenladenrohstoff geprüft. Die Baukomponente ist in der Anwendung zahlreichen Belastungen ausgesetzt, die das notwendige Eigenschaftsprofil der eingesetzten Materialien definieren. Im Rahmen des Vorhabens soll das Design der Einzelelemente an die Eigenschaften des Materials angepasst werden, so dass eine feste Definition von Materialkennwerten nicht angestrebt wurde. Nichtsdestotrotz sind essentielle Materialkennwerte identifiziert worden. (Tab. 1) So ist z.B. für Sonnenschutzsysteme und Fassadenelemente eine Temperaturbeständigkeit in der Anwendung bis 80 °C essentiell. Zusätzlich soll eine Anlehnung in definierten Positionen an DIN EN 13659⁸ erfolgen. Für die eingesetzten Werkstoffe in Außenabschlüssen schließt dies vor allem die Vicat Erweichungstemperatur, den E-Modul bei Biegung als auch natürliche bzw. künstliche Alterung ein.

Eigenschaft	Definition	Relevanz
Mechanische Eigenschaften		
Statisch	Ausreichende Steifigkeit und Zugfestigkeit bis 80°C E-Modul bei Biegebelastung E-Modul ≥ 500 MPa	+
Dynamisch	noch nicht definiert	o
Temperaturbeständigkeit		
Glasübergangstemperatur	$T_G > 80$ °C, bzw. ausreichende Steifigkeit und Zugfestigkeit bei $T_{ist} > T_G$	o
Wärmeformbeständigkeit	- - 20 °C – 80 °C nach DIN 18515-1 - Vicat Erweichungstemperatur (DIN 13659)	+
Mechanische Eigenschaften, statisch	ausreichende Steifigkeit und Zugfestigkeit bis 80 °C E-Modul ≥ 500 MPa	+
Zeitstandverhalten	Kriechen bis max. 1/400 - 1/500 der Elementlänge bei folgenden Belastungen. Maximale Belastung für das entwickelte Profil in senkrechter Positionierung: $T_{ist} \geq 55$ °C: 0,18 N/mm ² $T_{ist} \leq 55$ °C: 1 N/mm ²	+
Beständigkeit gegen Umgebungsbedingungen		
UV-Beständigkeit		+
Wasseraufnahme	Hydrolysebeständigkeit	+
	Änderung der mechanischen Eigenschaften durch Wasseraufnahme	+
Meeresluftbeständigkeit		-

⁸ DIN EN 13659 (2015-07) Abschlüsse außen und Außenjalousien – Leistungs- und Sicherheitsanforderungen

Beständigkeit gegen Reinigungsmittel		-	FabioW Ergebnisse Material
Brandschutz			
Flammschutz	DIN 4102, bzw EN 13501 Baustoffklasse B2 – normal entflammbar	+	
Verarbeitung			
Extrudierbarkeit	hohe Schmelzestabilität generell geringer MFI (Melt Flow Index)	+	
Materialverhalten	Schmelze-, Kristallisations- und Zersetzungstemperatur	+	
Optische Eigenschaften			
Reflexion Transmission Abmission	Materialien unterschiedlicher optischer Eigenschaften, vorzugsweise wie folgt: - opak, hell, vorwiegend reflektierend - opak bis mäßig transluzent, mit Anmutung Naturprodukt und ggf. sichtbare Bestandteile wie Fasern - transluzent, soweit wie möglich lichtstreuend	+	
Sonstiges			
Längenausdehnungskoeffizient	Beachtung bei der konstruktiven Auslegung	+	
Nachhaltigkeit	Bauproduktenverordnung ab 01.07.13 - Recyclingfähigkeit, falls die Werkstoffe nicht unproblematisch dem Naturkreislauf wieder zugeführt werden können	o	
Materialpreis		o	

Tab. 1: Materialanforderungen;
+ hohe Relevanz; o mäßige Relevanz; - geringe Relevanz

Die funktionalen Flächen des Fassadenladens sollen mit Kunststoffprofilen belegt werden, welche durch das Verfahren der „freien Extrusion“ hergestellt werden sollen. Das Verfahren der Extrusion ist, im Gegensatz zum Spritzguss, ein Endlosprozess, d.h. der Werkstoff wird kontinuierlich aufgeschmolzen, gefördert und durch die Düse und Kalibrierung geführt. Das erhaltene Profil wird durch eine Abzugseinrichtung mit konstanter Geschwindigkeit geführt und anschließend in beliebiger Länge abgesägt. Diese Verarbeitungstechnik stellt spezielle Anforderungen an das Material, die nachfolgend kurz dargestellt werden.

Der Kunststoff wird dem Extruder in Granulatform zugeführt, aufgeschmolzen und am Ende der Maschine, vereinfacht gesagt, durch eine Matrize gepresst. Es tritt also ein vorgeformter Schmelzestrang aus der Maschine heraus, der Kunststoff ist dabei noch plastisch verformbar und entsprechend nicht formstabil. Nach einer gewissen, freien Wegstrecke (Abb. 1 und Abb. 2) wird das Vorprofil der Kalibrierung (Abb. 3) zugeführt. Diese bildet die Negativform des zu erhaltenden Profils. Dabei können jedoch lediglich die Außenflächen des Profils kalibriert, also in Form gehalten werden. In der Kühl- und Kalibriereinheit findet die Verfestigung der Kunststoffschmelze zu einem formstabilen Profil statt.

Dieses Verarbeitungsverfahren stellt v. a. an die Schmelzestabilität des Kunststoffes besondere Anforderungen. Im Gegensatz zum Spritzgießverfahren ist es für die Extrusion



Abb. 1: Extrudierte Kunststoffschmelze (Joma-Polytec)

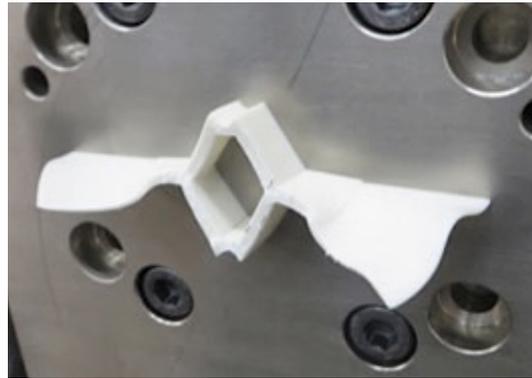


Abb. 2: Extrudierte Kunststoffschmelze (Joma-Polytec)



Abb. 3: Zuführung des austretenden Schmelzestrangs (rechts) in die Kalibriereinheit (links) (Joma-Polytec)

essentiell, dass die Schmelze hochviskos ist, dadurch können auch die nichtkalibrierten Innenkonturen besser erhalten bleiben. Unter Berücksichtigung grundsätzlicher Extrudierbarkeit und Verfügbarkeit der Materialien wurden die potentiell in Frage kommenden biogenen Werkstoffe recherchiert (Tab. 2), wobei die angegebenen Nachteile durch eine Werkstoffmodifizierung (Compoundierung) kompensiert werden müssen.

Polymerklasse	Nachteil
PHA (Polyhydroxalkanoate)	schnelle Abbaubarkeit, schlechte Verarbeitbarkeit
Stärke	schlechte Verarbeitbarkeit u. Hydrolysebeständigkeit
CA (Cellulosederivate)	sehr enges Verarbeitungsfenster
Bio-PE (Polyolefine)	Kombination Flamm- und UV-Schutz unmöglich
Bio-PA (Polyamide)	geringe Beständigkeit gegen Hydrolyse
Bio-PET (Polyethylenterephthalat)	hoher Rohstoffpreis
PLA (Polylactide)	keine Erfahrung bei Verarbeitbarkeit in Extrusion, geringe Lichtbeständigkeit

Tab. 2: Biogene Werkstoffe für den Fassadenladen

1.2 Materialcharakterisierung potentieller Grundmaterialien

Für die Untersuchungen wurden entsprechend Werkstoffe als Grundmaterial ausgewählt und hinsichtlich ihrer Materialeigenschaften charakterisiert. Materialien auf Stärkebasis wurden hierbei aufgrund ihrer geringen Hydrolysebeständigkeit nicht berücksichtigt. Die Auswahl umfasst folgende Materialien:

- Vestamid Terra DS22, Evonik Industries AG (PA1010)
- Vestamid Terra DD G16, Evonik Industries AG (PA1012)
- 2500HP, Nature Works LLC (PLA)
- SGF 4960, Braskem S.A. (PE)
- PHI002, NaturePlast (PHB)
- Cellidor531, Albis Plastic GmbH (CA)
- Globio, Toyota Tsusho (PET)

Zunächst wurden Zugstäbe mit in Anlehnung an die vom Hersteller vorgegebenen Verarbeitungsparameter im Spritzgießprozess von allen Materialien hergestellt. Nach Möglichkeit wurden die Spritzgießparameter, wie z.B. die Einspritzgeschwindigkeit, zur besseren Vergleichbarkeit konstant gehalten. Anschließend wurden die Materialien umfassend hinsichtlich ihrer thermischen, thermo-mechanischen, rheologischen und mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Zunächst wurde das thermische Verhalten hinsichtlich der Glasübergangs-, Schmelze-, Kristallisations-, sowie der Zersetzungstemperatur mit Hilfe der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC), sowie der thermogravimetrischen Analyse (TGA) charakterisiert (Tab. 3). Wie zu erwarten, zeigen die Materialien vollständig unterschiedliche Eigenschaftscharakteristika. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass bei dem PLA innerhalb des Spritzgießprozesses keine vollständige Kristallisation des Materials erzielt wird, so dass vor der Definition der mechanischen Eigenschaften ein Temperschritt sinnvoll ist. Mit Hilfe mehrerer DSC-Messungen wurde dieser auf 30 Minuten bei 80°C festgelegt.

Polymer-klasse	Glasübergangstemperatur [°C] (DSC)	Schmelztemperatur [°C] (DSC)	Kristallisationstemperatur [°C] (DSC)	Zersetzungstemperatur [°C] (TGA)
PHB	-	164,4	117,6	293,1
PE	-	132,8	120,8	482,9
CA	106,6	-	-	375,4
PA1012	42,4	188,5 / 197,0	169,9	460,7
PA1010	47,3	181,2 / 189,2	159,9	450,2
Bio-PET	80,1	249,1	143,5	441
PLA	61,5	175,3	-	362

Tab. 3: Thermische Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien

Weiterhin wurde als Referenz für die Viskosität die Schmelzflussrate (melt volume rate - MVR) für die unterschiedlichen Materialien charakterisiert (Abb. 4). Für die Verarbeitung im Proflextrusionsverfahren ist eine hohe Schmelzeviskosität und -stabilität wichtig. Hierfür gibt der MVR ein erstes Indiz, die Verarbeitbarkeit muss in Extrusionsversuchen validiert werden. Richtungsweisend gilt, je geringer der MVR ist, desto besser lässt sich ein Material in der Extrusion verarbeiten.

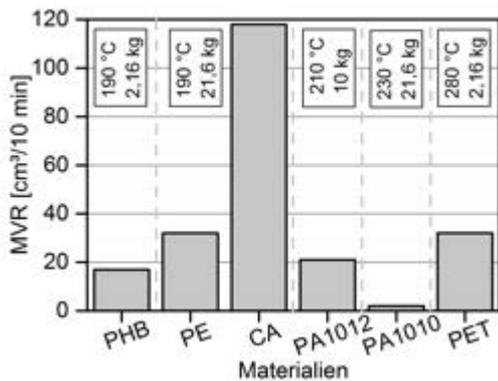


Abb. 4: Rheologische Eigenschaften (FAU-LKT)

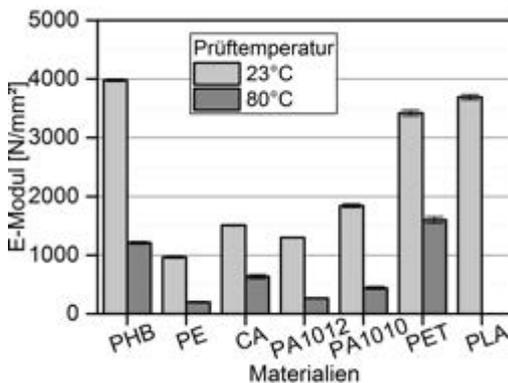


Abb. 5: E-Modul (FAU-LKT)

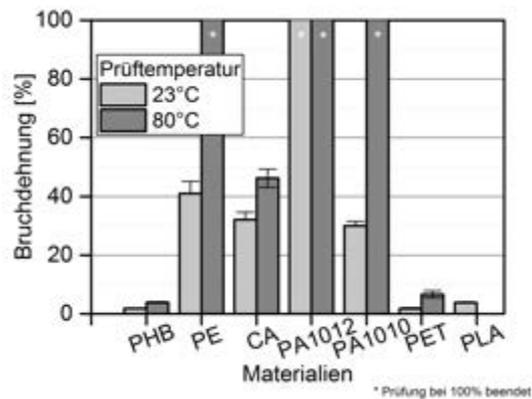


Abb. 6: Bruchdehnung (FAU-LKT)

Die hergestellten Zugstäbe wurden ebenfalls im Zugversuch nach DIN EN ISO 527 hinsichtlich des E-Moduls, der Bruchdehnung und der Zugfestigkeit bei 23°C und 80°C charakterisiert (Abb. 5 und Abb. 6). Deutlich zu erkennen ist die starke Reduktion des E-Moduls bei erhöhter Temperatur für alle Materialien, was im Rahmen der Konstruktion des Fassadenladens berücksichtigt werden muss. Je nach Konstruktion des Profils ist eine Verstärkung mit Fasern zur Erhöhung der Steifigkeit auch bei hohen Temperaturen sinnvoll. Daher erfolgte bei den im Projekt entwickelten Compounds für einige Materialien eine Faserverstärkung.

Neben den mechanischen Eigenschaften bei definierten Temperaturen ist insbesondere der Verlauf der mechanischen Eigenschaften über die Temperatur und die Definition der Glasübergangstemperatur und damit einer Änderung des Zustandsbereichs der Materialien wichtig. Somit wurden von allen Materialien dynamisch-mechanische Analysen unter Torsionsbelastung durchgeführt. Exemplarisch ist dies in Abb. 7 für das PET aufgezeigt. Die Glasübergangstemperatur und damit eine Änderung des Zustandsbereichs vom energie- in den entropieelastischen Bereich liegt bei 81,1 °C.

Für die Konstruktion des Fassadenladens ist die Beachtung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten insbesondere bei der Kombination mit anderen Materialien, wie z.B. Holz oder Aluminium von Bedeutung. Mit Hilfe der thermomechanische Analyse (TMA) wurden die thermischen Ausdehnungskoeffizienten quer zur Schmelzeströmung bei Herstellung des Zugstabs in einem breiten Temperaturbereich charakterisiert (Abb. 8). Im Vergleich zu möglichen anderen Materialien, die im Fassadenladen genutzt werden können, liegen die thermischen Ausdehnungskoeffizienten relativ hoch und steigen insbesondere bei höheren Temperaturen noch weiter an. Der Ausdehnungskoeffizient kann ebenfalls durch Füllmaterialien, wie z.B. Fasern, reduziert und teilweise an andere Materialien angeglichen werden.

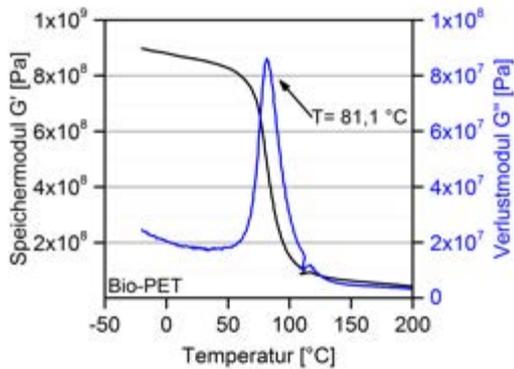


Abb. 7: Dynamisch-mechanische Analyse, PET (FAU-LKT)

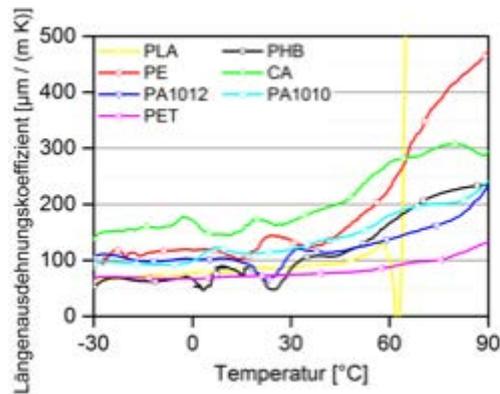


Abb. 8: Thermischer Ausdehnungs-koeffizient (FAU-LKT)

1.3 Materialentwicklung und -charakterisierung

Vorteile von PLA basierten Werkstoffen sind die Verfügbarkeit des Basismaterials in ausreichender Menge, sowie der im Vergleich zu anderen biogenen Werkstoffen vergleichsweise niedrige Einkaufspreis. Darüber hinaus sind spezielle PLA-Typen in der Extrusion gut verarbeitbar, wie sich in früheren Projekten, an denen Tecnaro beteiligt war gezeigt hat. Für die geplante Anwendung wurde somit zunächst der PLA-basierte Tecnaro-Werkstoff ARBOBLEND®3016 V eingesetzt. Auf Basis der ersten Untersuchungen wurde entschieden neben den PLA-basierten Compounds ebenfalls PET, cellulosebasierte Werkstoffe, sowie Bio-PA weiter zu untersuchen. Es wurden zahlreiche Materialien entwickelt, wovon die wichtigsten in Tab. 4 angegeben und die favorisierten Materialien für eine zweite Projektphase grau markiert sind. Aufgrund deutlicher Farbänderungen bei UV-Bestrahlung wurde das Material ARBOBLEND®3830 auf Basis von CA (Celluloseacetat) für die weitere Betrachtung im Rahmen des Projekts ausgeschlossen, so dass nicht alle Kenndaten vorhanden sind. Ebenfalls zeigte sich durch die Konstruktion der Einzelelemente die Notwendigkeit einer Verstärkung, so dass die faserverstärkten Materialien bevorzugt werden. PET zeigt grundsätzlich Potential, auch wenn die Extrudierbarkeit trotz bereits erfolgreicher Verbesserungen bislang nicht vollständig gegeben ist. In Kombination mit aktueller Beschaffungsschwierigkeiten wird PET als Grundmaterial zunächst zurückgestellt.

Material	Rohstoffbasis	Bemerkung
ARBOBLEND®3016V	PLA-Blend	
ARBOBLEND®3765V	PLA-Blend, enthält Glasfasern	cremefarbig, nicht erwünscht
ARBOBLEND®3896V	PLA-Blend, enthält Glasfasern	geändertes Entformungshilfsmittel
ARBOBLEND®3830	CA, enthält Glasfasern	
ARBOBLEND®3766	PET, enthält Glasfasern	Schmelzestabilität zu gering
ARBOBLEND®722D	PA	
ARBOBLEND®2328D	PA	
ARBOBLEND®4017D	PA, enthält Glasfasern	

Tab. 4: Auswahl der Materialentwicklungen für den Fassadenladen

Material	Glasübergangstemperatur [°C] (DMA)	Schmelztemperatur [°C] (DSC)	Kristallisationstemperatur [°C] (DSC)	Zersetzungstemperatur [°C] (TGA)
3016V	65,6	105,0 / 112,9 / 171,2 / 177,4	90,6 / 114,9	362
3765V	65,7	104,2 / 112,5 / 171,2 / 177,2	86,9 / 115,6	362
3896V	- 66,5	104,3 / 112,8 / 170,1 / 176,2	89,0 / 115,5	358
3766V	78,2	243,6	206,4	443
722D	53,1	188,5 / 197,0	169,9	461
2328D	49,7	181,2 / 189,2	159,9	450
4017D	51,4	221,5	196,4	473

Tab. 5: Thermische Eigenschaften der ARBOBLEND®- Typen

Die genannten Materialien wurden ebenfalls hinsichtlich der wichtigsten Materialeigenschaften charakterisiert. Hierfür wurden Zugstäbe, in Anlehnung an die vom Hersteller vorgegebenen Verarbeitungsparameter, im Spritzgießprozess Materialien hergestellt. Nach Möglichkeit wurden die Spritzgießparameter, wie z.B. Einspritzgeschwindigkeit, zur besseren Vergleichbarkeit konstant gehalten. Exemplarisch wurde auch die Mehrfachverarbeitung der Materialien und der Einfluss auf die finalen mechanischen Eigenschaften betrachtet.

Entsprechend der charakterisierten thermischen Eigenschaften (Tab. 5) kann davon ausgegangen werden, dass die Materialien ARBOBLEND®3016V, 3765V sowie 3896V aus der gleichen Materialbasis bestehen, wobei es sich hierbei um einen Blend von zwei Materialien grundlegend unterschiedlicher Schmelztemperatur handelt. Mit Hilfe der TGA kann über die Erhöhung der Temperatur bei gleichzeitiger Bestimmung des Gewichts der Anteil anorganischer Füllstoffe bestimmt werden. Somit wurde ein Füllstoffgehalt von ca. 14 % für das ARBOBLEND®3016V und zwischen 38 und 39,5 % für die Materialien 3765V, 3896V, 3766V und 4017D festgestellt werden. Weiterhin wurde bei den PLA-basierten Compounds ebenfalls ein geringer Kristallisationsgrad nach der Verarbeitung festgestellt, so dass diese vor der jeweiligen Charakterisierung getempert wurden (30 Minuten, 80° C). Für weitere Untersuchungsmethoden erfolgte dies analog.

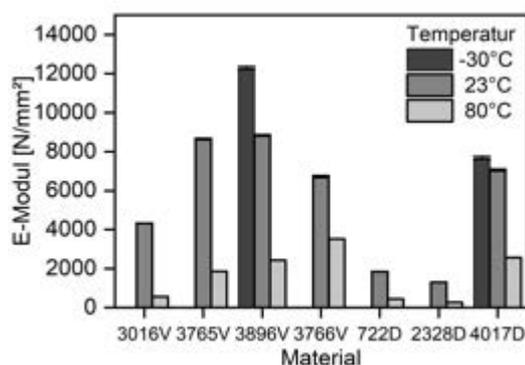


Abb. 9: E-Modul (FAU-LKT)

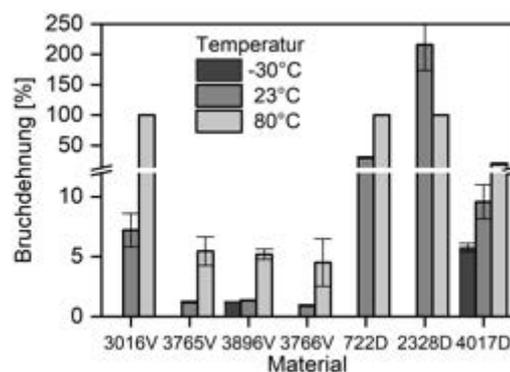


Abb. 10: Bruchdehnung (FAU-LKT)

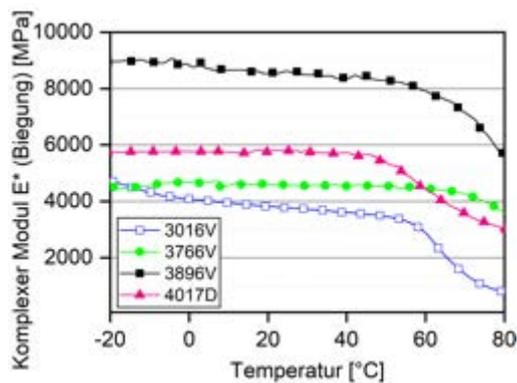


Abb. 11: Abhängigkeit des Biege-E-Moduls von der Temperatur (FAU-LKT)

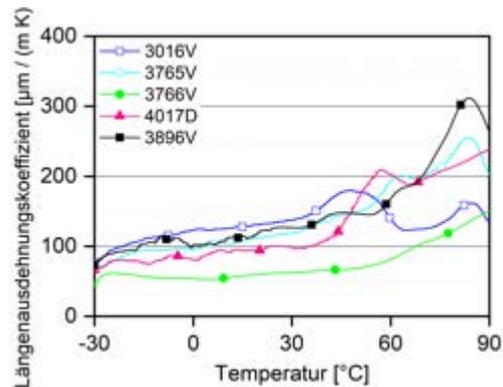


Abb. 12: Thermischer Ausdehnungskoeffizient (FAU-LKT)

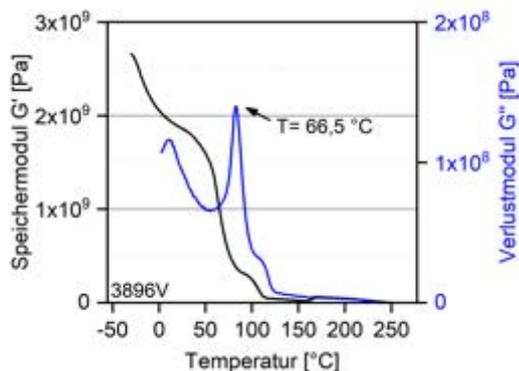


Abb. 13: Dynamisch-mechanische Analyse (AR-BOBLEND®3896V) (FAU-LKT)

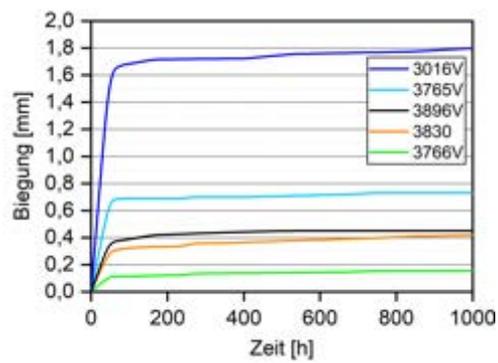


Abb. 14: Zeitstandversuche unter Biegung, Belastung: $0,5 \text{ N/mm}^2$ bei von 80 °C (FAU-LKT)

Die mechanischen Eigenschaften der Materialien wurden im Zugversuch bei RT, als auch bei erhöhter Temperatur von 80 °C sowie für die favorisierten Materialien ebenfalls für -30 °C charakterisiert. Die mechanischen Eigenschaften zeigen wie erwartet eine Erhöhung des E-Moduls und Reduzierung der Bruchdehnung bei Erhöhung der Temperatur (Abb. 9 und Abb. 10). Die Zugabe von Glasfasern führt insgesamt zu einer Verringerung der Bruchdehnung bei gleichzeitig höherem E-Modul. Die charakterisierten Kennwerte werden im Weiteren für die Auslegung des Profils und der Profillänge verwendet.

Innerhalb des Fassadenladens ist eine horizontale Positionierung der extrudierten Profile vorgesehen, so dass im Wesentlichen eine Biegebelastung vorliegt. Zur Definition des E-Moduls auf Biegung wurden dynamisch-mechanische Analysen an den unterschiedlichen Materialien durchgeführt, so dass eine temperaturabhängige Bestimmung des E-Moduls über den Einsatztemperaturbereich möglich ist. So kann der deutliche Abfall des E-Moduls über die Temperatur definiert werden, welche in etwa in Höhe der Glasübergangstemperatur liegt (Abb. 11). Somit liegt eine Änderung des E-Moduls über die gesamte Einsatztemperatur vor und muss in der Auslegung berücksichtigt werden. Ebenfalls für die Konstruktion der Baukomponente zu beachten ist der thermische Längenausdehnungskoeffizient (Abb. 12).

Des Weiteren wurden die Materialien hinsichtlich des Speicher- und Verlustmoduls in der dynamisch-mechanischen Analyse untersucht. (Abb. 13) Die Glasübergangstemperatur und damit eine Änderung vom energieelastischen in den entropieelastischen Zustandsbereich liegen bei $66,5 \text{ °C}$. Aus diesem Grund muss insbesondere das Zeitstandverhalten bei erhöhter Temperatur aus der Anforderungsliste ($T = 80 \text{ °C}$) und evtl. auftretendes Kriechen untersucht werden.

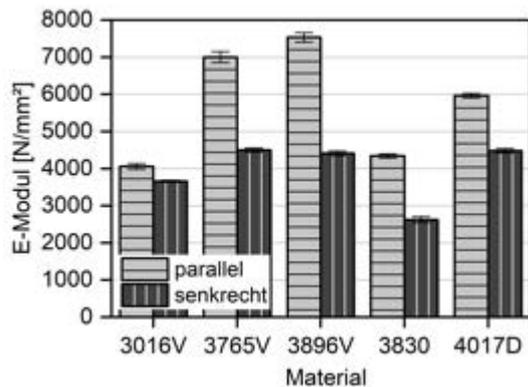


Abb. 15: E-Modul der Materialien in Abhängigkeit der Extrusionsrichtung (FAU-LKT)

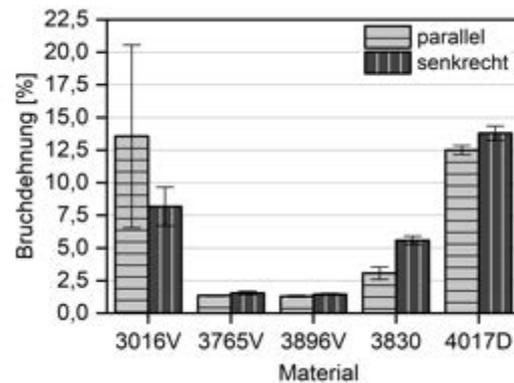


Abb. 16: Bruchdehnung der Materialien in Abhängigkeit der Extrusionsrichtung (FAU-LKT)

Die Bauteile des Fassadenladens sind bestimmten Lasten, wie z.B. dem Eigengewicht, aber auch einer Windbelastung ausgesetzt. Durch statische Vorbetrachtungen wird die maximale Belastung für das Profil in senkrechter Positionierung auf 0,18 ($T > 55^{\circ}\text{C}$), bzw. 1 N/mm^2 ($T < 55^{\circ}\text{C}$) festgelegt (Kapitel 2.7). Aufgrund des Überschreitens des Glasübergangstemperaturbereichs wurde der Fokus auf das Kriechen bei erhöhter Temperatur gelegt. Hierfür wurde mit Hilfe eines eigens entwickelten Prüfaufbaus zur Prüfung der Materialverformung durch eine Biegebelastung das Kriechen der unterschiedlichen Materialien an spritzgegossenen Zugstäben bei 80°C unter einer Belastung von $0,5 \text{ N/mm}^2$ geprüft. Die Messung der Biegung über die Zeit bei einer geringeren Belastung in Höhe von $0,18 \text{ N/mm}^2$ konnte messtechnisch bei den glasfaserverstärkten Materialien nicht detektiert werden. Für die beiden favorisierten Materialien wurden ebenfalls höhere Belastungen (1, 1,5 und 2 N/mm^2) untersucht (Abb. 14).

Es ist erkennbar, dass die glasfaserverstärkten Materialien eine Biegung in Höhe von 0,1 - 0,4 mm über 1000 h aufweisen, wobei der größte Anteil der Verformung innerhalb der ersten zwei Tage erfolgt. Ein weiterer Anstieg der Biegung erfolgt im Anschluss lediglich geringfügig. Auch bei höherer Belastung zeigt sich ein vergleichbares Verhalten.

Weiterhin erfolgte eine Definition der Vicat Erweichungstemperatur entsprechend VST A120 DIN ISO 306. Die Erweichungstemperatur des Materials ARBOBLEND@3896V liegt mit 126°C deutlich oberhalb der maximalen Einsatztemperatur von 80°C . Auch das nicht fasergefüllte Material ARBOBLEND@3016V hat mit einer Erweichungstemperatur von 115°C einen relativ hohen Wert. Ebenso verhält es sich mit dem Werkstoff ARBOBLEND@4017D, welcher eine Erweichungstemperatur von 175°C aufweist.

Zur Charakterisierung des Einflusses der Extrusionsrichtung auf die mechanischen Eigenschaften wurden die Materialien zu Platten mit einer Stärke von 2 mm und einer Breite von 100 mm extrudiert. Die gewählte Plattengeometrie entspricht in etwa den gefertigten Profilen für das Funktionsmodell um eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse zu erzielen.

Aus den Platten wurden Zugstäbe der Größe 1:2 parallel und senkrecht zur Extrusionsrichtung präpariert und hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Es zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Extrusionsrichtung auf die mechanischen Eigenschaften aller Materialvarianten, wobei der Unterschied für das Material ARBOBLEND@3016V am geringsten ausfällt, da das Material nicht glasfaserverstärkt ist. (Abb. 15 und Abb. 16)

Bei einer Analyse der Bruchflächen mittels Rasterelektronenmikroskopie konnte eine deutliche strömungsinduzierte Faserorientierung parallel zur Extrusionsrichtung über den gesamten Bauteilquerschnitt identifiziert werden. Weiterhin zeigt sich eine bislang ungenügende Anhaftung zwischen Matrix und Fasern, so dass eine Modifikation der Fasern, z.B. über Haftvermittler, notwendig erscheint. Die Faserorientierung sowie die Faser-Matrix-Anbindung

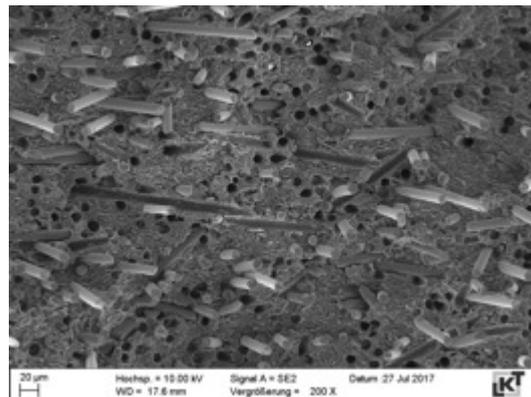
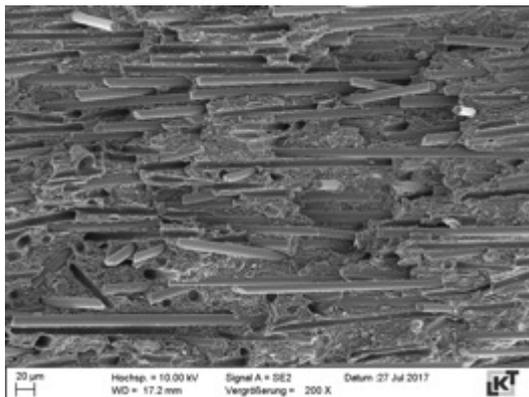


Abb. 17: REM-Analyse Bruchfläche (Prüfung senkrecht zur Extrusionsrichtung) (ARBOBLEND@3896V) (FAU-LKT)

Abb. 18: REM-Analyse Bruchfläche (... parallel zur Extrusionsrichtung) (ARBOBLEND@3896V) (FAU-LKT)

ist in allen faserverstärkten extrudierten Materialien vergleichbar ausgebildet. (Abb. 17 und Abb. 18)

Da die Profile in der Anwendung auch der Wasseraufnahme ausgesetzt sind, wurden erste Versuche bezüglich der Änderung der Eigenschaften durch Wasseraufnahme gestartet. Insbesondere bei den PLA-basierten Materialien ist die Hydrolysebeständigkeit bei hohen Temperaturen kritisch zu sehen. Diese wurde deshalb bei den PLA-basierten Materialien mit einem Fokus auf die Änderung der mechanischen Eigenschaften als auch den thermischen Eigenschaften bei unterschiedlichen Einlagerungstemperaturen und -dauern untersucht; zusätzlich wurde ein reines PLA (2500HP, Nature Works) behandelt. Aufgrund von Voruntersuchungen wurden Temperaturen zwischen 40 und 60 °C ausgewählt; bei einer Temperatur von 70 °C konnte bereits eine deutlich reduzierte Festigkeit der Probekörper und eine Rissbildung auf der Oberfläche identifiziert werden. Somit wurden die spritzgegossenen Zugstäbe in Wasser bei 40, 45, 50, 55 und 60 °C für eine Dauer von 1, 2, 4, 7, 14 und 24 Wochen eingelagert und hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften im Kurzzeit-Zugversuch vor und nach der Einlagerung nach erfolgter Rücktrocknung geprüft. Die Rücktrocknung ist notwendig um eine mögliche Änderung der Materialeigenschaften durch die Lagerung bewerten zu können und wurde jeweils über eine Karl-Fischer-Titration überprüft. Zur Charakterisierung des reinen Temperatureinflusses auf die mechanischen Eigenschaften wurden ebenfalls trockengelagerte Proben geprüft (Einlagerungsdauer: 14 Wochen). Die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften erfolgte für jede Variation anhand von fünf validen Prüfungen.

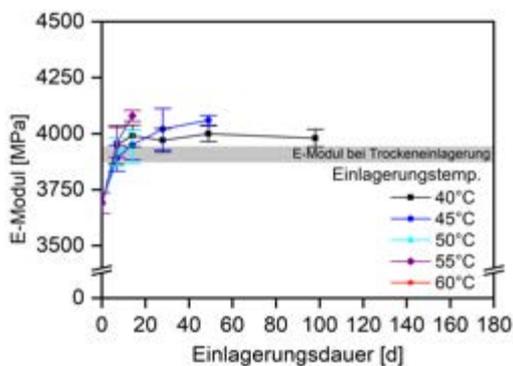


Abb. 19: Einfluss der Wasseraufnahme und Hydrolyse auf den E-Modul (2500HP, Nature Works LLC (PLA) (FAU-LKT)

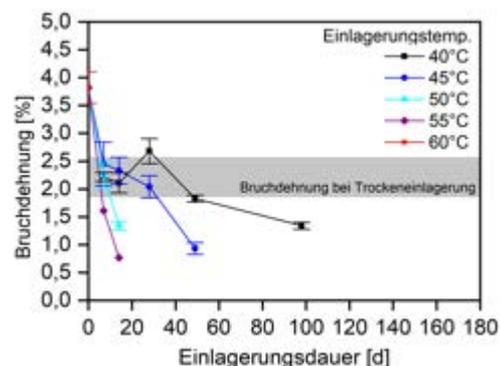


Abb. 20: Einfluss der Wasseraufnahme und Hydrolyse auf die Bruchdehnung (2500HP, Nature Works LLC (PLA) (FAU-LKT)

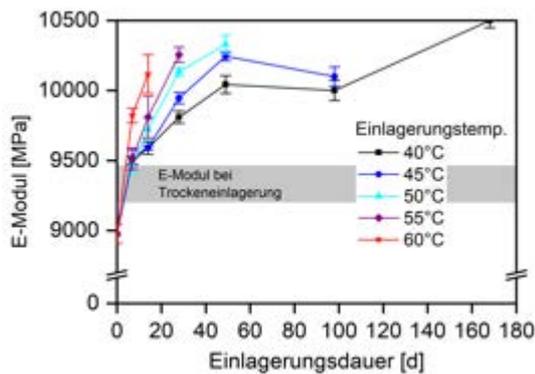


Abb. 21: Einfluss der Wasseraufnahme und Hydrolyse auf den E-Modul (ARBOBLEND@3896V) (FAU-LKT)

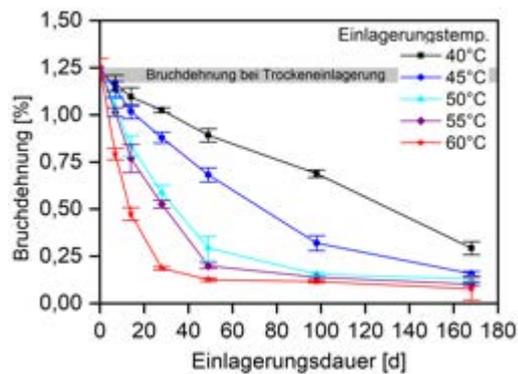


Abb. 22: Einfluss der Wasseraufnahme und Hydrolyse auf die Bruchdehnung (ARBOBLEND@3896V) (FAU-LKT)

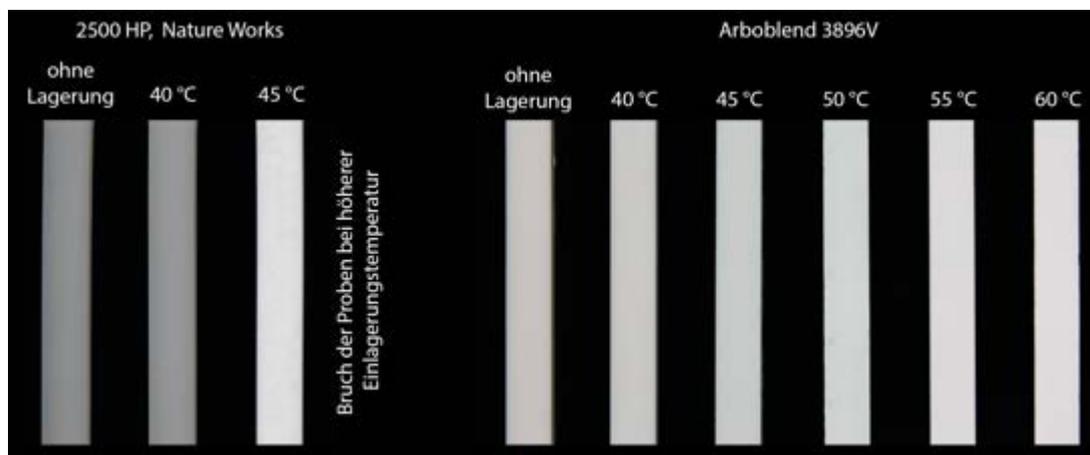


Abb. 23: Einfluss der Einlagerungstemperatur auf die Farbmeterik der Proben nach 14 Wochen (FAU-LKT)

Die Hydrolyse hat einen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und ist ebenfalls von der Einlagerungsdauer als auch der -temperatur abhängig (Abb. 21 bis Abb. 27). Das PLA zeigt eine hohe Hydrolysesensibilität mit einer Versprödung des Materials. So kommt es insbesondere bei erhöhten Temperaturen und/oder langen Einlagerungsdauern zu einer deutlichen Reduktion der Festigkeit bis hin zu einem Zerbrechen in viele Einzelteile während der Einlagerung, so dass keine Prüfung der mechanischen Eigenschaften im Zugversuch möglich war. Auf Basis von DSC-Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine deutliche Reduzierung der Schmelztemperatur um bis zu 25 °C bei hoher Einlagerungstemperatur und -dauer vorhanden ist. In Kombination mit den großen Unterschieden in den mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu einer reinen Temperatureinlagerung weisen diese Ergebnisse auf eine deutliche Hydrolyse des Materials hin.

Im Vergleich zeigt das Material ARBOBLEND@3896V eine deutliche Verbesserung der Beständigkeit und der mechanischen Eigenschaften bei längeren Einlagerungsdauern sowie höheren Temperaturen (Abb. 23). So zeigt sich eine deutliche Erhöhung des E-Moduls mit steigender Temperatur und Einlagerungsdauer, wobei der E-Modul der trocken gelagerten Proben über alle Temperaturbereiche nur geringfügig oberhalb des spritzfrischen E-Moduls liegt (Abb. 21). Im Gegensatz hierzu zeigt sich eine deutliche Reduktion der Bruchdehnung mit steigender Temperatur und Einlagerungsdauer, wohingegen die Bruchdehnung der trocken gelagerten Zugstäbe konstant bleibt (Abb. 22).

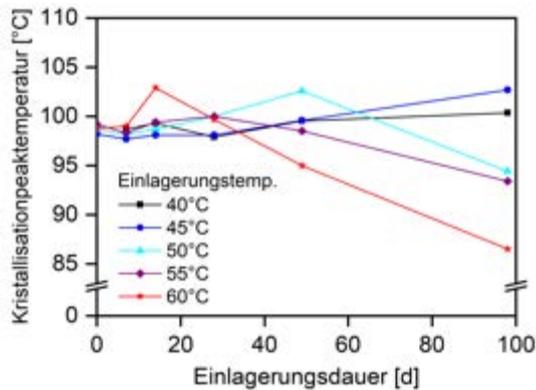


Abb. 24: Einfluss der Nasslagerung auf die Kristallisationspeaktemperatur (ARBOBLEND@2640R) (FAU-LKT)

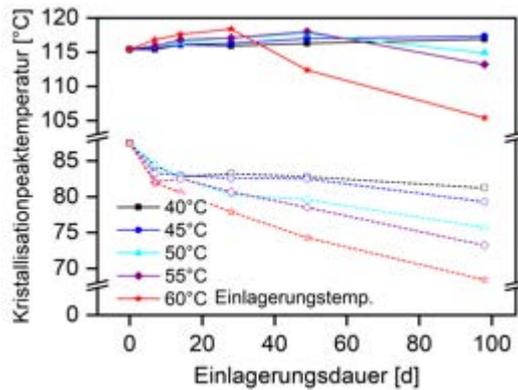


Abb. 25: Einfluss der Nasslagerung auf die Kristallisationspeaktemperatur (ARBOBLEND@3896V) (FAU-LKT)

Auch das Material ARBOBLEND@3016V zeigt eine im Vergleich zum PLA verbesserte Beständigkeit bei den gewählten Einlagerungsbedingungen, so dass dies auf die Compoundzusammensetzung zurückgeführt werden kann. Dennoch ist eine deutliche Hydrolyse des Materials vorhanden, was durch massive Änderung der Materialeigenschaften hervortritt.

Zur Analyse des Materialverhaltens wurden analog DSC-Messungen zur Bestimmung der Enthalpie als Funktion der Temperatur durchgeführt. Durch eine definierte Erwärmung und Abkühlung des Materials können endotherme und exotherme Prozesse identifiziert und somit auf physikalische und chemische Materialänderungen zurückgeführt werden. Insbesondere das Kristallisationsverhalten des Materials erlaubt Rückschlüsse auf Änderungen im Material.

Im Allgemeinen kann eine Erhöhung der Kristallisationspeaktemperatur durch Nukleierungseinflüsse, wie chemische Alterung und somit kürzere Polymerketten, oder eine Zunahme an Füllstoffpartikeln als Nukleierungsmittel verursacht werden. Eine Abnahme der Kristallisationspeaktemperatur weist üblicherweise auf eine Vernetzung von Polymerketten hin.

Die DSC-Messungen an den Proben zeigen deutliche Verschiebungen der Kristallisationstemperatur auf, was auf hydrolysebedingte Änderungen im molekularen Aufbau zurückzuführen ist (Abb. 24 und Abb. 25). Weiterhin weisen erste Untersuchungen mittels FSC (Fast Scanning Calorimetry) auf abkühlbedingte Wechselwirkungen zwischen den beiden Blendmaterialien hin, so dass eine individuelle Analyse der Kristallisationspeaks nur begrenzt möglich ist.

Aufgrund dem unklaren Übertrag einer reinen Nasslagerung zu einer entsprechenden Freibewitterung wurden ebenfalls Xenon-Prüfungen nach DIN EN 513 zur Simulation einer gemäßigten Klimazone durchgeführt (Kapitel 3).

Weiterhin erfolgten Untersuchungen zur Beständigkeit bei dem Material ARBOBLEND 4017D auf Basis eines Bio-Polyamids. Aufgrund der grundsätzlichen Annahme einer deutlich erhöhten Beständigkeit wurde diese bei Nasslagerung bei einer Temperatur von 70 °C über 14 Wochen Einlagerungszeit durchgeführt. Aufgrund von auftretender Hydrolyse wurde allerdings eine Reduktion der Bruchdehnung um 71 % identifiziert, wobei der E-Modul im Rahmen der Standardabweichung konstant verblieb.

Eine Zusammenfassung der wichtigsten Materialrezepturen mit einer Bewertung hinsichtlich des Eigenschaftsprofils auf Basis der vorherigen Untersuchungen und der Verarbeitbarkeit ist in Tab. 6 dargestellt.

Rezeptur	Compound	Vor- und Nachteile	Verarbeitbarkeit in Extrusion	Bemerkung
ARBO-BLEND® 3016V	PLA-basiert Farbe: beige	+ Stabile Schmelze + Wiederverarbeitbarkeit möglich - T _G : 65,5 °C (evtl. nicht ausreichende Festigkeit bei hoher Temperatur) - Unregelmäßiger Ausstoß - Sehr geringe Steifigkeit und Kriechen des Materials bei hoher Temperatur - Hydrolysebeständigkeit bei hoher Temperatur nicht gegeben, bei geringer Temperatur Indiz für Materialabbau - Voraussichtlich Nachkristallisation des Materials nach der Extrusion erforderlich	bedingt	Sehr sensibel auf Prozessschwankungen
ARBO-BLEND® 3584V	PLA-basiert Farbe: hell/weiß	- unregelmäßiger Ausstoß	nein	Verarbeitung nicht möglich
ARBO-BLEND® 3765V	PLA-basiert GF-verstärkt Farbe: beige	+ (Form)-stabile Schmelz + Innenkonturen werden gut gebildet - Enges Verarbeitungsfenster - T _G : 65,5 °C - Voraussichtlich Nachkristallisation nach der Extrusion erforderlich	ja	Ähnliche Grundrezeptur mit ähnlichem Verarbeitungsverhalten. Ähnliche Grundrezeptur zum Material 3016V.
ARBO-BLEND® 3896V	PLA-basiert GF-verstärkt Farbe: hell/weiß	+ (Form)-stabile Schmelz + Innenkonturen werden gut gebildet - Enges Verarbeitungsfenster - Voraussichtlich Nachkristallisation nach der Extrusion erforderlich	ja	
ARBO-BLEND® 3897V	PLA-basiert GF-verstärkt Farbe: dunkelbeige	- Hydrolysebeständigkeit bei hoher Temperatur nicht gegeben, bei geringer Temperatur Indiz für Materialabbau	ja	
ARBO-BLEND® 3766V	PET-basiert GF-verstärkt Farbe: hell/weiß	+ Höhere Temperaturbeständigkeit + T _G : 81 °C - Prozess sehr anfällig gegenüber Restfeuchtigkeit im Material; geringe Viskosität dieser Rezeptur	nein	
ARBO-BLEND® 3830	CA-basiert GF-verstärkt	+ sehr gute Extrudierbarkeit mit breitem Verarbeitungsfenster und ausreichend hoher Schmelzestabilität - starke Farbveränderung durch UV-Bestrahlung	ja	
ARBO-BLEND® 4017D	PA-basiert GF-verstärkt	+ sehr gute Extrudierbarkeit mit breitem Verarbeitungsfenster und ausreichend hoher Schmelzestabilität	ja	

FabioW
Ergebnisse
Material

Tab. 6: Bewertung der entwickelten Materialrezepturen nach aktuellem Stand der Charakterisierungen

Das Material ARBOBLEND®3766V, ein glasfaserverstärktes PET, ist sehr anfällig gegenüber Feuchtigkeitsreste im Material, weswegen hier die Vortrocknung eine besondere Rolle spielt. Die getestete Type zeigte allerdings eine sehr geringe Viskosität, die Schmelze war sehr dünnflüssig und nicht ausreichend stabil. Die Type 3766V ist somit für den Einsatz im Extrusionsprozess nicht geeignet.

Erste Arbeiten zur Verbesserung der Schmelzestabilität wurden im Rahmen des Vorhabens durchgeführt. Aus diesem Grund erfolgen weitere Untersuchungen an modifizierten, kommerziell verfügbaren PET Polymeren mit höherer Schmelzestabilität. Bei Verwendung der modifizierten Type zeigt sich im ungefüllten Zustand eine deutliche Verbesserung der Extrudierbarkeit. Eine Weiterentwicklung einer für den Fassadenladen geeigneten Type wird aufgrund des höheren Potentials der anderen Werkstoffe zunächst zurückgestellt.

Vorteile bei der Verwendung von PLA ergeben sich aus der Verfügbarkeit des Rohstoffs in ausreichender Menge, dem niedrigen Rohstoffpreis sowie der guten Verarbeitbarkeit bei der Extrusion. Ein Nachteil ist die begrenzte Wärmeformstabilität, welche aber durch eine geeignete Additivierung eingestellt werden kann. Die Materialien ARBOBLEND®3765 V und ARBOBLEND®3896V auf PLA-Basis mit einem Glasfaseranteil unterscheiden sich durch verschiedene Entformungshilfsmittel; dies zeigt sich in der Farbe des Materials. Durch die Erfahrungen der Vorversuche, kombiniert mit der Weiterentwicklung der Rezepturen, stehen nun zwei gut zu verarbeitende Materialtypen, welche eine feste, formstabile Schmelze aufzeigen, zur Verfügung. Aufgrund seiner hellen Farbe ging ARBOBLEND®3896V aus diesen Versuchen als Favorit für die Werkzeugbemusterung hervor. Weiterhin ist die Hydrolysestabilität von PLA herausfordernd.

Das Material ARBOBLEND®4017D, eine Bio-PA Type, zeigt eine hervorragende Verarbeitbarkeit in der Extrusion und soll als weitere Materialbasis im Rahmen des Folgevorhabens in Betracht gezogen werden. Bei dem für die Funktionsmodelle verwendeten Material einigte man sich schließlich auf den PLA-basierten Werkstoff ARBOBLEND®3896 V.

1.4 Fertigung der Extrusionsprofile

In Absprache mit den Projektbeteiligten wurden zwei Profil-Konturen (Abb. 26) erarbeitet. Auf Basis bereits erhaltener Erfahrungen erfolgte die Konstruktion und Fertigung der Extrusionswerkzeuge sowie der Kalibriereinheiten (Abb. 27 und Abb. 28). Da das Fließ- und Schubverhalten der Schmelze am jeweiligen Werkzeug aber nur empirisch ermittelt werden kann, ist ein sogenanntes Einfahren der Extrusionseinheit erforderlich, d.h. das Werkzeug wird Stück für Stück überarbeitet und entsprechend des erhaltenen Profils optimiert.

Es zeigte sich, dass für die Verarbeitung von ARBOBLEND®3896V ein, im Vergleich zu anderen bei Joma-Polytec verarbeiteten Kunststoffen, deutlich kleineres Verarbeitungsfenster zur Verfügung steht. D.h., dass die Möglichkeit zur Schmelzeflussoptimierung und -regulierung (um einzelne Maße des Profils zu beeinflussen) durch Prozessparameter nur bedingt möglich ist.



Abb. 26: Ausgewählte Konturen für die beiden Extrusionsprofile R 1.2.3 (a) und D 1.3.1 (b) (THN-AR)

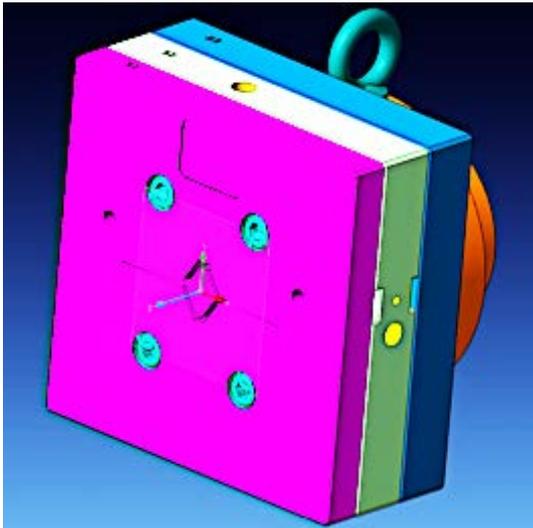


Abb. 27: Extrusionswerkzeug
(Joma-Polytec)

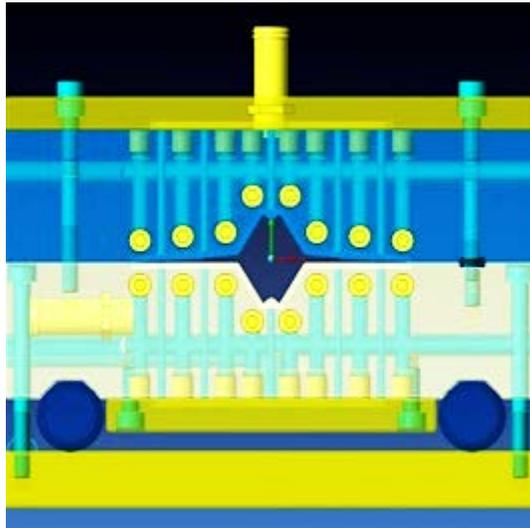


Abb. 28: Kaliberblock (Joma-Polytec)



Abb. 29: Extrudiertes Profi R 1.2.3 im Gegenlicht
(Joma-Polytec)



Abb. 30: Extrudiertes Profil R 1.2.3
(Joma-Polytec)

Die Düse muss daher exakt auf den Fluss des eingesetzten Materials im Verarbeitungsfenster eingestellt sein und das Material wiederum darf in seinem rheologischen Verhalten keine allzu großen Schwankungen zwischen verschiedenen Chargen zeigen.

Die Platzierung der Kühl- und Vakuumkanäle in der Kalibereinheit sind bei der Verarbeitung von entscheidender Bedeutung, so konnten bei der Konstruktion des zweiten Werkzeuges, aufgrund der Erfahrungen beim Ersten, erhebliche Verbesserungen und eine flexiblere Gestaltung des Prozesses erzielt werden. V.a. dem ersten Kaliberblock kommt hier eine besondere Bedeutung zu. Dieser wurde nun für das zweite Werkzeug etwas aufwendiger gefertigt, d.h. es wurden vorab bereits mehrere Möglichkeiten zur gezielten Verteilung und Steuerung des anliegenden Vakuums integriert. Dadurch kann in der Einfahrphase schneller, effizienter und materialspezifisch reagiert werden. Des Weiteren lässt diese aufwändigere Fertigung eine reversible Anpassung der Vakuumverteilung zu, welche vor allem beim Einfahren des zweiten Profils einen erheblichen Mehrwert bzgl. der Informationsgewinnung bedeutete. Die Profile mit der ersten Kontur (R 1.2.3) sind in Abb. 29 und Abb. 30 dargestellt.

Entsprechend der ausgewählten Materialtype wurde das erste gefertigte Werkzeug auf die maß- und konturhaltige Verarbeitung eingefahren und in mehreren Zyklen optimiert.

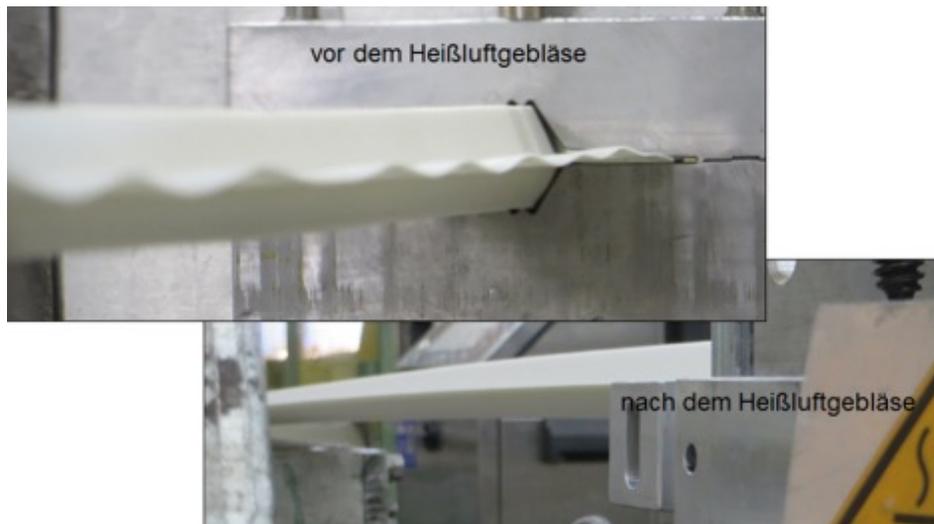
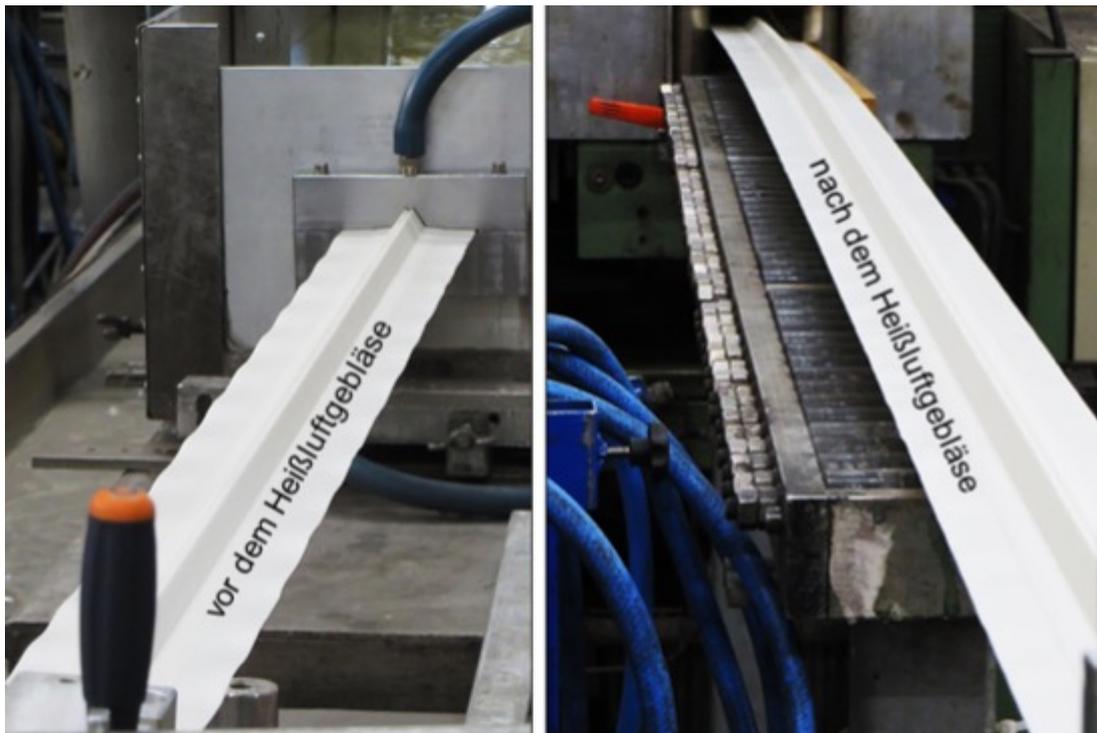


Abb. 31: Einfluss der provisorischen „Bügelvorrichtung“ auf die Profilspitzen (1)
(Joma-Polytec)

Im weiteren Projektfortgang galt es, eine größere Meterzahl an Profilen zu produzieren. Hierbei zeigte sich, im Nachgang an die eigentliche Formgebung des Profils, ein „wellig-werden“ (Abb. 31 und Abb. 32) der ausladenden Flügelspitzen des Profils. Interessant hierbei, dass sich der Schmelzschub am Werkzeugspalt, d.h. der Austritt der Masse an der Extrusionsdüse sehr gleichmäßig und zufriedenstellend darstellte. Nach Verlassen des Kalibers waren am Profil noch keine Verformungen zu erkennen, diese bildeten sich erst mit zunehmender Zeit im Abkühlbecken bzw. der Wegstrecke danach. Daraufhin wurde der Kalibrier- bzw. Abkühlvorhang näher betrachtet.

Mit dem eingesetzten Kunststoffcompound ARBOBLEND@3896V wird ein teilkristalliner Basispolymertyp (PLA) eingesetzt. D.h. es liegen amorphe sowie kristalline Bereiche der Matrix vor, der Grad der Kristallinität wird maßgeblich durch das Abkühlen der Schmelze beeinflusst. Im Fall des extrudierten Profils R 1.2.3 wurde vermutet, dass die Ursache des „wellig-werdens“ in einem unterschiedlichen Abkühlen der Schmelze über den Profilquerschnitt liegt. Den weit ausladenden, dünnen „Flügel“ entzieht die massive, gekühlte Kalibriereinheit sehr effektiv die Wärme, die Schmelze wird sehr schnell fest, die Kristallisation kann nicht vollständig ablaufen. Je näher der Flügel zum Hohlquerschnitt des Kerns hinkommt, desto stärker sind die Wandstärken, die Wärme wird langsamer entzogen. Am langsamsten kühlt diese Hohlkammer ab, im Inneren hält sich die Wärme und sorgt für einen hohen Kristallisationsgrad. So durchläuft das Profil insgesamt 4 Bügelzonen, am Ende sind die Flügelspitzen glatt und ohne Wellen. Diese bilden sich, da das Profil nun in der weiteren Fertigungsstrecke gleichmäßig abkühlen kann, auch nicht erneut aus. Dieses Vorgehen zeigt Wirkung, die Flügelspitzen werden so gezielt im Nachgang zur Nachkristallisation angeregt, die Wellenbildung kann stark minimiert bzw. beseitigt werden. (Abb. 31 und Abb. 32)

Für das zweite Extrusionswerkzeug wurde die beim ersten Profil gesammelten Erfahrungen zum Abkühlvorgang mitberücksichtigt. Das zweite Profil (D 1.3.1, Abb. 26 (b)) ist in seiner geometrischen Auslegung von Beginn an weniger anfällig als das R 1.2.3. Die Flügelfortsätze sind etwas kürzer und im Querschnitt zur Spitze hin zwar ebenfalls zulaufend, jedoch gleichmäßig, ohne Stufe und in Summe mit einer etwas höheren Wandstärke ausgeführt, was die Ausformung dieses Profils sowie den Abkühlvorgang einfacher gestaltet. Da mit dem zweiten, schmaleren Profil auf einen kleineren Extruder gewechselt werden konnte, ließ sich das Material auch bei höheren Maschinendrehzahlen verarbeiten. Die Schmelze macht dadurch einen besser aufgeschlosseneren Eindruck, d.h. wirkt gleichmäßiger; ebenso unterliegt der Schmelze-Ausstoß nahezu keinen Schwankungen. Das enge Verarbeitungsfenster, v.a. im Einzugsbereich des Extruders, besteht aber auch auf der kleineren Anlage, stellt aber bei eingefahrenen, d.h. auf die Fertigung optimierten Werkzeugen, kein großes Problem dar.



FabioW
Ergebnisse
Material

Abb. 32: Einfluss der provisorischen „Bügelvorrichtung“ auf die Profilspitzen (2)
(Joma-Polytec)

Die prinzipielle, verarbeitungstechnische Eignung der Materialtype ARBOBLEND®3896V zeigte sich auch bei der Fertigung von einfachen Rechteck-Hohlkammer-Profil mit einem bestehenden Werkzeug.

Über den kompletten Projektverlauf wurde ein stetiges Lernen des Personals in der Fertigung im Umgang mit dem biobasierten Material beobachtet. Stellten die ersten Verarbeitungen mit der ausgewählten Materialtype ARBOBLEND®3896V noch große Herausforderungen (Verarbeitungsfenster, Schmelzeschub, Wellenbildung etc.) dar, zeigte sich die Fertigung von Profilen der zweiten Geometrie umso routinierter. Für die Herstellung der Profile für die Belegung eines Funktionsmodells fand die Fertigung über mehrere Stunden hinweg im Dauerbetrieb der Anlage statt. Dabei überzeugte die Verarbeitung des Materials durch stabile Prozesskennndaten, gleichmäßigen Schmelzeschub und -ausstoß sowie einen durchgehenden, ungestörten Produktionsablauf. Die gefertigten Profile zeigen sowohl optisch als auch haptisch einen wertigen Eindruck.

1.5 Profilcharakterisierung (R 1.2.3)

Zur Charakterisierung der Kristallisation und Nachkristallisation der unterschiedlichen Bereiche bei der Fertigung, als auch bei der max. Einsatztemperatur von 80°C, wurden DSC-Untersuchungen an verschiedenen Positionen des Profils durchgeführt. Hierzu werden Proben unter Stickstoffatmosphäre bei 20 K/min definiert aufgeheizt (1. Aufheizen), abgekühlt und erneut erhitzt (2. Aufheizen). Im 1. Aufheizen werden Einflüsse der thermischen Vorgeschichte durch die Verarbeitung sichtbar. Nach Erreichen einer bestimmten Endtemperatur und dem definierten Abkühlen sind frühere Verarbeitungseinflüsse aufgehoben, die Proben haben eine identische Vorgeschichte, so dass mit dem 2. Aufheizen der Eigenschafts- und Werkstoffidentitätsvergleich durchgeführt werden kann. Für die Charakterisierung wurden jeweils Proben über den gesamten Profilquerschnitt aus dem Bereich des Flügels und des rautenförmigen Kerns für unbehandelte Proben, als auch Proben, die für zwei Tage bei 80°C gelagert wurden, entnommen.

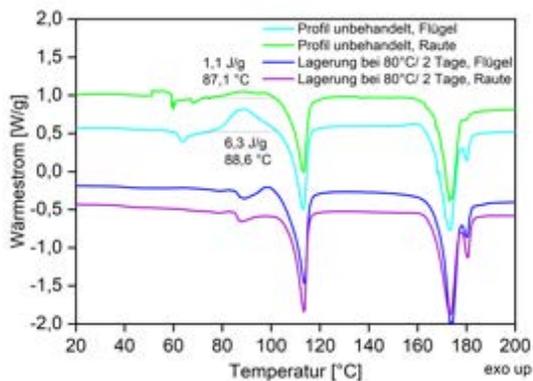


Abb. 33: DSC-Analyse von unterschiedlichen Bereichen des Profils bei unterschiedlicher Vorbehandlung (FAU-LKT)

Für die Charakterisierung der Verarbeitungseinflüsse wurde die 1. Aufheizkurve charakterisiert (Abb. 33). Deutlich zu erkennen sind die beiden Blendmaterialien mit klar unterschiedlichen Schmelztemperaturen. Der Peak vor dem ersten Schmelzpeak weist auf eine sogenannte Kaltkristallisation hin. Hierbei wird die Schmelze so schnell abgekühlt, dass die Kristallisation in der Verarbeitung unterbunden bleibt und erst während des Aufheizprozesses während der DSC-Messung infolge erhöhter Segmentbeweglichkeit einsetzt.

Bei einem Vergleich des Kern- und Flügelbereichs der unbehandelten Probe zeigen sich deutlich unterschiedliche Kristallisationsenthalpien in Höhe von 1,1 J/g (Raute) und 6,3 J/g (Flügel). Dies zeigt auf, dass die Kristallisation innerhalb des Kernbereichs höher ausfällt, was vermutlich durch die längeren Abkühlzeiten durch die höhere Wandstärke als auch die ungekühlte Hohlkammer zu begründen ist. Durch die schnellere Abkühlung der Flügelbereiche wird die Bewegung der Molekülketten teilweise unterdrückt, was durch ein erneutes Aufheizen reversibel ist. Durch Nutzung des Heißluftgebläses in der Fertigung konnte die Kristallisation somit erhöht werden, was zu einer Vermeidung der Wellung in dem Flügelbereich führt. Die charakteristischen Peaks der unterschiedlichen Materialproben sind hinsichtlich der zweiten Aufheizkurve als auch der Kristallisation vergleichbar, so dass keine Materialänderung durch die Verarbeitung, bzw. Vorbehandlung erfolgt ist.

Die aufgezeigte langsame Kristallisation und der dadurch bedingte Temperschnitt im Nachgang der Extrusion sind für die industrielle Produktion nachteilig. Aus diesem Grund wurden Extrusionsversuche zur Herstellung plattenförmiger Probekörper unter Temperierung der Kalibrierung zwischen 10 und 80 °C durchgeführt. In einer nachfolgenden DSC-Messung zur Überprüfung der auftretenden Kaltkristallisation als auch in den resultierenden mechanischen Eigenschaften konnten keine Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Extrusionsbedingungen identifiziert werden. Dies indiziert, dass die Temperatur, sowie die Durchlaufzeit während der Kalibrierung nicht ausreichend hoch für eine weitere Kristallisation des Materials sind.

Zur Überprüfung des lokalen Füllstoffgehalts und der -orientierung mit einem Fokus auf die integrierten Fasern wurden Veraschungen, als auch mikroskopische Charakterisierungen an den Profilen durchgeführt. Zunächst erfolgte eine Charakterisierung des lokalen Füllstoffgehalts nach DIN EN ISO 1172. Hierzu wurde ein Profilstück der Länge von 10 cm in sechs charakteristische Bereiche unterteilt (Abb. 34) und anschließend verascht. Der gemessene Rückstand liegt zwischen 38,2 und 38,3 Gew.-%, so dass von einer homogenen Verteilung über die Profildicke ausgegangen werden kann. Weiterhin korrelieren diese Ergebnisse mit dem in der TGA (thermogravimetrische Analyse) ermittelten Rückstand des Compounds in Höhe von 38,5 %.

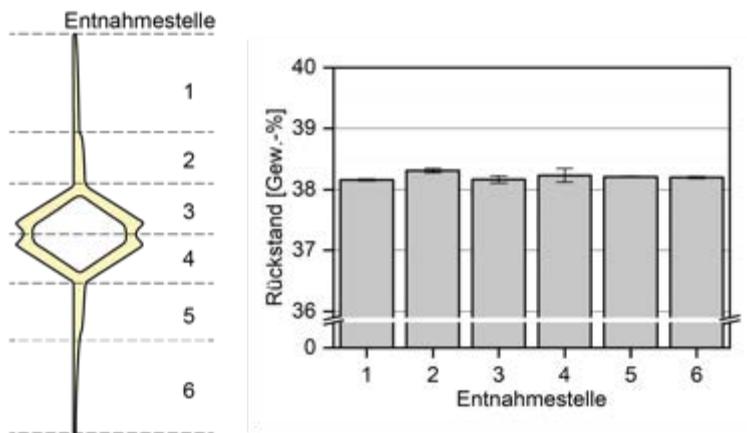


Abb. 34: Lokaler Füllstoffgehalt innerhalb des Profils (THN-AR, FAU-LKT)

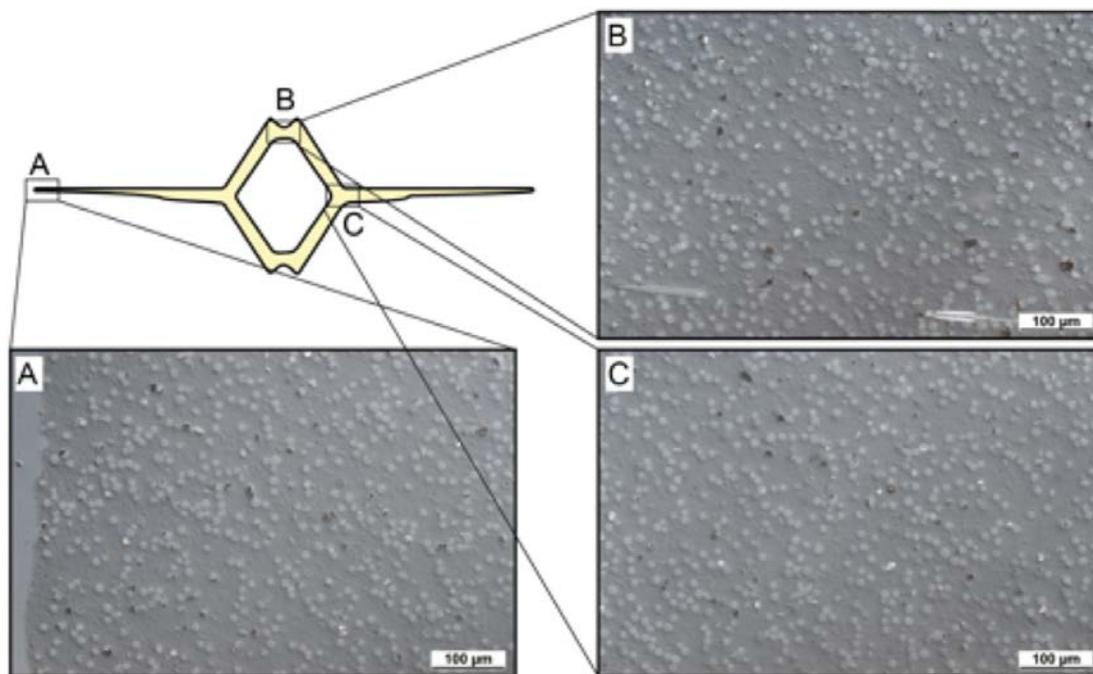


Abb. 35: Mikroskopische Untersuchungen über den Profilquerschnitt zur Charakterisierung der Faserverteilung und -orientierung (THN-AR, FAU-LKT)

Zusätzlich wurde die lokale Füllstoffverteilung optisch an Anschliffen über den gesamten Profilquerschnitt charakterisiert (Abb. 35). Neben der Füllstoffverteilung kann anhand der Anschliffe auch die Faserorientierung beurteilt werden. Über den gesamten Querschnitt ist eine deutliche Faserorientierung in Fließrichtung zu erkennen. Lediglich innerhalb des Kerns im Bereich der konkaven Rille (Bereich B) des Profils sind einzelne Fasern zu erkennen, die regellos vorliegen.

Aufgrund der vergleichbaren Faserorientierung in Extrusionsrichtung im Profil als auch den extrudierten Platten zur Generierung der Probekörper ist ein Übertrag der Ergebnisse aus der Werkstoffcharakterisierung auf die hergestellten Profile möglich.

Entsprechend der Baustoffklasse B2 müssen die verwendeten Materialien der Klassifizierung „normal entflammbar“ entsprechen. An den ARBOBLEND®-Materialien 3016V, 3765V, 3896V und 3830 wurden UL-94 Untersuchungen nach DIN EN 60695 zur Brennbarkeit von Kunststoffen durchgeführt. Alle Materialien wurden HB klassifiziert geprüft.



Abb. 36: Brandprüfung am Profil R 1.2.3; links Kanten-, rechts Flächenbeflammung (Joma-Polytec)

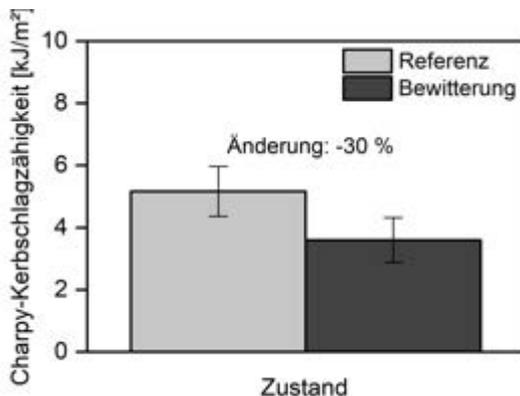


Abb. 37: Einfluss der Bewitterung auf die Kerbschlagzähigkeit (FAU-LKT)

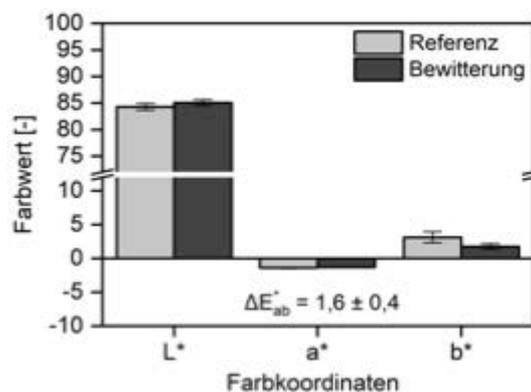


Abb. 38: Einfluss der Bewitterung auf die Farbmimetrik (FAU-LKT)

Ein direkter Übertrag der Ergebnisse auf die Baustoffklasse B2 ist nicht möglich. Somit wurde an dem Material ARBOBLEND®3896V exemplarisch und orientierend die Prüfung nach DIN4102/EN13501-1 durchgeführt. Hierzu wird das Bauprodukt entsprechend DIN EN ISO 11925-2 auf die Entzündbarkeit bei direkter Flammenwirkung getestet. Ein Profil wird in senkrechter Position eingespannt, und mittels einer definierten Brennerflamme beflammt. Dies geschieht sowohl als Kanten- als auch Flächenbeflammung. Innerhalb einer vorgegebenen Zeit, welche in Abhängigkeit der zu erreichenden Baustoffklasse steht, darf eine bestimmte Flammenhöhe am Profil nicht erreicht werden. Des Weiteren darf kein Material am Produkt brennend abtropfen. Für die angestrebte Klasse B2 ergeben sich keine weiteren Anforderungen.

Die orientierende Prüfung (Abb. 36) zeigt, dass für das Material ARBO-BLEND®3896V mit der vorliegenden Profilgeometrie B2 sicher bestanden werden kann, also kein zusätzlicher Einsatz von Flammschutzadditiven nötig ist. Weitergehend wurde die Beflammung bzw. Prüfung auf Entzündbarkeit mit den schärferen Kriterien der Klasse B1 durchgeführt.

Bei ausgeführter Flächenbeflammung zeigt sich auch hier ein zufriedenstellendes Ergebnis beim Material, für die Kantenbeflammung dagegen werden K.O.-Kriterien erreicht, d.h. die Prüfung ist nicht bestanden. Zur Klasse B1 müssten zusätzlich noch weitere Prüfungen, u.a. bzgl. der bei einem Brand entstehenden Rauchgasdichte durchgeführt werden; dies wurde aber im Projekt nicht weiterverfolgt.

Zur Charakterisierung der Profile im Anwendungseinsatz, sowie zum Übertrag einer reinen Nasslagerung, wie es anhand der Probekörper durchgeführt wurde, erfolgte eine Xenon-Prüfung nach DIN EN 513, Verfahren 1 zur Simulation einer gemäßigten Klimazone für die Außenanwendung mit nachfolgender Charakterisierung der Farbechtheit und Kerbschlagzähigkeit. Hierbei wurden Probekörper an drei unterschiedlichen Positionen des Profils R 1.2.3

entnommen und für 1024 h mit Hilfe des Geräts XENOTEST BETA LM mit einer Bestrahlungsstärke von 60 W/m² beaufschlagt.

Die Ergebnisse zeigen eine geringe Änderung der Farbmeterik, was sich in einem helleren Farbeindruck äußert. (Abb. 38) Hinsichtlich der Kerbschlagzähigkeit allerdings zeigt das Material eine deutliche Reduktion der Eigenschaften durch die durchgeführte Bewitterung, was aufgrund der Länge der Bewitterungsdauer als kritisch für die Anwendung gesehen werden muss. (Abb. 37)

FabioW
Ergebnisse
Material

2 Baukomponente „Fassadenladen“

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

Für die Erarbeitung der neuartigen Baukomponente Fassadenladen als Weiterentwicklung des traditionellen Fensterladens bilden sowohl bauliche (japanische Schiebewände aus Reispapier oder lichtdurchlässige textile Behänge (Abb. 39)) als natürliche Vorbilder (Blätter, Abb. 40) wichtige Referenzen. Wesentliche Bezüge sind dabei unter anderen mehrlagigen Strukturen mit unterschiedlichen Graden von Permeabilität, die ein differenziertes Licht- und Schattenspiel erzeugen.

2.1 Profilentwicklung

Dass sich derartige Wirkungen auch mit semitransparenten technischen Biopolymeren erzeugen lassen, zeigt eine Aufnahme von sich überlagernden kleineren Werkstoffplatten (Abb. 41). Einige Muster wirken bei einer Materialstärke von ca. 3 mm im Gegenlicht transluzent, im Licht betrachtet erscheinen diese jedoch opak. Da die Tageslichtnutzung ein wichtiger Faktor des Leistungsprofils für die Baukomponente darstellt, bilden diese Eigenschaften in Verbindung mit der flexiblen Formbarkeit des Materials, z.B. durch Extrusion, zentrale Kriterien für die Entwicklung von Profilgeometrie und Anordnung der Profile beim Fassadenladen.



Abb. 39: Alltagsreferenz
(Peter Bonfig, München)

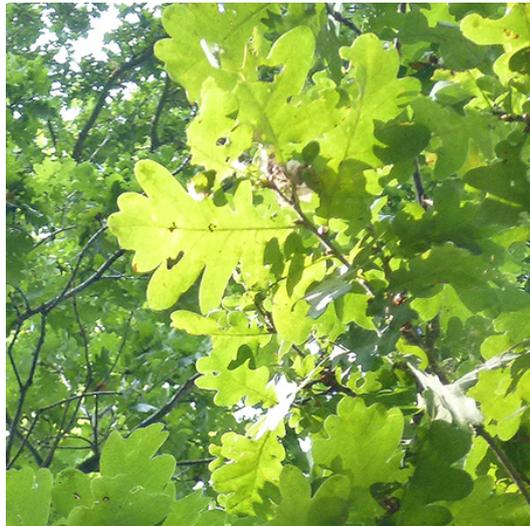


Abb. 40: Natürliche Referenz (Roland Krippner,
Nürnberg/München)

Mit klarer Absetzung von herkömmlichen Produkten zur Verschattung, im Rahmen deren Entwicklung das Augenmerk überwiegend auf der Funktion liegt, wird der Fassadenladen mit Hinblick auf Leitbilder aus der Natur entwickelt. Demzufolge sollen sich mehrlagige Strukturen vor der Gebäudeöffnung mit unterschiedlichen Transluzenzgraden abwechseln und durch ihr Erscheinungsbild und ihrem Schattenwurf eine gehobene Raumqualität durch Tageslichtversorgung schaffen.

Die Möglichkeit zur Lichtdurchlässigkeit, die das ökologische Ausgangsmaterial bietet, kann durch bewusst gewählte Materialstärken gesteuert werden. Der Fassadenladen ist dadurch in der Lage Nutzeranforderungen wie Sicht- und Blendschutz zu erfüllen, die beim Einsatz von herkömmlichen Systemen wie Rollläden oder Raffstore zu kompletter Verdunklung führen und das Zuschalten von Kunstlicht notwendig machen. Neben der Tageslichtversorgung ist auch der Außenbezug durch Erahnen von Tageszeit und Wetterverhältnissen zu jeder Zeit gegeben, selbst wenn sich der Nutzer vor Blicken von außen schützen möchte. Die Qualitäten der Transluzenz des Werkstoffes zeigen sich ganz besonders dann, wenn die Tageslichtnutzung ein wichtiger Faktor des Leistungsprofils darstellt. Auch eröffnen diese



Abb. 41: Technisches Biopolymer PLA
(Peter Bonfig, München)

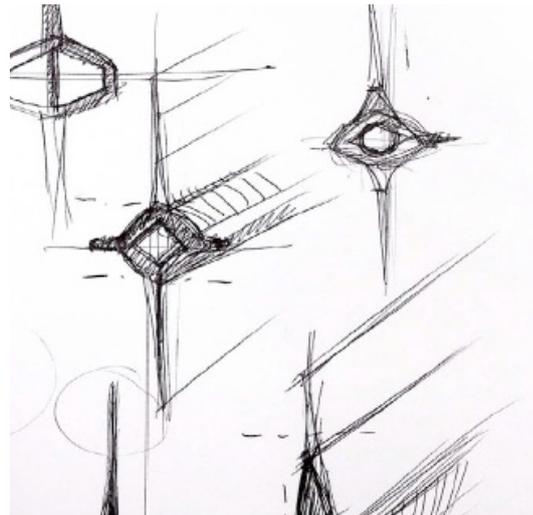


Abb. 42: Skizzenhafte Profilentwicklung
(Peter Bonfig, München)

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

Sachverhalte enormes gestalterisches Potenzial und atmosphärische Wirkungen beim Umgang mit Licht.

Bei der Entwicklung der Baukomponente sind mehrere Schritte notwendig. Eine passende Form der Einzelprofile hinsichtlich funktionaler, mechanischer und gestalterischer Einflussfaktoren wird erarbeitet. Wie diese Profile in der Fläche vor der Gebäudeöffnung angeordnet werden, geschieht auf Grundlage zahlreicher geometrischer Überlegungen die auf Fassadenzonierung, Augenhöhen der Nutzer, Winkeln von Sonnenhöchstständen und weiteren Faktoren beruhen.

Da in der Entwicklungsphase die vorhandenen Arbeitsmittel (Werkstoffe, Anzahl der Extrusionswerkzeuge) ebenso limitiert sind wie der Zeitfaktor für Materialentwicklung und Verarbeitung, galt von Beginn an die Präferenz möglichst universeller Profilgeometrien, die auch mittels weiterer Bearbeitung (z.B. durch Zuschnitte) während der experimentellen Arbeiten variiert werden können. Gleichzeitig sollen sich die Profile in ihrer Wirkung in verschiedenen Lichtsituationen und Anordnungen von bekannten Lösungen wie z.B. mit extrudierten Kunststoff- oder kaltumgeformten Metallprofilen unterscheiden und den angestrebten Merkmalen im Sinne der beschriebenen Konzeption gerecht werden.

Bei der Profilentwicklung kristallisierte sich über ein umfangreiches Variantenstudium ein Grundtypus heraus: Ein statisch wirksamer Kern als Hohlkörper in unterschiedlichen Geometrien und in einer Achse flächige Fortsätze als dünne Flügel (Abb. 42).

Je dünner das technische Biopolymer ausgeführt wird, desto lichtdurchlässiger ist dessen Wirkung. Die Materialstärke der „Flügel“ wurde daher so konzipiert, dass der Gesamttransmissionsgrad bei gutem energetischen Abminderungsfaktor stets zu einem angenehmen Tageslichteintrag führt.

Geometrie

Die Fläche der Flügel ist durch eine kleine Variation der Materialdicke zusätzlich gegliedert. Zum einen erzeugt dies unterschiedliche Lichtwirkungen, von blickdicht zu transluzent, zum anderen kann der leicht hervorgehobene Absatz auch als Kante für die Reduzierung der Profilbreite dienen. Ursprünglich als universell einsetzbares Profil konzipiert, wurde für die weiteren Entwicklungsarbeiten festgelegt, dass das Profil prioritär in einer horizontalen Anordnung (Flügelflächen senkrecht) zum Einsatz kommen soll. Die Profilgeometrie ist Ergebnis funktionaler (Witterungseinflüsse wie Niederschläge mit der Vermeidung von stehendem Wasser am Profil) und konstruktiver (Widerstand in x-Achse gegenüber horizontaler Beanspruchung) Anforderungen. Da auch Verformungen aufgrund von Eigengewicht und

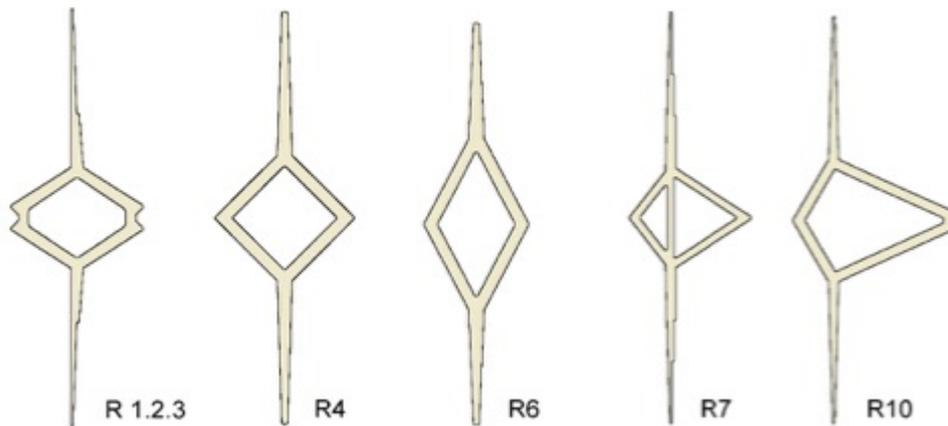


Abb. 43: Prototypische Entwicklungsstudien
(Peter Bonfig, München)



Abb. 44: Profilmuster R 1.2.3.
Ansicht von außen
(THN-AR)



Abb. 45: Profilmuster R 1.2.3.
Ansicht von innen
(THN-AR)

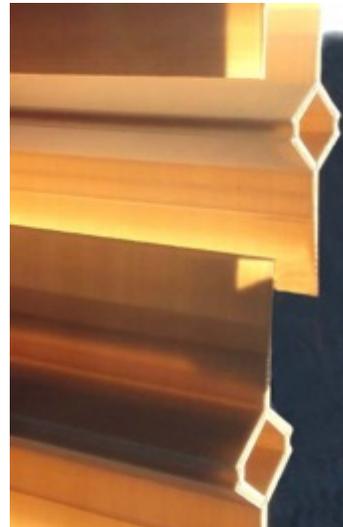


Abb. 46: Profilmuster R 1.2.3.
Anordnung
(THN-AR)

Kriechverhaltens berücksichtigt werden müssen, wurde die Form in der Horizontalen und Vertikalen klar unterschieden. (Abb. 43)

Eine differenzierte Erscheinungsform wird angestrebt, bei der z.B. über Glanzlichter, Körper- und Schlagschatten gegliederte und 'lebendige' Wirkungen entstehen. Auch soll die gegebene Lichttransmission des Werkstoffs bei geringen Wandstärken (ca. 0,5 mm - 5 mm) für Tageslichtnutzung und Erscheinungsform gezielt genutzt werden. War zunächst noch geplant, mittels eines Mutterprofils auch Bauteile für einen Rahmen zu fertigen, erfolgte für die experimentelle Phase zunächst die Entscheidung, konstruktive Elemente (Rahmen, Rippen, Riegel) gegenüber den Extrusionsprofilen in den Flächen zur Regulierung der Durchlässigkeit als sekundäre Elemente (auch bezüglich ihres Flächen- und Materialanteils) zu betrachten. Deren Umsetzung erfolgt daher in anderen (in der Wirkung kontrastierenden) Werkstoffen, vorzugsweise mit hohem Anteil an nachwachsenden Werkstoffen; Metalle sind für hoch beanspruchte Bauteile sinnvoll.

Das letztlich abgestimmte Profil R 1.2.3 (100 mm x 32 mm, Abb. 43 links) weist einen raufenförmigen Kern als Hohlkörper (32 mm x 24 mm) mit leichter Längsstreckung in x-Achse auf. Die Stirnseiten des Kerns sind mit einer konkaven Rille versehen, die eine zusätzliche

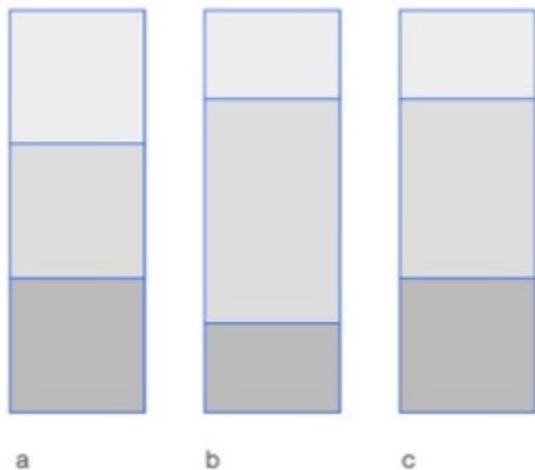


Abb. 47: Zonierung der Fassade
(Peter Bonfig, München)



FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

Abb. 48: horizontale Anordnungsstudien
(Peter Bonfig, München)

Differenzierung der Ansichtsfläche leistet und gleichzeitig einen definierten möglichen Befestigungsort darstellt, z.B. zur Aufnahme von Senkkopfschrauben. Die beiden Flügel (jeweils 37 mm lang) sind asymmetrisch ausgebildet. Die Verjüngung in zwei Stufen von 3 mm auf 0,5 mm erfolgt einseitig, während die andere Fläche lotrecht ausgeführt ist. Dies ermöglicht auch unterschiedliche Varianten der Profilbefestigung über den Flügel.

Nicht nur die Nutzung der vorhandenen Lichttransmission der vorgeschlagenen Werkstoffe (z.B. ARBOBLEND®3016V und 3584V) bei geringen Wandstärken (ca. 0,5 mm – 5 mm) für Tageslichtnutzung und Erscheinungsform des Fassadenladens ist essentiell, sondern auch die Profilgeometrie selbst und die entsprechenden Anordnungsmuster. Eine differenzierte Erscheinungsform wird angestrebt. (Abb. 44 bis Abb. 46)

2.2 Anordnungsstrategie

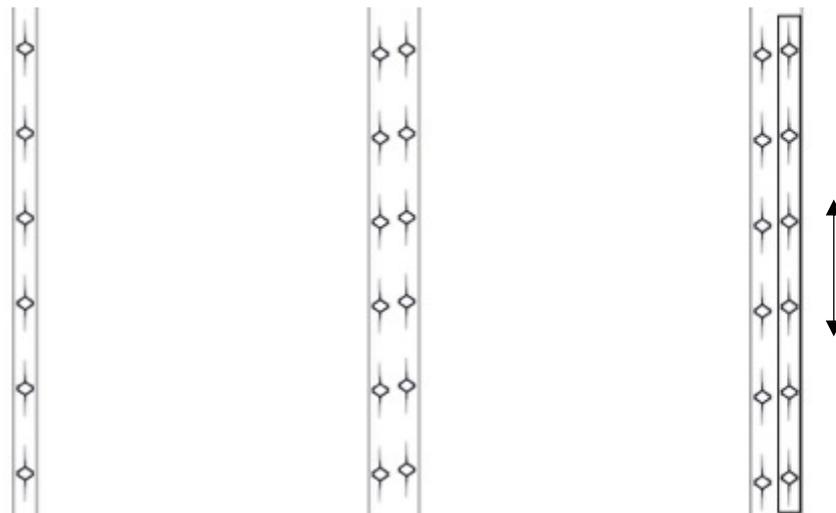
Die Fassadenöffnung kann, je nach ihren spezifischen Abmessungen, in bis zu drei Funktionsbereiche geteilt werden, deren Abmessungen und Proportionen variieren können, z.B. von gleicher Aufteilung (Abb. 47, a), zu stärkerer Betonung des Sichtfelds (Abb. 47, b + c).

An den Brüstungsbereich, bei raumhohen Verglasungen bis circa 1 Meter Höhe, können sich Anforderungen an Sichtschutz stellen. Der Blendschutz ist in dieser Zone nachgeordnet und auch für die Tageslichtversorgung ist dieser Funktionsbereich von untergeordneter Bedeutung.

- Brüstung (untere Zone)
- Sichtfeld (mittlere Zone)
- Oberlicht (obere Zone)

Daran schließt sich das Sichtfeld an, dass im direkten Blickfeld des Nutzers in der Gebäudeöffnung liegt. Das Hauptaugenmerk bei Belegungen in diesem Bereich liegt auf Möglichkeiten zum Außenbezug, Blend- und Sichtschutz. Öffnungen von sogenannten Lochfassaden liegen in aller Regel nur in der Zone des Sichtfelds.

Die oberste Zone stellt das Oberlicht dar, bei der v.a. Anforderungen wie Tageslichtnutzung und Vermeidung von Blendung von Relevanz sind, der Sichtschutz ist nachgeordnet.



FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

Abb. 49: Fassadenladen -
Einlagige Aus-
führung
(THN-AR)

Abb. 50: Fassadenladen -
Zweilagige Aus-
führung
(THN-AR)

Abb. 51: Fassadenladen -
Zweilagig nachführbar
(THN-AR)

Peter Bonfig hat in einer Reihe von Vorarbeiten⁹ eingehend die weithin bekannten und sehr verbreiteten Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten von starren oder beweglichen Strukturen (in horizontaler wie vertikaler Lage) untersucht (Abb. 48). Dabei zeigt sich, dass mittels Überlagerungen bei horizontaler Anordnung des Profils (Längsachse des Profils horizontal) ein guter Witterungsschutz und Sonnenschutz für hohe Sonnenstände gegeben ist.

Bei niedrigen Sonnenständen allerdings müssen horizontal angeordnete Profile weitgehend geschlossen werden, was Durchsicht und Tageslichtnutzung stark einschränkt. Im Falle von transluzenten Materialeigenschaften kann der zuletzt genannte Nachteil abgemindert bis aufgehoben werden. Auch dies spricht für die vorgeschlagenen Profile mit in Teilbereichen ausgedünnten Materialstärken zugunsten der Lichttransmission.

Zur Untersuchung der Leistungsmerkmale wurden für das System Fassadenladen 3 Ausführungen festgelegt. Dabei ergaben die Vorabstudien, dass die Profile, um die Potenziale dieser Anordnungsstrategie vollends ausschöpfen zu können, am besten in zwei Lagen voreinander angebracht werden. Auch eine einlagige Anordnungsvariante wurde untersucht.

- ‚Minimalvariante‘ (Abb. 49), eine einlagige, nach den o.g. Zonen (Abb. 47) gegliederte horizontale Belegung der Fläche ohne bewegliche Teile. Dieser Aufbau soll die solaren Erträge reduzieren ohne dabei die Tageslichtnutzung (Tageslichtquotienten) zu stark zu beeinflussen. Sie kann nicht adaptiv agieren.
- ‚Standardvariante‘ (Abb. 50), in Sichtfeld und Oberlichtbereich zweilagig ausgeführt, ist zur idealen Verschattung der Sommersonne optimiert (Abb. 53 und Abb. 57). Der Abminderungsfaktor soll dabei gegenüber der einlagigen Variante deutlich höher ausfallen.
- ‚Maximalvariante‘ (Abb. 51), Erweiterung der ‚Standardvariante‘ mit einem beweglichen Element, in der zweiten, zur Aperturfläche angeordneten Lage. Dies ermöglicht gute Anpassungen an Sonnen-, Blend- und Sichtschutz sowie Innen-/Außenbezug.
- Die Anforderungen die ein Nutzer an das Verschattungssystem Fassadenladen stellen kann sind vielseitig. Sie reichen von funktionalen (energetische Abminderung) über gestalterische bis hin zu psychologischen (Sichtschutz) Aspekten.

⁹ u.a. Wirkungsprinzipien von beweglichen Fassadenteilen aus nachwachsenden Rohstoffen. Dissertation, München, 2007

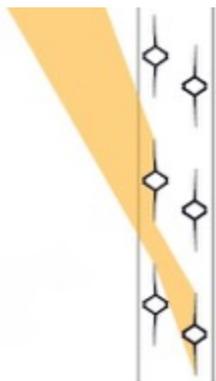


Abb. 52: Sonnenschutz O/W (THN-AR)

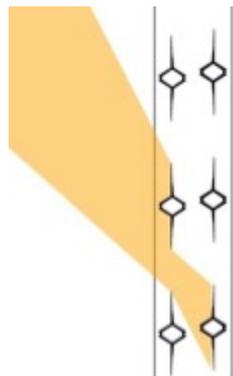


Abb. 53: Sonnenschutz Süd (THN-AR)



Abb. 54: Sicht-/Blendschutz (THN-AR)

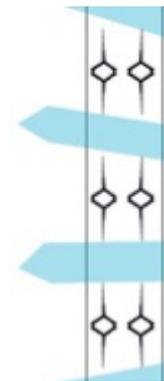


Abb. 55: Ausblick (THN-AR)

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

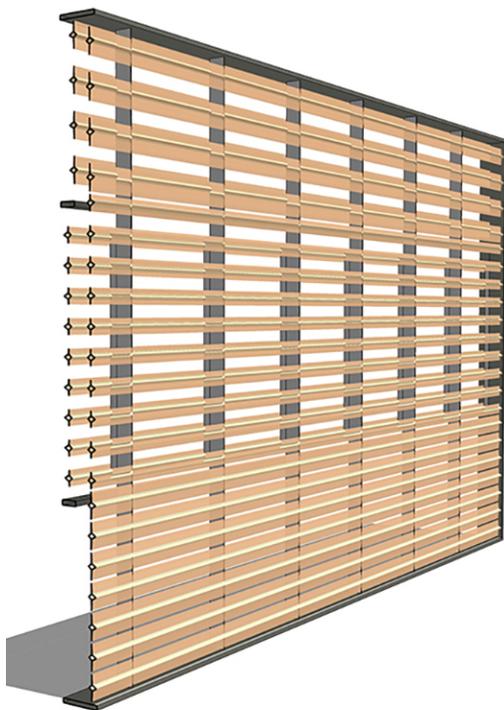


Abb. 56: (links) Gesamtsystem Fassadenladen mit Beispielbelegung in drei unterschiedlichen Zonierungen (THN-AR) (rechts) Vertikale (Ost-Westfassaden) und horizontale Profilanordnung (Sicht-/Blendschutz, Südfassaden) (Peter Bonfig)

Sonnenschutz

Da es sich bei dem Fassadenladen in erster Linie um ein Sonnenschutzsystem handelt und dieser daher mit gängigen Produkten wie Raffstores, in Konkurrenz tritt, erhält die Anforderung nach sommerlichem Wärmeschutz einen hohen Stellenwert. Je nachdem ob sich der Fassadenladen an der Süd- oder Ost-/Westseite eines Gebäudes befindet, wird die Anordnung der Profile zueinander anhand der unterschiedlichen Sonnenstände ermittelt (Abb. 52 und Abb. 53).



Abb. 57: Horizontale Anordnung Sonnenschutz Ost/West (THN-AR)

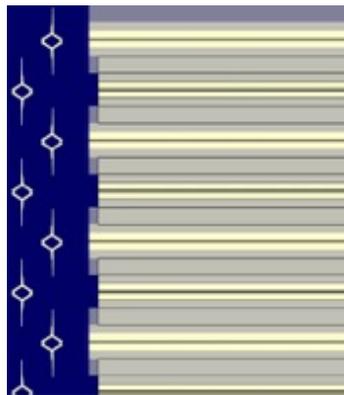


Abb. 58: Horizontale Anordnung Sicht-/Blendschutz (THN-AR)



Abb. 59: Horizontale Anordnung Ausblick (THN-AR)

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

Vorrangiges Ziel ist es, alle in der Kühlperiode (21.03. – 21.09.) auftretenden Sonnenhöchststände verschatten zu können. An der Südfassade umfasst das Sonnenhöhenwinkel von 42° bis 63° , während an der Ost-/Westfassade weitaus tiefere Sonnenstände zu berücksichtigen sind. Da diese das Gebäudeinnere aufgrund von Wandleibung und Rahmenkonstruktion des Fassadenladens nicht erreichen können, wurde die Anordnung ‚Sonnenschutz Ost/West‘ für einen Winkelbereich von bis zu 80° konzipiert (Abb. 52).

Sicht-/Blendschutz

Der Bedarf an Privatsphäre sowie der Wunsch kurzzeitig die Direktstrahlung komplett abschirmen zu können, um Blendung zu vermeiden, führt zu deckungsgleichen Profilanordnungen. Da der Fassadenladen die Aperturfläche vollständig schließen muss (Abb. 54) bedeutet das, dass die innere Lage vertikal in diesen Anforderungen so zu positionieren ist, dass deren Profile die freien Bereiche der äußeren Lage abdecken, mit der Folge, dass ein Sichtbezug zwischen Innen und Außen nicht mehr gegeben ist. Allerdings eröffnet die Transluzenz des biogenen Werkstoffs entscheidende Vorteile gegenüber herkömmlichen Produkten. Zusätzlich ermöglicht der Fassadenladen mit dieser Profilanordnung einen wirksamen Schutz gegen besonders tief stehende Sonne (vor- oder nachmittags an Ost-/Westfassaden).

Ausblick

Ein Außenbezug soll auch mit Sonnenschutzsystemen vor der Fassadenöffnung prinzipiell ermöglicht werden. In dieser Anordnung befinden sich die Profile der beiden Lagen exakt parallel hintereinander; das systemspezifische Maximum an nicht abgedeckter Aperturfläche leistet einen direkten Sichtbezug zwischen Innen und Außen (Abb. 55). In Kombination mit der Transluzenz des biogenen Materials ermöglicht dies wahrnehmungsphysiologisch vom Innenraum aus zusätzlich einen wirksamen ‚bildhaften‘ Bezug zur Umgebung (Abb. 59).

2.3 Leistungscharakteristik

In Ergänzung zu den Simulationsarbeiten erfolgen Vergleiche der drei Fassadenladenvarianten, die jeweils wie ein eigenes Produkt behandelt werden, mit marktgängigen Sonnenschutzsystemen, zur besseren Vergleichbarkeit in Standausführung ohne nennenswerte zusätzliche technische Ausstattungsmerkmale:

- Schiebeladen EHRET MS 54/10 (Rahmen und Horizontallamellen aus Holz)
- Raffstore ROMA FL 80 (Flachlamellen Aluminium) (Abb. 60)
- Rollläden ROMA Rondo K37 (Panzer PVC) (Abb. 61)
- Textilscreen ROMA Copaco Serge 600 (Gewebe Polyester) (Abb. 62)



Abb. 60: Raffstore ROMA FL 80, (ROMA KG)



Abb. 61: Rollladen ROMA Rondo K37, (ROMA KG)



Abb. 62: Textilscreen ROMA (ROMA KG)

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

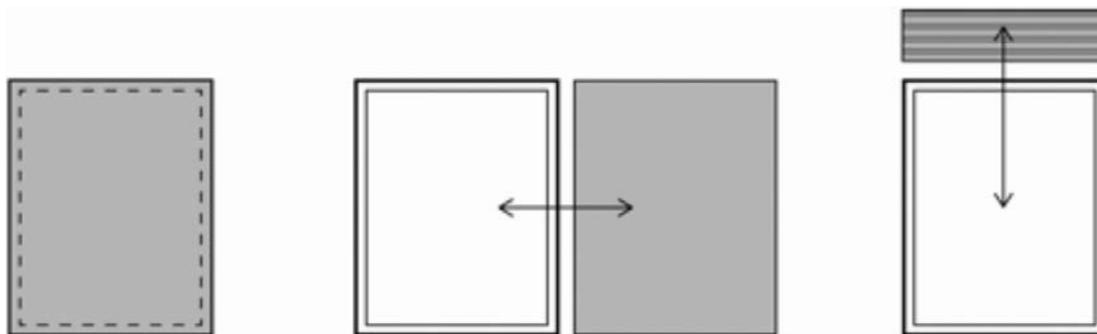


Abb. 63: Beispielhafte Belegungs- und Freistellungsmöglichkeiten von Fensterflächen (THN-AR)

Diese Untersuchungen sind gleichermaßen für die Einordnung und Bewertung der Leistungscharakteristik des Fassadenladens und seiner Belegungsvarianten sowie für die Marktstudien notwendig.

Randbedingungen

Die Sonnenschutzsysteme, die bei Bedarf auch aus der Aperturfläche bewegt werden können, werden jeweils in Position vor der Fassadenöffnung miteinander verglichen (Abb. 63, links). Ziel bei der Bewertung der Leistungscharakteristik ist es aufzuzeigen, inwieweit ein System mehrere Anforderungen gleichzeitig erfüllt (Sonnenschutz und Außenbezug, Tageslichtversorgung und Sichtschutz). Darüber hinaus werden Randbedingungen erfasst, die für die Funktionstüchtigkeit Sonnenschutz erforderlich sind, z.B. das Schiebeläden in unveränderter Größenänderung benachbarte Fassadenflächen bedecken (Abb. 63, mitte), während Rollläden, Raffstores und Textilscreens jeweils systemspezifisch (deutlich) reduzierte Packerungsgrößen im Sturzbereich der Fassadenöffnung aufweisen (Abb. 63, rechts).

Die zur Bewertung herangezogenen Daten für die drei Fassadenladenvarianten (‘Minimal‘-, ‘Standard‘- und ‘Maximalausführung‘) resultieren aus den Simulationen, während für die Referenzprodukte (Raffstore, Textilscreen, Rollladen, Schiebeläden) auf Herstellerangaben (Prüfprotokolle) zurückgegriffen wurde. Mit diesen Angaben wurden in einem digitalen Simulationsraum mit vollverglaster Fassade (Kapitel 3.1) die Sonnenschutzsysteme mit realen Materialkennwerten modelliert und anschließend die lichttechnische und energetische Situation im Raum ausgewertet.

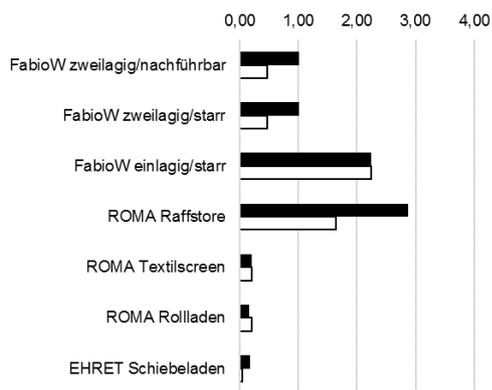


Abb. 64: Tageslichtquotient [-] (schwarz: Süd-, weiß: Ost-/West) „Sonnenschutz“ (THN-AR)

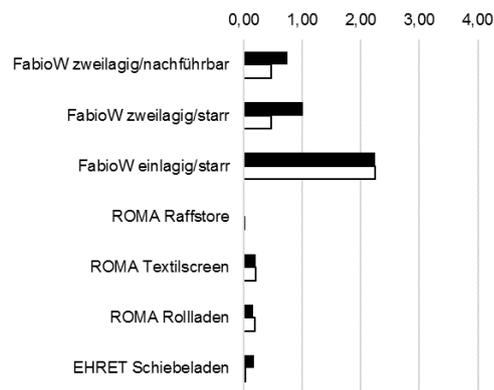


Abb. 65: Tageslichtquotient [-] (schwarz: Süd-, weiß: Ost-/West) „Sicht-/Blendschutz“ (THN-AR)

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

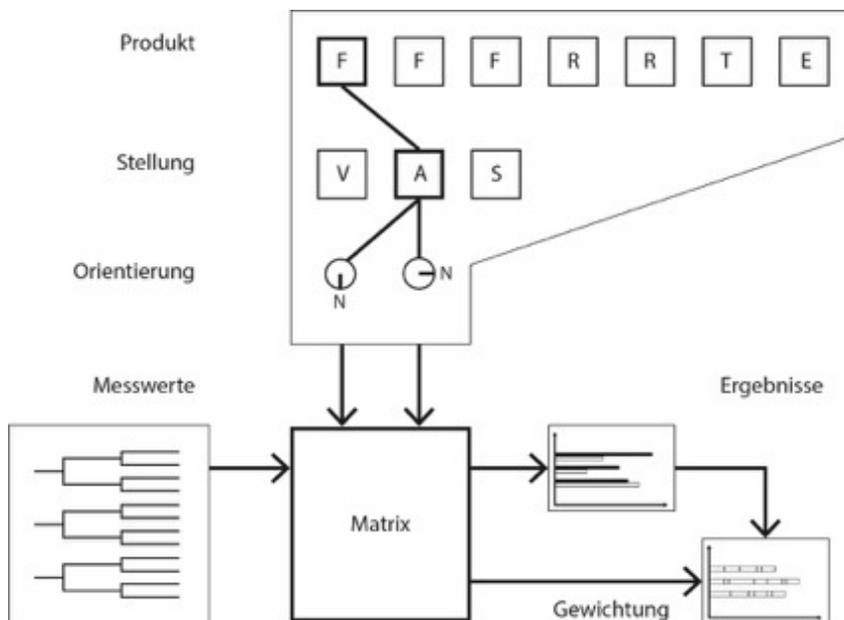


Abb. 66: Systematik der Bewertungsmatrix (THN-AR)

Bewertungsmatrix

In der entwickelten Bewertungsmatrix (Abb. 66) werden die Anforderungen Sonnenschutz, Aussicht und Sicht-/Blendschutz eingehender untersucht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einzelne Stellungen beim Fassadenladen ‚Maximalausführung‘ (Abb. 51), ebenso wie beim Raffstore, jeweils als eigenständiges Produkt behandelt sind. So wird beim Sichtschutz der Raffstore mit geschlossenen Lamellen mit der Fassadenladenvariante in Stellung Sicht-/Blendschutz (Abb. 54) verglichen. Bei nicht-nachführbaren Produkten (Schiebeladen sowie Fassadenladen in ‚Minimal‘- und ‚Standardausführung‘) erfolgt keine derartige Differenzierung. So ist gewährleistet, dass die Leistungscharakteristik auch Aspekte wie Nachführbarkeit und Mehrfachfunktionalität berücksichtigt. Die vorgenommenen Untersuchungen sollen für eine südlich und ost-/westlich orientierte Gebäudeöffnung wesentliche Erkenntnisse zu Tageslichtsituation und Energiebilanz im digitalen Testraum, sowie möglichen Außenbezug und Hinterlüftung der Baukomponente liefern. Dargestellt werden Aspekte wie Tageslichtquotient, Gleichmäßigkeit und Abminderungsfaktor sowohl einzeln als auch, mit Faktoren von 1 bis 10 gewichtet, in kumulierten Gesamtergebnissen.

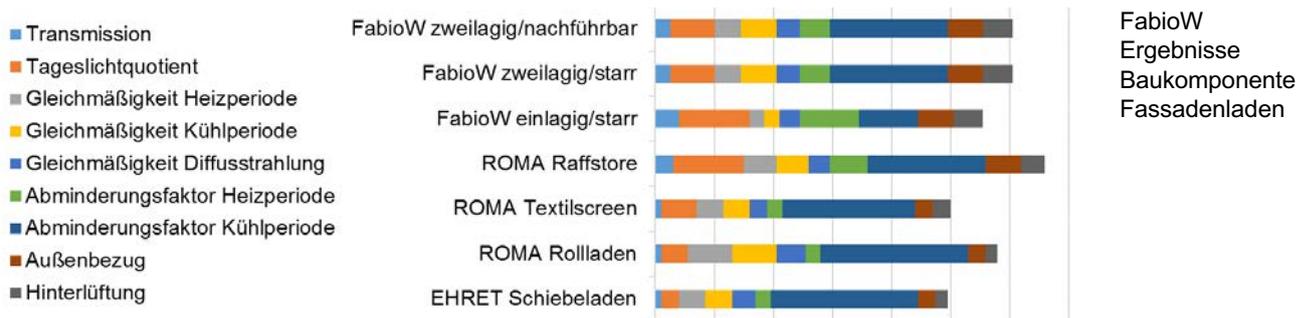


Abb. 67: Ausschnitt aus der Gesamtbewertung, Anforderung „Sonnenschutz“ (THN-AR)

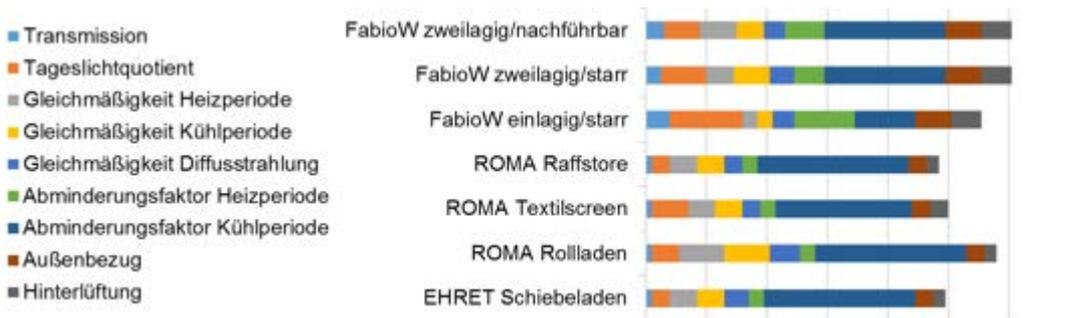


Abb. 68: Ausschnitt aus der Gesamtbewertung, Anforderung „Blend-/Sichtschutz“ (THN-AR)

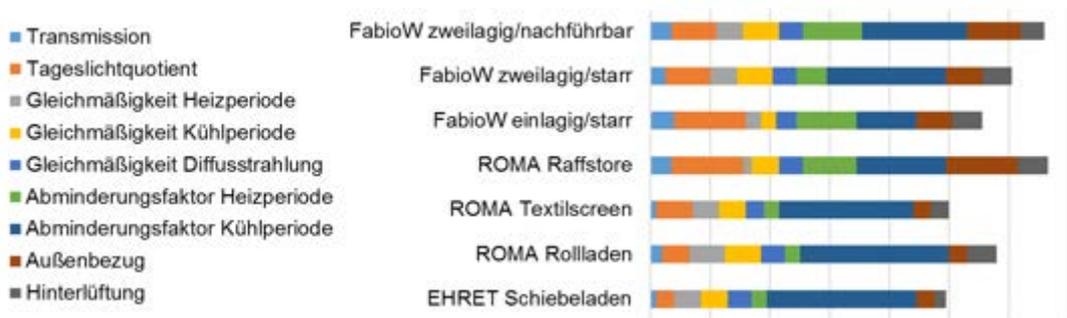
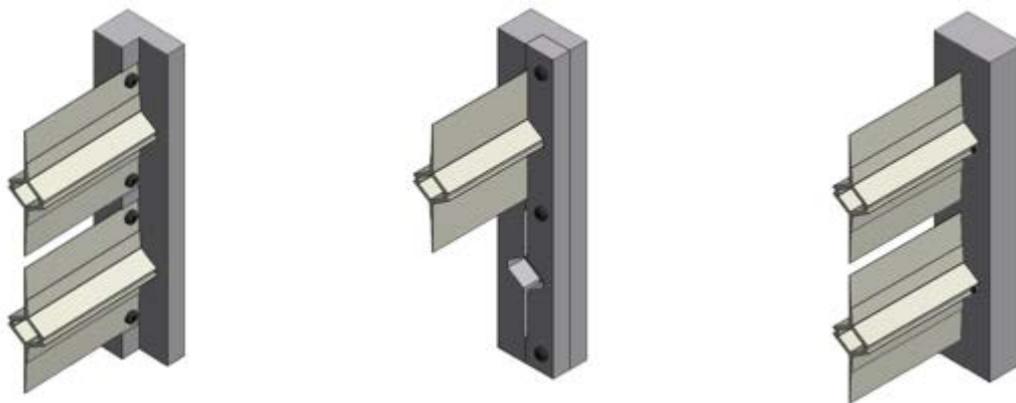


Abb. 69: Ausschnitt aus der Gesamtbewertung, Anforderung „Aussicht“ (THN-AR)

Ergebnisse

Bei der Betrachtung des Tageslicht-Quotienten wird die flexible Einsetzbarkeit des Fassadenladens deutlich. Der Raffstore weist zwar an der Südfassade mit geöffneten Lamellen die höchste Tageslichtausbeute für den Raum aus (Abb. 64, Zeile 4), doch muss dieser bei Anforderungen an Sicht-/Blendschutz vollständig geschlossen werden, was zur fast kompletten Abdunkelung des Raumes führt (Abb. 65, Zeile 4). Dagegen zeigt sich bei den verschiedenen Fassadenladenvarianten aufgrund der optimierten Profilanordnungen und dem transluzenten biogenen Material eine annähernd ähnliche ‚Performance‘ (Abb. 65, Zeile 1, 2, 3). Auch bei den kumulierten Ergebnissen (Abb. 67 bis Abb. 69) wird eine Konkurrenzfähigkeit des Fassadenladens gegenüber marktgängigen Produkten sichtbar. So erreicht die ‚Maximalausführung‘ bei Sonnenschutz und Aussicht vergleichbare Werte wie ein Raffstore. Ferner fällt auf, dass der Fassadenladen in der Gesamtbewertung gleichmäßigere Ergebnisse aufweist, als die untersuchten Referenzprodukte, was auf eine flexiblere Einsatzfähigkeit schließen lässt.



FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

Abb. 70: Lamelle in Falz geschraubt (links), Lamelle in Falz geklemmt (mitte), Lamelle in Nut mit Zapfen verschraubt (rechts) (ROMA KG)

Starre Produkte schneiden zwar insgesamt schwächer ab als anpassbare Systeme (Abb. 69, Zeile 3, 5, 6, 7), da das Kriterium „Abminderungsfaktor Kühlperiode“ jedoch stark gewichtet wird, fällt der Unterschied weitaus geringer aus als erwartet. Schiebeläden, Rollläden und Textilscreens erfüllen mit ‚gezielter‘ Opazität deutlich diese Funktion (Abb. 67 bis Abb. 69, dunkelblauer Balkenanteil).

Der Raffstore, der bei den Anforderungen Sonnenschutz (Abb. 67, Zeile 4) und Aussicht (Abb. 69, Zeile 4) besonders leistungsfähig ist, zeigt bei Blend-/Sichtschutz (Abb. 68, Zeile 4) Defizite, was auf das opake Lamellenmaterial zurückzuführen ist. Hier weist der Fassadenladen Vorteile auf (Abb. 68, Zeile 1, 2, 3), da in der Stellung Sichtschutz eine wirksame Verschattung von besonders niedrigen Sonnenständen im Osten und Westen gelingt.

Der Raffstore zeigt bei Blend-/Sichtschutz (Abb. 68, Zeile 4) ein Defizit, das auf das opake Material und die Tatsache, dass sich die Systeme bei dieser Anforderung komplett schließen müssen, zurückzuführen ist. Hingegen sind die Werte des Fassadenladens unbeeinträchtigt (Abb. 68, Zeile 1, 2, 3). Einher mit dem Schließen für Sichtschutz geht die Verschattung von besonders niedrigen Sonnenständen im Osten und Westen, was die gleiche Stellung erfordert.

Befestigungsmöglichkeiten Profil

In Ergänzung zu den Belegungskonzepten für den Bau von Funktionsmodellen des Fassadenladens galt es für das entwickelte, durchlaufende Extrusionsprofil (als Mehrfeldträger mit reduzierten Biegemomenten) Befestigungsmöglichkeiten am Rahmen der Baukomponente sowie unterstützende vertikale Bauteile (Rippen) aufzuzeigen. Der Rahmen stellt die äußere Begrenzung der Baukomponente dar und dient der Stabilisierung der gesamten Konstruktion sowie der Aufnahme der einzelnen Profile.

Die Geometrie des Profils ist so gewählt, dass prinzipiell punktförmige Verbindungen über die Flügel oder über den Kern (Hohlkörper) erfolgen können, mit konkaven bzw. dreieckförmigen Ausnehmungen für formschlüssige Positionierung in Rahmen und Rippen. Mit Anordnung des asymmetrischen Profils und Tiefe der Ausnehmung kann der Abstand des Profils zur Rippe variiert werden. Darüber hinaus besteht die Option über zweiteilige Rippen und Klemmleisten das Profil zu befestigen. Aus den Grundprinzipien und deren Variationen kristallisierten sich nachfolgende Befestigungsstrategien zur Vertiefung heraus (Abb. 70):

- im Rahmen mit Falz über Flügel verschraubt
- im Falz geklemmt
- in Rille über Kern (Hohlkörper) mit Zapfen verschraubt bzw. vernietet
- stumpf am Rahmen verklebt
- stirnseitig über Kern (Hohlkörper) mit Rahmen verschraubt

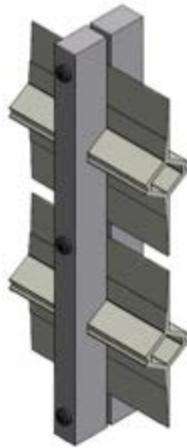


Abb. 71: Lamelle in Sprossen geklemmt (ROMA KG)

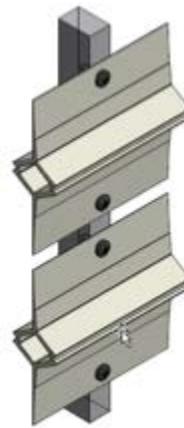


Abb. 72: Lamelle am Flügel mit Sprosse verschraubt (ROMA KG)

Diese Prinzipien werden in den experimentellen Arbeiten anhand diverser 1:1-Muster nachgebildet und hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit sowie der industriellen Verarbeitung eingehend untersucht. Da aktuell davon auszugehen ist, dass das Profil über die maximal zu erzielende Spannweite mittels vertikaler Bauteile (Rippen) zu ‚unterstützen‘ ist, werden nachfolgende Grundprinzipien zur Befestigung vorgeschlagen:

- mittels zweiteiliger Rippe geklemmt und rückseitig verschraubt (Abb. 71)
- über Flügel mit Rippe verschraubt (Abb. 72)

Die verschiedenen Befestigungslösungen wurden bemustert und hinsichtlich folgender Kriterien näher betrachtet:

- Unterschiedliche Längenausdehnung von Profil und Rahmen
- Fertigungstoleranzen von Profil und Rahmen sowie Art der Bearbeitung
- Grundstabilität des Profils
- Materialbeschaffenheit von Profil und Rahmen
- Mögliche zukünftige additive Anforderungen an die Belegung (beweglich, drehbar)
- Maximale und minimale Größen der Baukomponente (Höhe, Breite)

Erste Einschätzungen lassen durchaus positive Erwartungen auf hinreichende Stabilität der einzelnen Profile sowie den Gesamtverbund schließen.

2.4 Funktionsmodelle

Im Vorfeld des Baus erster Funktionsmodelle wurden mittels zeichnerischer Herleitung, digitaler 3-D-Modellierung und mit Hilfe von Mustern im Maßstab 1:1 mögliche Abmessungen und Strukturen der Baukomponente Fassadenladen untersucht. Diese Arbeiten umfassten unterschiedliche Belegungsvarianten und den Einsatz verschiedener Materialien (Aluminium, Holz, Biopolymer) bei Rahmen und Unterstützungen (Rippen und Riegel). Darüber hinaus wurden Detaillösungen für Profil-/Rahmen Knotenpunkte und Eckverbindungen erarbeitet.

Begleitend erfolgten Versuche im Klimaschrank um die durchgeführten statischen Vorbeurteilungen anhand genauerer Materialkennwerte zu konkretisieren. (Kapitel 2.7.1)

2.4.1 Materialvarianten

Um die konzipierten Anordnungsprinzipien der Kunststoffprofile in erste 1:1 Funktionsmodelle umzusetzen wurden verschiedene Rahmen und Unterstützungen (Rippen und Riegel,



Abb. 73: Fassadenladen mit vertikaler Anordnung der Profile, Rahmen aus Fichte (THN-AR)



Abb. 74: Fassadenladen mit Brüstungs- und Sichtfeld, horizontale Anordnung der Profile, Rahmen aus Douglasie (THN-AR)



Abb. 75: Fassadenladen mit Brüstungs- und Sichtfeld, Rahmen aus PLA (THN-AR)



Abb. 76: Fassadenladen mit Brüstungs-, Sichtfeld und Oberlicht, Rahmen aus Aluminium (ROMA KG)

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen



Abb. 77: Rahmen mit Zapfen zur Profil-Aufnahme (THN-AR)



Abb. 78: Rahmen mit Kerben zur Profil-Aufnahme (THN-AR)

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

die auch eine sichtbare Trennung der Brüstungs-, Sicht- und Oberlichtbereiche ermöglichen) getestet und gebaut. (Abb. 73 bis Abb. 76)

Für den Bau von außenliegenden Sonnenschutzsystemen wie Dreh-, Klapp- und Schiebeläden haben sich in der Baupraxis eine Reihe von Materialien, Konstruktionsvollhölzer, Holzwerkstoffe, eine Vielzahl von Metallen und Metalllegierungen, sowie konventionelle Kunststoffe (in der Regel PVC) bewährt. Für den Bau von Modellen der Baukomponente Fassadenladen liegt neben Ausführungen in Leichtmetall der Fokus auf nachwachsenden Rohstoffen.

Handmuster wurden aus Fichte gefertigt, ein Demonstrator für Bewitterungsversuche (Kapitel 2.7.1) im Freien aus Douglasie. Die Befestigung der Profile am umlaufenden Rahmen wurde hier durch eine weitere Rippe im Randbereich realisiert. Dieser Fassadenladen besteht aus 2 Feldern, Brüstungszone und Sichtfeld mit unterschiedlichen Profilanordnungen.

Die Materialeigenschaften bestimmen den zu wählenden Querschnitt. Bei Metallen kann z.B. auf Standardprofile mit C-Querschnitt oder geschlossene Vierkantrohre zurückgegriffen werden. Einher mit der Materialentscheidung geht auch die Notwendigkeit entsprechender Oberflächenbehandlungen. So müssen die meisten Hölzer für den Einsatz im Freibereich behandelt und Metalle beschichtet werden. Ausnahme bei Hölzern stellen Douglasie und Lärche, bei den Metallen Edelstahl, dar. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Ökobilanz des Gesamtsystems, die ebenfalls die graue Energie, d.h. die Energiemenge die u.a. für Herstellung, Transport, Entsorgung eines Produktes benötigt wird, berücksichtigt. Hier weisen nachwachsende Materialien aus regionaler Herstellung deutlich Vorteile auf.

Holz-Rahmen

Die Herstellung der Rahmenkonstruktion erfolgte mit gängigen holz- und ingenieurtechnischen Fügungsmethoden; als Verbindungsmittel werden beim Bau von Funktionsmodellen zunächst einfache Holzschrauben eingesetzt. Eingestellte Unterstützungen wie Rippen (vertikal) oder Riegel (horizontal) sind stumpf am umlaufenden Rahmen gestoßen und stirnseitig verschraubt. (Abb. 77 und Abb. 78)

Biopolymer-Rahmen

Bei der Materialauswahl für die Rahmenkonstruktion der Baukomponente Fassadenladen sind spezifische Eigenschaften wie E-Modul und Wärmeausdehnungskoeffizient zu berücksichtigen. Nach aktuellem Stand ist es ebenfalls möglich für Rahmen und Unterstützungen das biobasierte Material (PLA / ARBOBLEND® 3896V) zu verwenden. (Abb. 75)

Dazu wurde zunächst ein Rechteck-Profil entworfen, das sich durch Trennung mit einer Kreissäge in zwei weitere, ein nahezu quadratisches sowie ein verkleinertes Rechteck-Profil, teilen lässt. So könnten mit einem Ausgangsprofil die Bauteile für den umlaufenden Rahmen, die Rippen und den Riegel hergestellt werden. Allerdings liegen die ermittelten Wandstärken von 5 bis 8 mm noch deutlich über den für den Extrusionsprozess maximalen



Abb. 79: Fassadenladen (Aluminium) mit zweilagiger Profilanordnung, Sichtfeld geöffnet (ROMA KG)



Abb. 80: Fassadenladen (Aluminium) mit zweilagiger Profilanordnung, Sichtfeld geschlossen (ROMA KG)

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

3,5 mm. Daher wurde für erste Testzwecke ein ‚Standard‘-Rechteckprofil (108 mm x 25 mm x 1,5 mm) der Fa. Joma-Polytec verwendet. Für die Eckverbindungen dieser Hohlprofile bieten sich als Alternative zu Metallbauteilen maßgefertigte Verbindungszapfen aus Holz an.

Aluminium-Rahmen

Zur vorbereitenden Beurteilung der Funktionsmodelle und zur Abstimmung der Geometrie für den Prüfstand beim Fh-IBP in Holzkirchen/Valley (Kapitel 4.3) sind erste 1:1-Demonstratoren mit den zweilagigen Belegungsvarianten „Brüstung“, „Sichtfeld“, und „Oberlicht“ gebaut worden. (Abb. 76)

Aus Zeitgründen und der Einfachheit halber wurden stranggepresste Aluminium-Vierkantrohre als Rahmenmaterial verwendet. (Abb. 79 und 80) Darüber hinaus wurden sechs Funktionsmodelle für den kalometrischen Fassadenprüfstand des Fraunhofer Institutes in den Dimensionen 2500 mm x 1600 mm gefertigt.

Fazit: Der erreichte Stand kann als sehr positiv gewertet werden. Die im Projekt avisierten Ziele, neuartiger funktionaler Ansätze und ästhetischer Wirkungen, sind sowohl hinsichtlich Profilgeometrie wie auch Flächenbelegung bereits vollständig erreicht.

2.5 Weitere Funktionsmodelle

Der Fassadenladen als ‚universeller‘ Baukasten soll nicht nur vor raumhohen Verglasungen eingesetzt werden, wo er mehrere Fassadenzonen belegt, sondern auch kleinere Gebäudeöffnungen bedecken können. Darüber hinaus stellt sich die Frage der Nach- bzw. Umrüstung von bestehenden außenliegenden Sonnenschutzsystemen wie Dreh-, Klapp- oder Schiebeläden.

Beispielhaft wurde ein bestehender Drehladen-Flügel aus Holz mit Kunststoffprofilen nachgerüstet; Ziel war die Erprobung von Einbaubedingungen sowie die Überprüfung der Einflüsse auf die ursprüngliche Funktion und Gestalt und etwaiger Optimierungspotenziale.

Bei dem Fensterladen handelt es sich um einen herkömmlichen Drehladen (350 mm x 1000 mm) aus Fichtenholz. Gefertigt ist der Rahmen mit Schlitz- und Zapfen-Eckverbindungen. Aktuelle Produkte sind meist nur mehr gedübelt. Auf etwa Zweidrittelhöhe ist ein Querriegel zur Unterteilung und Aussteifung angeordnet. Die Original-Lamellen wurden starr mittels Taschenfräsungen beim Verleimvorgang eingesetzt. Die Neigung und geschuppte Anordnung der Lamellen minimiert zum einem den Lichteinfall und gewährleistet die Wasserabführung. (Abb. 81 bis Abb. 84)



Abb. 81: Klappladen (Fichte): Belegung mit Fassadenladenprofil (THN-AR)



Abb. 82: Klappladen (Fichte): Belegung mit Fassadenladenprofil - Skalierung auf 60 % (THN-AR)



Abb. 83: Klappladen (Fichte): Belegung mit Fassadenladenprofil - Skalierung auf 60 %, abgeschnittene Flügel (THN-AR)



Abb. 84: Klappladen (Fichte): Belegung mit Fassadenladenprofil – abgerundete Einschnitte für Außenbezug (THN-AR)

Zunächst war zu klären, in welchem Maß und Umfang man in die Bestandssubstanz eingreift um das Nachrüsten zu ermöglichen und Montagepunkte zu schaffen. Da der Bestandsladen möglichst wenig angetastet werden sollte, wurden schmale Einsatzrahmen mit umlaufender Schattennut gebaut, mit denen für die Befestigung der Kunststoffprofile auf bereits im Funktionsmodellbau eingesetzte Kerben- und Zapfenverbindungen zurückzugriffen werden konnte, die auch eine nicht sichtbare Verschraubung leisten. Bei dieser Einbauvariante sind die Lamellen starr eingebaut.

Um bei vollflächiger Belegung einen Außenbezug herzustellen, wurden durch Abtrennen bzw. teilweises Einschneiden der Flügelenden Variationen der Konfiguration der Kunststoffprofile erprobt. Es zeigt sich jedoch, dass die relativ große Profildicke von 100 mm in den kleinen Öffnungsfeldern noch nicht durchgängig hinsichtlich der Flächenbelegung und -gliederung überzeugt. Dies führte zu Überlegungen zur Verkleinerung des Kunststoffprofils. Für die Skalierung wurden zwei Grundtypen: R 1.2.3 und R 10 ausgewählt.

Bei beiden Profilen erfolgt eine Verkleinerung um 50 %, unter Berücksichtigung wichtiger Aspekte der Verarbeitbarkeit. So sollten die ‚Flügel‘ eine Materialstärke von 0,8 mm nicht unterschreiten. Weitere Optimierungsschritte führen zu den Versionen Rs 1.2.4, Rs 1.2.5, sowie Rs 10.1 und Rs 10.2. Ferner sollten die Wandstärken möglichst einheitlich ausgebildet werden. Neben der Reduzierung des Materialeinsatzes eröffnet die Profilverkleinerung auch eine flexiblere Maschinenauswahl bei der Extrusion (Herstellung und Abmusterung). Die Spannweiten betragen je nach Variante zwischen 53 cm und 78 cm.

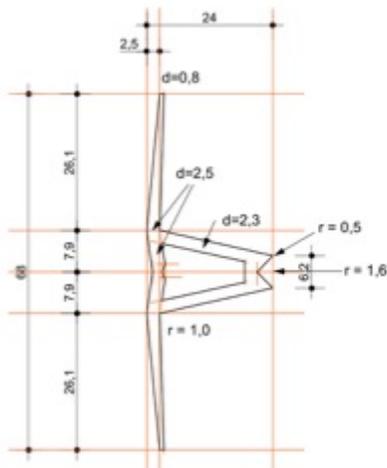


Abb. 85: Profil D1.3.1 (Peter Bonfig)

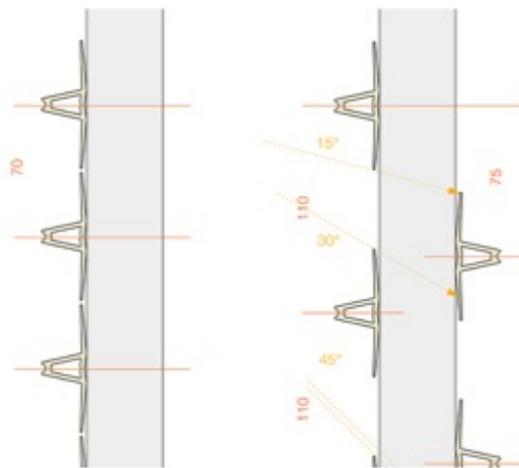


Abb. 86: Anordnungsbeispiele Profil D1.3.1 (Peter Bonfig)

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

Auf Grundlage dieser Überlegungen wurde eine weitere kleinere Profilgeometrie mit den Abmessungen von 68 x 24 mm (h x b) entwickelt. (Abb. 85 und 86) Diese weist einen asymmetrischen Kern auf und kann daher alternativ mit der flachen Seite an einer Rippe befestigt werden. Diese Verkleinerung, insbesondere der Flügellängen, ermöglicht zusätzlich bessere Extrusionsergebnisse bei der Maßhaltigkeit und Ebenheit der Flügelspitzen. (Abb. 31 und Abb. 32, Seite 24)

2.6 Schnittstellen zum Gebäude

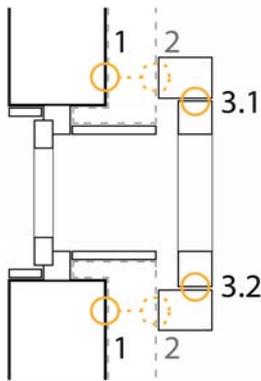
Um den Fassadenladen am Gebäude befestigen zu können, sind bei der Ausführung als horizontaler Schiebeladen unterschiedliche Verbindungspunkte mit jeweils spezifischen Anforderungen zu klären. Wesentliche Schnittstellen sind: (Abb. 87)

- Fassadenladen > Laufschiene (oben) mit Rollapparatur.
- Laufschiene (oben) mit Rollapparatur > Trägerprofil
- Trägerprofil/Wandwinkel > Außenwand
- Fassadenladen > Führungsschiene (unten)
- Führungsschiene (unten) > Trägerprofil
- Trägerprofil > Außenwand

Für diese Schnittstellen wurde eine Art morphologischer Übersicht erstellt, die neben verschiedenen Bewegungsarten (horizontal schieben, vertikal klappen etc. marktübliche Wandaufbauten bzw. Fassadenkonstruktionen enthält.

Anhand verschiedener Beispiele sowie Fotomontagen von Außenansichten (Abb. 88 bis Abb. 91) kann in einer zweiten FabioW-Projektphase eine Ausarbeitung zu einer Konstruktionsmethodik erfolgen. Ziel ist es, zur Vorbereitung von Funktionsmodellen am Markt verfügbare Bauteile und objektspezifische Lösungen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten für den Fassadenladen zu analysieren und potentielle Einbausituationen, für Neubauten und Sanierungsmaßnahmen, zu dokumentieren. Mit dem entstandenen Bildmaterial wurden u.a. die Marktstudien hinsichtlich ihrer Anschaulichkeit unterstützt. (Kapitel 5)

Grundsätzlich kann der Fassadenladen wie tradierte Fensterläden oder andere bekannte Lösungen mit flächigen Bauteilen zur Abdeckung von Fenster-/Fassadenflächen, mit all ihren Bewegungsarten (Schieben, Klappen, Falten) und -richtungen sowie Weisen der Befestigung/Integration, eingesetzt werden. Bei außenliegenden Sonnenschutzsystemen sind die



FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

Abb. 87: (links) Notwendige Schnittstellen, 1 (Massive) Wand – Außenkante, 2 Außenkante – Führungsschiene, 3 Führungsschiene – Fassadenladen, (THN-AR)
(rechts) Horizontaler Schiebeladen (Leichtmetall) (Roland Krippner)

verwendeten Bewegungen oftmals eine Kombination verschiedener Prinzipien. Für die Untersuchungen der Schnittstellen zum Gebäude und den Bau von Funktionsmodellen wurde insbesondere der horizontal verschiebbare Fassadenladen näher betrachtet.

Den verschiedenen Bewegungsarten stehen unterschiedliche Wandaufbauten gegenüber. Vier Typen wurden für Wohnungs- und Verwaltungsbauten exemplarisch ausgewählt.

- monolithisches Mauerwerk (Massive Wand)
- Mauerwerk (Massive Wand) mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS)
- mehrschichtiger Wandaufbau in Holzrahmenbauweise
- Pfosten-Riegel-Fassade

	Schiebeladen		Klappladen		Fallladen		
	horiz.	vert.	horiz.	vert.	horiz.	vert.	
Bewegungsrichtung	horiz.	vert.	horiz.	vert.	horiz.	vert.	starr
Scharnier			✓		✓	✓	
Pendelscharnier				✓			
Laufschiene	✓	✓			✓	✓	
Winkel							✓
Teleskopschiene/-stab				✓			
Rasterschiene		✓		✓		✓	

Tab. 7: Bauteile für verschiedene Ausführungen des Fassadenladens (THN-BI)
horiz. = horizontal; vert. = vertikal

Als Grundlage für Fallstudien ist zu berücksichtigen, dass der Wandtyp (Ausbildung der Tragschicht) die Art der Befestigung bestimmt und dass die Lage der Baukomponente zur Fassade, Lastabtragung, Bautoleranzen, sichtbare / nicht sichtbare Befestigung und



Abb. 88: Einbausituation Fassadenladen: Klinker-/Natursteinfassade, Verwaltungsgebäude (THN-AR)



Abb. 89: Einbausituation Fassadenladen: Holzfassade, Wohngebäude (THN-AR)

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

Führung sowie Gestaltung weitere wichtige Parameter darstellen, welche die Auswahl der Befestigungsart beeinflussen.

Beim Einsatz beweglicher Baukomponenten (Abschlüsse oder Manipulatoren¹⁰) in der Fassade sind neben Bewegungsart und Bewegungsrichtung eine Reihe weiterer konstruktiver, funktionaler und gestalterischer Aspekte zu berücksichtigen:

- Unterteilung des Elements/Paketierungsgröße
- Lage zur Klimagrenze
- Lage zur Öffnung

Die Möglichkeit der Größenänderung von Abschlüssen (Paketierungsgröße) ist für das Erscheinungsbild der Einbausituation entscheidend. Beim Fassadenladen lässt sich die potentielle Veränderung in den Abmessungen in unverändert und reduziert unterscheiden. D.h. als horizontaler Schiebeladen handelt es sich um eine einteilige Baukomponente, deren Abmessungen der zu überdeckenden Aperturfläche entspricht. (Abb. 63, Seite 37) Daher müssen links oder rechts der Öffnungen ausreichend opake Flächen für die Paketierung zur Verfügung stehen. Um diese Fläche zu reduzieren ist die Ausbildung als einteiliger Drehladen um Vertikalachse (Fensterladen) ebenso denkbar (Abb. 81 bis 84) wie als mehrteiliger Fallladen um Vertikalachse, bei denen sich die Abmessungen um Faktor 2 bis 4 verkleinern lassen.

Bzgl. der Lage zur Klimagrenze sind ebenfalls mehrere Anordnungen möglich. Als wirksames Sonnenschutzsystem wird man den Fassadenladen in der Regel außen, distanziert, als auch räumliche Begrenzung des Fassadenraumes, z.B. bei einem Wartungsgang (Abb. 88), oder mit Abstand zur Öffnung (Abb. 89) einsetzen.

¹⁰ Im Gegensatz zur DIN EN 12216 wird dieser Begriff im „Fassaden Atlas“ (2004) für Fassadenkomponenten mit veränderbaren Eigenschaften benutzt. Herzog, Thomas; Krippner, Roland; Lang, Werner: Fassaden Atlas München 2/2016, S. 267ff.



Abb. 90: Einbausituation Fassadenladen (horizontale Anordnung der Profile): Wohnzimmer (THN-AR) ¹¹



Abb. 91: Einbausituation Fassadenladen (vertikale und horizontale Anordnung der Profile): Küche (THN-AR) ¹²

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

Allerdings besteht auch die Möglichkeit einer witterungsgeschützten Integration in die Fenster-/Fassadenebene bei mehrschaligen Konstruktionen.

Die Lage zur Öffnung ist abhängig von Bewegungsart und Bewegungsrichtung. In der Regel wird der Fassadenladen seitlich der Öffnungen ein- oder mehrseitig eingesetzt. Als Drehladen um Horizontalachse (Klappladen) oder als vertikaler Schiebeladen sind auch Anordnungen oberhalb und unterhalb der Aperturfläche denkbar. Die Steuerung des Fassadenladens kann manuell, je nach Bedarf durch den Nutzer, oder mechanisch, durch einen automatischen Antrieb, erfolgen. Aufgrund des geringen Gewichts der Baukomponente wäre es ebenfalls möglich, mehrere Abschlüsse gemeinsam zu betätigen.

Der Fassadenladen als universeller Baukasten ist ebenfalls in der Lage, in der Flächenbelegung Zwischenzustände einzunehmen. Durch die Anordnung der Profile in einer zweiten Ebene, z.B. im Bereich des Sichtfeldes, als vertikaler Schiebeladen ist eine feinabgestufte Dosierung der Eigenschaften der Durchlässigkeit möglich, d.h. eine Regulierung des Lichteinfalls und dem damit verbundenen Ausblick nach draußen bzw. Einblick nach Innen. Durch diese Schiebewegung lässt sich auch der Spalt zwischen den Profilen linear verändern und für eine wirksame Hinterlüftung der Baukomponente gut einstellen.

Belegung und Anordnung sowie Kinematik eines Fassadenladens mit seinen opaken, transluzenten und transparenten Flächenanteilen ist stets im Kontext der Gebäudefassaden zu entwickeln. Dabei ergeben sich weit mehr Möglichkeiten an Lösungen und Gestaltungsspielraum, als es zum Beispiel Raffstoren oder Rollläden erlauben.

Die Untersuchung von verschiedenen Einbausituationen anhand Nürnberger Fassaden mit unterschiedlichen Bekleidungsmaterialien (Klinker, Naturstein, Holz und Metall) zeigen die hohe Anpassungsfähigkeit und strukturelle Kompatibilität der Baukomponente. Hinsichtlich der im Licht eher ‚neutralen‘ Wirkung lässt sich der Fassadenladen ebenso gut mit der verschiedenen Eigenfarblichkeit (mehr angleichend oder stärker kontrastierend) der Oberflächen kombinieren.

Ergänzende Innenraumrenderings zeigen des weiteren sehr positive atmosphärische Wirkung auf Innenräume. Hierbei wird auch das unterschiedliche Erscheinungsbild des Fassadenladens deutlich, der im Licht betrachtet opak wirkt (Abb. 88 und 89) und im Gegenlicht transluzent (Abb. 90). Bei über Eck angeordneten Öffnungen sind auch unterschiedliche Flächenbelegungen denkbar, um deren Ausrichtung zur Himmelsrichtung und den damit verbundenen Sonnenstand zu reagieren. So sind besonders auf Ost- und Westseiten vertikale, und auf der Südseite horizontale Anordnungen der Profile sinnvoll. Auch kann der Spalt zwischen den Profilen innerhalb der verschiedenen Fassadenzonen (Abb. 47, Seite 33) je nach Bedarf variieren. (Abb. 91)

¹¹ Abbildung Viktoria Residenz, <https://viktoria-residenz.de>, 19.12.2018, bearbeitet

¹² Abbildung Architekturbüro HONEYANDSPICE, <https://www.honeyandspice.de/>, 19.12.2018, bearbeitet

2.7 Statische Vorbemessungen

Lasteinwirkungen

Grundsätzlich sind folgende Lasteinwirkungen sowie deren Kombinationen zu untersuchen:

- Eigengewicht
- Starkwindereignis
- Schneelast
- Vereisung
- Einwirkungen aus hohen Temperaturen

Bei den Einwirkungen aus Wind auf Außenjalousien unterscheidet die DIN EN 13659 zwischen einem nominalen Winddruck und einem Sicherheitswinddruck. Erstgenannter Winddruck stellt sicher, dass keine Beeinträchtigungen der Funktion durch große Verformungen oder Beschädigungen auftreten. Der rechnerische Ansatz des Sicherheitswinddruckes hat die Aufgabe eine Gefährdung von Personen auszuschließen. Prinzipiell ist beabsichtigt den Fassadenladen hinsichtlich des Einsatzes sowohl bei kleineren, wie auch bei größeren Gebäuden und auch bezüglich des Gebäudestandortes nicht übermäßig stark einzuschränken. Es empfiehlt sich dennoch den möglichen Einsatz zunächst auf eine maximale Gebäudehöhe von 18 m zu begrenzen und eine Verwendung in Küstengebieten auszuschließen. Unter Beachtung der genannten Randbedingungen ergeben sich folgende Ansatzwerte für den nominalen Winddruck und den Sicherheitswinddruck:

- Nominaler Winddruck: $q_N = 0,27 \frac{kN}{m^2}$
- Sicherheitswinddruck: $q_S = 0,40 \frac{kN}{m^2}$

Das spezifische Gewicht des Profilmaterials beträgt $1,3 \text{ g/cm}^3$ und ist für die Einwirkungen aus Eigengewicht entsprechend anzusetzen. Eine teilweise Vereisung der Profile ist bei liegenden Profilen denkbar und kann eine länger andauernde Belastungssituation darstellen. Da der momentane Planungsstand von sogenannten stehenden Profilen ausgeht, kann eine signifikante Einwirkung aus Vereisung ausgeschlossen werden. Sollten weitergehende Überlegungen auch zur Verwendung liegender Profile führen, ist die Möglichkeit einer teilweisen Vereisung entsprechend der definierten Einwirkungskombination zu berücksichtigen.

Anforderungen an die Tragfähigkeit und die Verformung

Prinzipiell ist zwischen kurzzeitig und langfristig einwirkenden Größen und deren Einfluss auf die Tragfähigkeit und die Verformung zu unterscheiden. Die Windbeanspruchung zählt zu den kurzzeitig einwirkenden Größen. Insbesondere die Lastspitzen, welche für die Auslegung zu berücksichtigen sind, treten nur für sehr kurze Zeit auf. Die Wahl einer zulässigen Größe für die Verformung wird unter anderem darüber bestimmt, dass der Fassadenladen als Ganzes und dessen Mechanik und Befestigungselemente nicht unbegrenzt Verformungen aufnehmen können. In der Baupraxis haben sich zulässige Werte für Kurzzeitverformungen von in etwa $1/250$ der Bauteillänge bewährt. Aufgrund der Besonderheit des Fassadenladens und der nur äußerst selten in voller Größe einwirkenden Windbeanspruchung erscheint ein zulässiger Wert von $1/100$ der Bauteillänge als ausreichend.

Der Betrachtung der Langzeitverformung infolge von Eigengewicht kommt insbesondere bei horizontal montierten Profilen eine größere Bedeutung zu. Recht kleine Verformungen werden vom Betrachter bereits als störend empfunden. Die Langzeitverformungen werden von einigen Faktoren, auch Materialparametern beeinflusst, die sich zum jetzigen Zeitpunkt des Projektes nur pauschal abschätzen lassen. Als gebräuchliche Größe zur Abschätzung von Langzeitverformungen hat sich ein Wert in der Größe der vierfachen elastischen Verformung etabliert. Die Versuche an den Profilen zeigen, dass sich in der Realität Verhältnis zwischen Langzeitverformung und elastischer Verformung von ca. 3,0 ergeben wird.

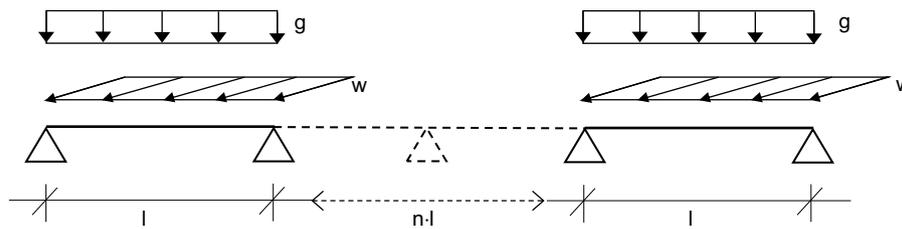


Abb. 92: Mechanisches Berechnungsmodell mit relevanten Einwirkungen (THN-BI)

l: Länge eines einzelnen Feldes zwischen Unterstütungen

n: Anzahl der Felder

g: vertikale Belastung infolge Eigengewicht

w: horizontale Belastung infolge Wind

In der Baupraxis hat sich für vergleichbare Fälle ein zulässiger Wert für Langzeitverformungen von in etwa 1/400 bis 1/500 der Bauteillänge bewährt. Für die Berechnungen der Tragfähigkeit und der Verformung wurden die Eigenschaftswerte auf baurelevante Größen übertragen und für ARBO-BLEND®3896V verwendet.

Berechnung der Tragfähigkeit und der Verformung des Profils

Umfangreiche Vorüberlegungen zur möglichen Verformung der Profile infolge Eigengewichts bei Temperaturen größer 55 °C, führen zu der Annahme, dass die Profile in der Länge mehrfach zusätzlich zu unterstützen sind. Der Abstand dieser Unterstütungen ist mit dem in Abb. 92 dargestellten mechanischen Modell zu berechnen.

Die Tragfähigkeit der Profile ist definiert über das Verhältnis der maximal auftretenden Querschnittsspannung σ_{max} zur Streckspannung R_s . Für genauere Betrachtungen sind einerseits die Einwirkungen und andererseits der Materialwiderstand, definiert über die Streckspannung mit Sicherheitsaufschlägen γ_i zu versehen. In einer ersten Näherung wird davon ausgegangen, dass ein kombinierter Sicherheitsaufschlag γ der Größe 2,0 ausreichend groß ist.

$$- \frac{\sigma_{max}}{R_s} \cdot \gamma \leq 1,0$$

Übermäßig große Verformungen beeinträchtigen die Funktion und Gebrauchstauglichkeit der Profile und des Fassadenladens. Darüber hinaus können vom Betrachter bereits sehr kleine Durchbiegungen in Feldmitte der Profile als störend empfunden werden. Die Einwirkungen auf die Profile können als gleichmäßig einwirkende Linien- bzw. Flächenlasten angesetzt werden. Maßgebend ist die maximale Verformung w_{max} in Feldmitte eines jeden Profils der Länge l, welche in vorliegendem Fall, wie folgt berechnet werden kann:

$$- w_{max} = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{5}{384} \cdot q \cdot l^4$$

Für den Fall einer Langzeiteinwirkung ist die berechnete Größe mit einem Faktor zur Berücksichtigung sich einstellender plastischer Verformungen über die Zeit, zu multiplizieren. Durch Verformungsversuche wurde dieser Faktor zu 3,0 bestimmt. Der Grenzwert der zulässigen Verformung ist abhängig von Art und Dauer der Einwirkung.

Sowohl die kurzzeitigen Verformungen als auch die Langzeitverformungen spielen eine maßgebende Rolle für die Dimensionierung des Profils und dessen Länge.

2.7.1 Lastannahmen, Anforderungen und Festlegung von Spannweiten

Die Unterteilung der Fläche durch Rippen ermöglicht eine statische Vorbemessung der einzelnen Profile als Mehrfeldträger. Felder können in Mittel- und Randfeld unterteilt werden. Aufgrund der Durchlaufwirkung können die Profile in den Mittelfeldern weiter frei spannen als in den Randfeldern. Anhand der Berechnungen zeigen ein Verhältnis zwischen Seiten- und Mittelfeld von 1:1,25 als besonders effizient. Für den konkreten Einsatz sind jedoch Bezüge zur modularen Ordnung z.B. von Pfosten-Riegel-Fassaden oder zu Abmessungen und Proportionen von Öffnungen maßgebend.

Durch Materialversuche im Klimaschrank konnten anhand von sechs Versuchsaufbauten die Spannweiten der Kunststoffprofile genauer definiert werden. Untersucht wurden stehende und liegende Profile, mit und ohne Flügel, die jeweils auf unterschiedliche Arten fixiert sind.

Es zeigt sich, dass die größten Verformungen in den ersten Stunden, knapp über 50 °C, einsetzen. Die auftretenden Durchbiegungen in Feldmitte betragen, je nach Versuchsaufbau, zwischen 3 und 8 mm. Die Ergebnisse, auf Basis des nicht vollständig auskristallisierten Werkstoffs, sind insgesamt als durchaus positiv zu bewerten, allerdings ist noch die Langzeitverformung bei Kunststoffen (> 4 Tage) zu berücksichtigen.

Bei vollständiger Auskristallisation besteht die Möglichkeit, das PLA als Material für Rippen und ggf. Rahmen einzusetzen. Bei den nun möglichen Profillängen ist das Flächenträgheitsmoment nicht mehr der maßgebende Parameter, sondern der Wärmeausdehnungskoeffizient. Dieser liegt bei ± 3 mm/m (20 °C) und würde bei einem 4,25 m langen Profil zu einer Längenänderung von $\pm 12,75$ mm führen. Hier könnte eine Verkleinerung des Profils eine Optimierung darstellen. Auf Grundlage eines Skalierung-Stützweite-Diagramms wird für eine erste Entwurfsreihe ein Verkleinerungsgrad von 50% gewählt. Für die der Witterung ausgesetzten Baukomponente stellt sich aus den Lastfällen Eigengewicht, Windlast, Schneelast, Eislast und Temperatur die Kombination von Eigengewicht, Windbeanspruchung bei gleichzeitiger Einwirkung von hoher Temperatur als maßgebend heraus. Das außenliegende System ist Wind und Witterung ausgesetzt, sodass das System entsprechend bemessen werden muss.

Eigengewicht

Im bisherigen Projektverlauf wurde sich vorwiegend auf „stehende“ Profile konzentriert. Dadurch greift das Eigengewicht um die starke Achse, die Windeinwirkung um die schwache Achse an. Aus der Dichte des Materials ARBOBLEND@3896V $\rho = 1,3 \frac{g}{cm^3}$ und dem Querschnitt des Profils $A = 3,2787 cm^2$ ergibt sich eine Gleichstreckenlast von:

$$- g_k = \rho \cdot A \cdot g = 1,3 \frac{g}{cm^3} \cdot 3,2787 cm^2 \cdot \frac{1 kg}{1000 g} \cdot \frac{1000 g}{1 m} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 4,18 \frac{N}{m}$$

Die maximal zulässige, ständige Verformung auf Grund des Eigengewichts wurde auf l/400 festgelegt.

Windeinwirkung

Nach DIN EN 13659 wird zwischen nominalem Winddruck und Sicherheitswinddruck unterschieden. Der erste ist anzusetzen, um die Gebrauchstauglichkeit sicherzustellen; der zweite hingegen, um die Sicherheit von Personen zu gewährleisten.

Küstengebiete und Gebäudehöhen über 18 Meter wurden in dieser Phase des Projekts ausgeschlossen. Daraus resultiert die Anforderung, dass keine störenden Verformungen unter Einwirkung des nominalen Winddrucks $p_N = 0,027 kN/m^2$ der Windwiderstandsklasse 5 auftreten. Weiterhin muss das System dem Sicherheitswinddruck $p_S = 0,040 kN/m^2$ standhalten. Das Ziel, die Baukomponente in Windwiderstandsklasse 5 einzuordnen, stellt eine geringe Erhöhung der Windlast im Vergleich zum ersten Zwischenbericht dar.

Die maximal zulässige kurzzeitige Verformung auf Grund der Windeinwirkung wurde auf l/100 festgelegt.

Schneelast und Eislast

Die Berücksichtigung von Schnee- und Eislasten für die aktuell geplanten stehenden Profile entfällt aus den folgenden drei Gründen: Erstens bieten die stehenden Lamellen sehr wenig horizontale Fläche, auf der sich Schnee- oder Eismengen sammeln könnten. Des Weiteren sind diese Einwirkungen nicht als ständig zu betrachten, sodass deutlich höhere Verformungen zulässig wären. Abschließend ist anzumerken, dass für Schnee- oder Eislasten der höhere E-Modul für niedrige Temperaturen angesetzt werden kann, wodurch geringere Verformungen zu erwarten sind.

Temperatur

Das Materialverhalten von ARBOBLEND®3896V hängt stark von dem betrachteten Temperaturbereich ab. So ist der E-Modul temperaturabhängig und das Langzeitverhalten oberhalb oder im Bereich des Glasübergangs (um 55 °C) für den Anwendungsfall als Fassadenladen relevant.

Des Weiteren spielt die thermische Ausdehnung für die maximal zulässigen Profillängen und möglichen Stützweiten eine große Rolle. Anhand des Wärmeausdehnungskoeffizient für ARBOBLEND®3896V lässt sich abschätzen, dass die maximale Längenänderung eines Profils (eingebaut bei 20 °C) in der Anwendung ca. ±3 mm pro Meter und Seite beträgt. Aufgrund der hohen thermischen Ausdehnung wird im Folgenden von maximal drei Meter langen Profilen mit zwei Unterstützungen ausgegangen, obgleich rechnerisch als Drei-Feld-Träger weit aus höhere Spannweiten möglich wären (Abb. 30, Seite 23).

Kombination von Eigengewicht, Windbeanspruchung und hoher Temperatur (Langzeitverhalten von ARBOBLEND®3896V unter Last)

Materialkennwerte wie z.B. der E-Modul sind mit genormten Prüfverfahren vergleichsweise schnell zu bestimmen (Abb. 2). Das Langzeitverhalten hingegen, wie z.B. das Verformungs- bzw. Kriechverhalten im Einsatz, wird üblicherweise nur in einem verkürzten - aber für den Anwendungsfall relevanten - Zeitbereich im Labor erfasst. Zusätzlich zur Begrenzung der Prüfzeiten müssen Festlegungen zur möglichst realitätsnahen Nachstellung von Belastungsbedingungen im Labor getroffen werden. Mit diesen Ergebnissen werden Abschätzungen zur Materialschädigung und zum Bauteilausfall vorgenommen.

Um Aussagen zum Langzeit- bzw. Kriechverhalten von ARBOBLEND®3896V unter Last zu erhalten (Fall B „Mittleres Windereignis + Eigengewicht als kurzzeitiges Ereignis bei $T_{\text{Fassade}} \geq 55^{\circ}\text{C}$ “ und Fall C „Eigengewicht als dauernd wirkende Belastung bei $T_{\text{Fassade}} \geq 55^{\circ}\text{C}$ “), wurden folgende zu erwartende Einwirkungen durch auftretende Temperaturen, Luftfeuchtigkeit und Lasten nachgestellt und das Verformungsverhalten der Profile der Geometrie. R 1.2.3 gemessen (Abb. 20, Seite 18).

Versuchsaufbau und Prüfbedingungen

Die Versuche wurden in einem Wechselklimaschrank (Fa. BINDER Modell MKF 240) durchgeführt. Der zugängliche Temperaturbereich liegt bei -40 °C bis 180 °C, der zugängliche Feuchtebereich zwischen 10 % r. F. und 98 % r. F. (r. F.: relative Luftfeuchtigkeit). Für Versuche außerhalb des Standardklimabereichs (A) erfolgte nur die Regelung der Temperatur.

Auf eigens angefertigten Holzböcken wurden die Profile lose aufgelagert. Deren Verformung in Profilmitte wurde zum einen mit angelegten Messuhren (zur Durchführung von Differenzmessungen) und zum anderen mit dem Anlegen eines Kombinationswinkels erfasst und auch fotografisch dokumentiert.

Der Versuchsaufbau wurde möglichst praxisnah aufgebaut und vereinfacht durchgeführt, dennoch erlauben die Ergebnisse erste Aussagen zum Verformungsverhalten und zur Bauteilauslegung, die jedoch durch weitere Bewitterungstests (u.a. künstliche Bewitterung gemäß DIN EN ISO 4892-2/ Xenotest) und Langzeitbeobachtungen im realen Einsatz ergänzt werden müssen. Folgende potentielle Messeinflüsse auf die Versuchsergebnisse sind gegeben: (Abb. 93 und Abb. 94)

- Messuhren: Elastische Anfangsverformung der Profile, Differenzmessungen, Temperatureinfluss, Anlegen der Messuhren an die Profile, visuelles Ablesen der Messuhren
- Stehende Profile: Verkippen der Flügel beim Erwärmen
- Einzelmessungen



Abb. 93: 90 cm Profil mit abgenommenen Flügeln im Wechselklimaschrank mit angelegter Messuhr und Kombinationswinkel zur Erfassung der auftretenden Verformung in der Profilmitte (THN-BI)



Abb. 94: 90 cm Profil mit angebrachten Prüfgewichten (450 g) als Einzellast von 4,5 N (THN-BI)

FabioW
Ergebnisse
Baukomponente
Fassadenladen

Die durchgeführten Verformungsversuche in der Wechselklimakammer betrachten lediglich den Einfluss von Temperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Lasten, die beispielsweise ein Windergebnis nachstellen sollen. Darüber hinaus sind weitere Einflüsse durch UV-Strahlung, Reinigungsmittel und sonstige Umwelteinflüssen denkbar, die in einem anderen Zusammenhang abgeprüft werden müssen.

Konstante Temperatur von 80 °C und konstante Luftfeuchtigkeit von 17 % r. F.

Mit diesen Versuchsbedingungen sollen die in den Sommermonaten am Profil auftretenden Maximaltemperaturen mit der entsprechenden Luftfeuchtigkeit nachgestellt werden.

Für Sommertage mit Lufttemperaturen bis zu 40 °C wurde angenommen, dass an der Fassade bzw. den Fassadenladenprofilen Temperaturen von bis zu 80 °C auftreten können. Ein Sommergewitter bei 40 °C, das zu einer Luftfeuchtigkeit von 100 % r.F. führen würde, entspricht rechnerisch einer Luftfeuchtigkeit von 17 % r. F. bei 80 °C.

Mehrfache Wechsel zwischen hohen (80°C) und niedrigen Temperaturen (0 °C bzw. -30 °C)

Mit mehrfachen Temperaturwechseln soll das Erweichungs- und Verformungsverhalten des Kunststoffes bei mehrfachen Durchlaufen des Glasübergangsbereichs eingehender charakterisiert werden.

Anmerkung: Temperaturmessungen an und in den Profilen, die als Fassadenladen an eine Fassade angebracht wurden, ergaben deutlich niedrigere Maximaltemperaturen als 80 °C (im Bereich von 55 °C). Diese Messungen erfolgten jedoch erst nach den hier beschriebenen Verformungsversuchen. Jedoch liegen die Maximaltemperaturen übereinstimmend oberhalb des Glasübergangs des Materials ARBOBLEND®3896V und berücksichtigen somit diesen Verformungs- und Anwendungskritischen Temperaturbereich.

Charakterisierung des Langzeitverformungsverhaltens unter Last (Nachstellung eines mittleren Windereignisses)

Die bei einem mittleren Windereignis auftretende Biegespannung von 1 N/mm² wird bei 90 cm Profillänge über eine statisch ruhende Einzellast von 4,5 N simuliert. Die Einzellast wurde durch Prüfgewichte (450 g) in der Profilmitte erzeugt.

Einfluss der Anordnung auf Verformungsverhalten und Konturabgleich des Profilquerschnitts

- Untersuchung der Durchlaufträgerwirkung: 90 cm Profil mit 50 cm Auflagerabstand
- Konturabgleich: Ausmessung des tatsächlichen Profilquerschnitts

Für die Ermittlung der realen Profilquerschnitte wurden vier zufällig ausgewählte Profilabschnitte herangezogen, die an jeweils beiden Enden mithilfe eines Messschiebers vermessen wurden. Die daraus resultierenden Mittelwerte wurden danach für die Berechnung aller wichtigen Querschnittswerte benutzt und mit den Werten der geplanten Geometrie des Profils R 1.2.3 verglichen.

Profil R 1.2.3	Wert nach technischer Zeichnung	Mittelwert der Extrudate
I_y [mm ⁴]	96957	99694
I_x [mm ⁴]	17396	23120
A [mm ²]	327,9	327,6

Tab. 7: Konturabgleich für das Profil R 1.2.3 und resultierende Querschnittswerte der Profilextrudate (THN-BI)

Für die zweite Profilgeometrie konnten bislang noch keine Konturabgleiche erstellt werden, weswegen nur die errechneten Querschnittswerte angegeben werden.

Profil D 1.3.1	Wert nach technischer Zeichnung
I_y [mm ⁴]	33126
I_x [mm ⁴]	10763
A [mm ²]	197,6

Tab. 8: Konturabgleich für das Profil D 1.3.1 und resultierende Querschnittswerte der Profilextrudate (THN-BI)

Die maximale Länge der Einfeldträger des Profils D 1.3.1 wurde zu $l = 95 \text{ cm}$ berechnet.

Ergebnisse für R 1.2.3

In allen Fällen der durchgeführten Versuche erfolgte der größte Verformungsanteil beim Aufheizen ab ca. 50 °C und innerhalb der ersten 24 bis 48 Stunden. Für alle untersuchten Profile und Versuchsbedingungen scheint nach ca. 48 Stunden der überwiegende Verformungsanteil so gut wie abgeschlossen zu sein. Die Versuchsdauer wurde daher nicht weiter ausgedehnt und die folgenden Aussagen beziehen sich auf die im untersuchten Zeitraum erhaltenen Werte bzw. auf Vermutungen über den darüberhinausgehenden Zeitbereich.

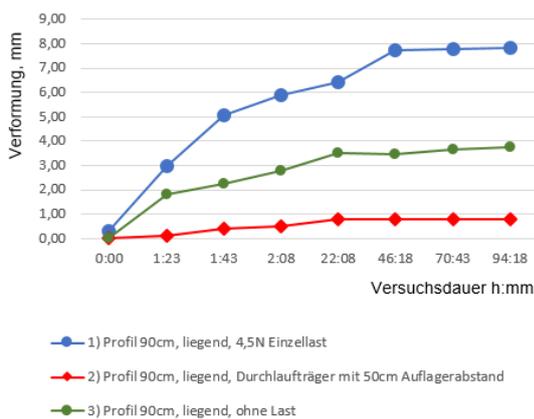


Abb. 95: Verformungen beim Aufheizen von Raumtemperatur auf 80 °C und anschließend bei konstanter Temperatur von 80 °C und konstanter Luftfeuchtigkeit von 17 % r. F. bei liegender Profilanordnung (THN-BI)

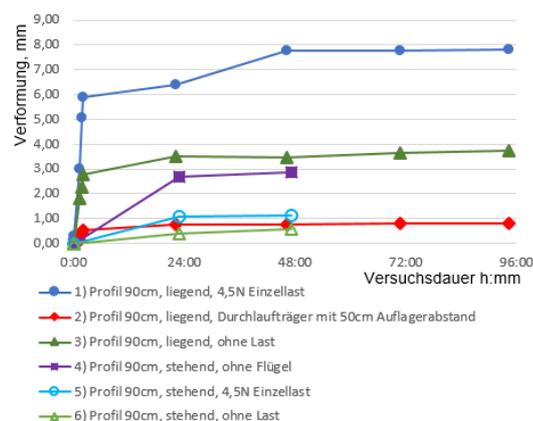


Abb. 96: Verformungen bei konstanter Temperatur von 80 °C und konstanter Luftfeuchtigkeit von 17 % r.F. bei verschiedenen Profilanordnungen (THN-BI)

Erwartungsgemäß zeigt das liegende Profil mit einer Einzellast von 4,5 N die größte Verformung mit ca. 8 mm am Versuchsende. Im Vergleich zu stehend angeordneten Profilen zeigt sich des Weiteren eine größere Verformung auf Grund des niedrigeren Flächenträgheitsmoments bei gleichbleibendem Querschnitt. Die Flügel des liegenden Profils erhöhen das wirksame Flächenträgheitsmoment äußerst wenig (<1%), wohingegen die Querschnittsfläche und damit das Gewicht der Flügel etwa 35% betragen. Deshalb stellen sich durch Kürzung der Flügel kleinere Verformungen für liegende Profile ein.

Das mehrfache Durchlaufen des Glasübergangsbereichs bei Temperaturwechseln zeigte keinen zusätzlichen, nennenswerteren Einfluss auf das Verformungsverhalten. Auch in diesem Fall erfolgt der größte Verformungsanteil beim erstmaligen Aufheizen ab ca. 50°C. Vermutlich kristallisiert das Material nach der Extrusion nicht vollständig und es kommt beim Wiedererwärmen zu einer einmaligen Rekristallisation mit einem großen Verformungsanteil. Dieses Verhalten ist für den Kunststoff PLA typisch und muss vermutlich für die praktische Anwendung berücksichtigt werden.

In der Baupraxis hat sich ein zulässiger Wert für Langzeitverformungen w_{∞} von in etwa 1/400 bis 1/500 der Bauteillänge l bewährt. Langzeitverformungen infolge von Eigengewicht werden über die vierfache elastische Verformung w_{el} (d.h. die theoretische Langzeitverformung entspricht der vierfachen elastischen Kurzzeitverformung mit einem E-Modul für höhere Temperaturen $E=2000$ MPa) theoretisch abgeschätzt. Tab. 9 gibt einen Überblick über die Verhältnisse der praktisch ermittelten Langzeitverformungen zum Versuchsende zur elastischen Verformung. Diese Verhältnisse bewegen sich zwischen den Werten 2,0 und 3,0. Die Unterschiede zwischen liegenden und stehenden Profilen sind durch die komplexe Geometrie bedingt. Um die Langzeitverformungen in keinem Fall zu unterschätzen wird der Faktor $f = 3,0$ angenommen.

		1)	2)	3)
80 °C 17 % r.F.				
a)	stehend 	$l/1607$ $\frac{w_{\infty}}{w_{el}} \approx 1,9$	$l/796$ $\frac{w_{\infty}}{w_{el}} \approx 1,8$	
b)	liegend 	$l/241$ $\frac{w_{\infty}}{w_{el}} \approx 3,0$	$l/115$ $\frac{w_{\infty}}{w_{el}} \approx 2,9$	$l/633$ $\frac{w_{\infty}}{w_{el}} \approx 7,3$
c)	liegend, ohne Flügel 	$l/315$ $\frac{w_{\infty}}{w_{el}} \approx 2,3$	-	-

Tab. 9: Überblick über die praktisch ermittelten Langzeitverformungen zum Versuchsende zur elastischen Verformung (THN-BI)
 $\frac{w_{\infty}}{w_{el}}$: Verhältnis der Langzeitverformung (nach längerer Versuchsdauer bei hoher Temperatur) zu berechneter Kurzzeitverformung (berechnete elastische Verformung mit einem E-Modul für höhere Temperaturen, $E=2000$ MPa)
 l : Profil-/Bauteillänge

Neuberechnung der Spannweiten

Für die Berechnung der Spannweiten wird die Kombination der beiden Einwirkungen durch Eigengewicht und Windeinwirkung sowie der E-Modul für höhere Temperaturen $E=2000$ MPa berücksichtigt.

Wenn das Profil stehend verbaut wird ($I_y = 96957 \text{ mm}^4$, $I_x = 17396 \text{ mm}^4$), ergeben sich unter Verwendung eines Faktors „3“ zur Berücksichtigung der Langzeitverformung und einer Verformungsgrenze „ $l/400$ “ für ständige Verformungen und „ $l/100$ “ für kurzzeitige Verformungen folgende zulässige Profillängen:

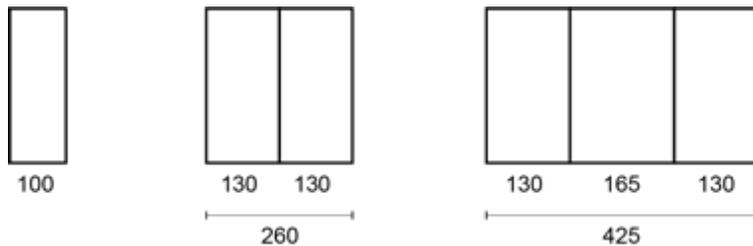


Abb. 97: Spannweiterehöhung der Einzelfelder aufgrund der Durchlaufwirkung des Mehrfeldsystems (THN-AR/THN-BI)

- Einfeldträger: 1,00 m
- Randfeld Durchlaufträger: 1,30 m
- Mittelfeld Durchlaufträger: 1,65 m

Wird das Profil um die äußeren Flügelteile gekürzt, reduziert sich das Flächenträgheitsmoment auf einen Wert von $I_y = 31853 \text{ mm}^4$ um die starke, $I_x = 17345 \text{ mm}^4$ um die schwache Achse. Die zulässigen Profillängen ergeben sich zu:

- Einfeldträger: 1,05 m
- Randfeld Durchlaufträger: 1,40 m
- Mittelfeld Durchlaufträger: 1,75 m

Die leicht größeren Stützweiten resultieren aus einer geringeren Windangriffsfläche bei gleichzeitig kaum geschwächtem Flächenträgheitsmoment um die schwache, vom Wind angegriffene Achse. Es wurde zwar ein deutlich geringeres Flächenträgheitsmoment um die starke Achse erhalten, während die Fläche und damit das Eigengewicht in geringerem Maße abnahmen, so begrenzt jedoch bei Profil ohne Schwächung die Verformung aus Windlast die Stützweiten, wodurch die Verformung aus Eigengewicht Reserven beinhaltet.

Wird das Profil um die kompletten Flügelteile gekürzt reduziert sich das Flächenträgheitsmoment auf einen Wert von $I_y = 21271 \text{ mm}^4$. Die zulässige Profillänge ergibt sich zu:

- Einfeldträger: 0,75 m
- Randfeld Durchlaufträger: 1,00 m
- Mittelfeld Durchlaufträger: 1,25 m

Fazit

- Bei durchlaufenden Profilen sind Feldlängen von bis zu 1,65 m realisierbar
- Einfeldträger sind mit einer Feldlänge von bis zu 1,0 m realisierbar
- Bei durchlaufenden Profilen mit einer Kürzung der äußeren Flügelteile sind Feldlängen von bis zu 1,25 m realisierbar
- Bei Einfeldträgern mit einer Kürzung der äußeren Flügelteile sind Feldlänge von bis zu 0,75 m realisierbar

3 Simulation

Eine hohe Varianz bzw. Bandbreite der energetischen, licht- und lüftungstechnischen Minimal- bzw. Maximalwerte soll durch Beweglichkeit in Teilbereichen des Verschattungssystems Fassadenladen erzielt werden, dadurch ergeben sich unterschiedliche und teilweise widersprüchliche Anforderungen.

Energie-, licht- und lüftungstechnische Kennwerte

Ein möglichst geringer solarer Transmissionsgrad (τ_e), bei hoher Selektivität, d.h. gleichzeitig guter Tageslichtnutzung und ein dabei möglichst hoher Strahlungsreflexionsgrad (ρ_e) des Fassadenladens, führen zu einer Verringerung der sekundären Wärmeabgabe (q_i) über langwellige Strahlung und Konvektion an den Raum durch eine geringere Erwärmung des Elements sowie des Fassadenzwischenraumes und somit zu einem geringeren Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} . Eine Vollverschattung der Gebäudeöffnung bei geringer Einschränkung der Durchsicht bzw. der Tageslichtnutzung soll dabei durch Bewegbarkeit des Fassadenladens ermöglicht werden, wodurch auch eine Blendung des Nutzers durch hohe Leuchtdichtekontraste aufgrund transluzenter Materialien vermieden werden kann. Über diese Flexibilität können während der Wintermonate solare Wärmeeinträge genutzt und somit der Heizenergiebedarf gesenkt werden. Ein möglichst hoher Lichttransmissionsgrad (τ_v) führt zu einer höheren Raumhelligkeit und damit zu einem geringeren Kunstlichtbedarf und einer geringeren Wärmeentwicklung im Raum. Ausreichende Öffnungsflächen zur natürlichen Raumlüftung und passiven Kühlung bei geschlossenem Fassadenladen sind unter Berücksichtigung von Wind, Wetter und Einbruchsicherheit sicherzustellen.

3.1 Modellerstellung

Zunächst erfolgt die Erstellung eines Simulationsmodells zur Bewertung des Energie- und Lichtdurchgangs nach VDI 6007-2 (2012-03) für verschiedene Anordnungen der Einzelprofile des Fassadenladens und anschließendem Vergleich mit ausgewählten Referenzsystemen. Ziel der Berechnungen ist die Ermittlung der energetischen Kenngrößen.

- Abminderungsfaktor des Sonnenschutzsystems (F_c)
- Gesamtenergiedurchlassgrad in Kombination mit der Verglasung (g_{tot})
- lichttechnische Kenngrößen (Lichttransmissionsgrad τ_v)
- Gesamtlichttransmissionsgrad in Kombination mit der Verglasung ($\tau_{v,tot}$)

Diese Berechnungen erfolgen auf Basis des Programms „EES – Engineering Equation Solver“ der Firma F-Chart, Madison, USA.

Berechnungsansatz

Die Modellierungsansätze der VDI-Richtlinie 6007-2 (2012-03) werden erweitert und dabei zusätzlich die Temperaturen der einzelnen Schichten bzw. der Zwischenräume mit Hilfe der solaren Einstrahlung und der konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_c bzw. Wärmeaustauschkoeffizienten h_v zwischen den einzelnen Schichten bestimmt. Mit Hilfe dieser Temperaturen lassen sich die konvektiven Wärmeübergänge für natürlich durchlüftete Zwischenräume und schließlich der sekundäre Wärmeabgabegrad q_i des jeweiligen Systems berechnen. In Ergänzung zur VDI-Richtlinie werden auch die zur Bestimmung der konvektiven Wärmeübergänge benötigten horizontalen Öffnungsflächen für natürliche Durchlüftung rechnerisch bestimmt.

In einem ersten Schritt müssen zunächst die spektralen Eigenschaften (Transmission, Reflexion und Absorption) der Einzelprofile aus Messungen für unterschiedlichen Materialdicken bestimmt werden. Anschließend werden die einzelnen Kennwerte für die Einzelbereiche (Brüstung, Sichtfeld und Oberlicht) der Fassade ermittelt und anteilig über die Flächenverhältnisse gewichtet. Daraus ergeben sich die Kennwerte für die komplette Fassade.

	τ_e [-]	ρ_e [-]	τ_v [-]	ρ_v [-]
Flügel-außen	0,31	0,49	0,29	0,54
Flügel-innen	0,06	0,54	0,05	0,59
Kern	0,00	0,54	0,00	0,59
Gesamt	0,17	0,52	0,16	0,56

Tab. 10: Spektrale Transmissions- und Reflexionsgrade des Profils R1.2.3 (ARBOBLEND@3016 V) (THN-ieg)

τ_e : solarer Transmissionsgrad für gesamten Spektralbereich ($\lambda = 300$ bis 2.500 nm)

ρ_e : solarer Reflexionsgrad für gesamten Spektralbereich ($\lambda = 300$ bis 2.500 nm)

τ_v : Lichttransmissionsgrad für Bereich des sichtbaren Lichts ($\lambda = 380$ bis 780 nm)

ρ_v : Lichtreflexionsgrad für Bereich des sichtbaren Lichts ($\lambda = 380$ bis 780 nm)

Zur Berücksichtigung der direkten solaren Einstrahlung über Öffnungen in der Fassade werden die ermittelten Kennwerte ebenso über die einzelnen Flächenanteile gewertet.

Da das für den Fassadenladen vorgesehene Einzelprofil R 1.2.3 aus unterschiedlichen Materialdicken besteht, werden die für die Berechnungen erforderlichen spektralen Kennwerte für Transmission und Reflexion für die verwendeten Materialstärken (d) über Annäherungsgleichungen abgebildet (Tab. 10).

Für die Bewertung des Lichtdurchgangs (Tageslichtnutzung) wird in der Simulationsumgebung RELUX ein weiteres Modell erstellt. Es werden der Tageslichtquotient, die Beleuchtungsstärke und die Leuchtdichteverteilung (Blendung) im Vergleich zu Referenzsystemen bewertet. Dabei werden die Einzelprofile mit ihren aus den Messungen ermittelten anteiligen Lichttransmissions- und Lichtreflexionsgraden abgebildet. Zur Beurteilung der strömungstechnischen Eigenschaften des Fassadenladens und die Auswirkungen auf die Raumtemperaturen im Vergleich zu einem ohne Sonnenschutzsystems ausgestatteten Raum zur nächtlichen passiven Kühlung in den Sommermonaten wird ein Berechnungsmodell in der Simulationsumgebung ANSYS erstellt.

3.1.1 Modellentwicklung für das Material

Die Diskussion des Wechselspiels mittels Analyse nach VDI 6007-2 (2012-03) und dem daraus entwickelten Modell zur Bestimmung der energie- und lichttechnischen Kennwerte erfolgt zunächst materialunabhängig für verschiedene Transmissions- und Reflexionsgrade der einzelnen Profile. Die sich einstellenden Temperaturen sind hinsichtlich der Beurteilung der Festigkeitseigenschaften im eingebauten Zustand ausschlaggebend. Zur Bestimmung der Temperaturen wird von einer max. solaren Einstrahlung von 1.000 W/m^2 bei einer Außentemperatur von 36 °C und einer Raumtemperatur von 26 °C ausgegangen, dabei liegt Windstille vor. Die Transmissionsgrade werden im Bereich von $0,10$ bis $0,60$ und die Reflexionsgrade im Bereich von $0,30$ bis $0,60$ variiert. Es wird ersichtlich, dass mit zunehmenden Absorptionsgrad (Transmission + Reflexion + Absorption = 1) die Schichttemperatur zunimmt und sich dabei eine maximale Schichttemperatur von $68,6 \text{ °C}$ für einen Transmissionsgrad von $0,10$ und Reflexionsgrad von $0,30$ einstellt. Die geringste Schichttemperatur ergibt sich mit einem Transmissionsgrad von $0,30$ und einem Reflexionsgrad von $0,60$ mit $48,9 \text{ °C}$.

3.1.2 Simulationsberechnungen – erste Profilanordnungen

Randbedingungen

Als repräsentative Zone für alle Simulationsmodelle dient ein Standard-Büroraum mit einer vollverglasten Fassade ausgeführt als 3-fach Wärmeschutzverglasung. Der Büroraum hat eine Grundfläche von $18,0 \text{ m}^2$ ($3,6 \times 5,0 \text{ m}$) und ein Volumen von $54,0 \text{ m}^3$ ($h = 3,0 \text{ m}$).

Variante	Lagen	starr / flexibel	Achsabstand [mm]	Abstand der Lagen [mm]	Ausrichtung
1	1	starr	145	-	Ost / Süd / West
2	2	starr	145	40	Süd
3A	2	innere Lage vertikal verschiebbar	145	40	Süd
3B	2	innere Lage vertikal verschiebbar	120	20	Ost / West

Tab. 11: Anordnungsvarianten für den Bereich Sichtfeld / Oberlicht (THN-ieg)

Für erste Anordnungen der Einzelprofile wird die Fassade in zwei Bereiche unterteilt, einen Brüstungsbereich ($h = 0$ bis $1,05$ m) und einen Sichtfeld- / Oberlichtbereich ($h = 1,05$ bis $3,00$ m). Für den Brüstungsbereich wird zunächst von einer einlagigen geschlossenen Anordnung der Profile (Material ARBOBLEND®3016V) mit einem Achsabstand von 100 mm ausgegangen. Es werden zunächst vier Anordnungen der Einzelprofile für den Bereich Sichtfeld / Oberlicht näher untersucht (Tab. 11).

Für Variante 3A ergeben sich drei Grundstellungen:

- Winter (Nutzung von solaren Wärmegewinnen, sowie Sichtverbindung nach außen)
- Sommer (Vermeidung direkter solarer Einstrahlung während der Sommerperiode)
- Sichtschutzstellung (Anpassung an Blendschutz und Sichtschutz)

Variante 3B beinhaltet zwei Grundstellungen für die Einzelprofile:

- Winter (Nutzung von solaren Wärmegewinnen, sowie Sichtverbindung nach außen)
- Sommer bzw. Sichtschutzstellung (Vermeidung direkter solarer Einstrahlung während der Sommerperiode, Anpassung an Blendschutz und Sichtschutz)

Dabei entsprechen die Winterstellung der Maximalstellung bei größtmöglicher Öffnungsfläche und die Sichtschutzstellung der Minimalstellung bei geringster Öffnungsfläche. Als Referenzsysteme dienen ein Raffstore mit Flachlamellen, jeweils im offenen und geschlossenen Zustand, ein Textilscreen und ein Schiebeladen mit feststehenden Lamellen, jeweils außenliegend vor der Fassade. (Abb. 60 bis 62, Seite 37)

Bewertung der energie- und lichttechnischen Kennwerte

Variante 1 liefert aufgrund der offenen Bereiche und der einlagigen Anordnung in Sichtfeld- und Oberlichtzone einen schlechteren Abminderungsfaktor, jedoch einen guten Lichttransmissionsgrad im Vergleich zu den Referenzsystemen (Tab. 12). Es besteht aber aufgrund der fehlenden Flexibilität keine Möglichkeit unerwünschte direkte Sonneneinstrahlung zu vermeiden, auch eine Sichtschutz- bzw. Blendschutzfunktion für tiefstehende Sonnenstände ist nicht möglich. Variante 2 zeigt zwar während der Sommerperiode eine gute Sonnenschutzfunktion bei gleichzeitig guter Tageslichtnutzung auf, auch solare Wärmeeinträge können in den Wintermonaten genutzt werden, jedoch bietet die starre Anordnung keine Möglichkeit als Blendschutz, vor allem bei tiefstehender Sonne, oder als Sichtschutz zu fungieren. Im Vergleich zu den Referenzsystemen liefert diese Anordnung nicht ganz die von den Referenzsystemen erreichten Werte hinsichtlich des Energieeintrags, jedoch ist der Lichteintragskennwert wesentlich besser, da die Referenzsysteme im geschlossenen Zustand kaum Licht passieren lassen. Durch die vertikale Verschiebbarkeit der inneren Lage ergeben sich für Variante 3A und 3B für den Sommerfall gute Sonnenschutz-Kennwerte bei gleichzeitig guter Tageslichtnutzung, wohingegen in den Wintermonaten die Möglichkeit besteht zusätzliche solare Wärmeeinträge zu nutzen und den Heizenergiebedarf zu senken. Bei Bedarf kann ebenso der Sicht- (nach innen bzw. außen) bzw. Blendschutz gewährleistet werden.

System		Abminderungsfaktor (F _c) [-]	Ges. Energiedurchlassgrad (g _{tot}) [-]	Lichttransmissionsgrad (τ _v) [-]	Ges. Lichttransmissionsgrad (τ _{v,tot}) [-]
FabioW – V1		0,41	0,18	0,34	0,20
FabioW – V2 1), 5)		0,33	0,15	0,27	0,16
FabioW – V2 1), 5)		0,20	0,08	0,13	0,08
FabioW – V3A 5)	Winter 1)	0,36	0,16	0,28	0,17
	Sommer 2)	0,20	0,08	0,13	0,08
	Sichtschutz 1)	0,23	0,10	0,17	0,10
FabioW – V3B 5)	Winter 1)	0,24	0,11	0,19	0,11
	Sommer-/Sichtschutz 2)	0,18	0,08	0,13	0,08
Raffstore 3)	Offen	0,32	0,14	0,25	0,20
	Geschlossen	0,16	0,07	0	0
Textilscreen		0,17	0,08	0,04	0,02
Schiebeladen 4)		-	-	0	0

FabioW
Ergebnisse
Simulation

Tab. 12: Vergleich der energetischen und lichttechnischen Kennwerte, zusätzlich werden für die ausgewählten Referenzsysteme Herstellerangaben (falls vorhanden) angegeben (THN-ieg)
 1) senkrechter Strahlungseinfall (direkte Sonneneinstrahlung)
 2) cut-off-Stellung, d.h. keine direkte Sonneneinstrahlung
 3) offen: Sonnenhöhenwinkel = 60 °, Lamellenstellung parallel;
 geschlossen: Sonnenhöhenwinkel = 0 °, Lamellenstellung geschlossen
 4) keine Angaben zu F_c-Wert und g_{tot} vorhanden
 5) nur für Südausrichtung der Fassade
 6) nur für Ost- / Westausrichtung der Fassade

Durch die kompaktere Anordnung ergeben sich für Variante 3B gegenüber 3A bessere Abminderungsfaktoren, jedoch auch dementsprechend ungünstigere Lichttransmissionsgrade.

Der Fassadenladen kann grundsätzlich als sommerliche Wärmeschutzkomponente verwendet werden, Systemvariante 3 (zweilagig, flexible Anordnung durch Verschiebbarkeit der inneren Lage) liefert dabei die besten Kennwerte. Als klarer Vorteil zeigt sich die selektive Nutzbarmachung der solaren Wärmegewinne in den Wintermonaten und des Tageslichts über das gesamte Jahr.

Bewertung der Leistungscharakteristik bezogen auf die Tageslichtnutzung

Der Tageslichtquotient (Formelzeichen: D, Einheit: %) ist ein Maß für die Tageslichtversorgung von Räumen in Gebäuden. Er gibt das Verhältnis der Beleuchtungsstärke im Raum zur Beleuchtungsstärke außen bei bedecktem Himmel nach CIE (geschlossene Himmelsdecke, d.h. 100 % der Himmelsfläche mit Wolken bedeckt) an. Dabei wird festgehalten, dass für Arbeitsräume, die in ihren Abmessungen Wohnräumen entsprechen, der Tageslichtquotient auf einer horizontalen Bezugsebene, gemessen in einer Höhe von 0,85 m über dem Fußboden, in halber Raumtiefe und in 1 m Abstand von den beiden Seitenwänden im Mittel wenigstens 0,90 % und am ungünstigsten dieser Punkte wenigstens 0,75 % betragen soll.

Grundlegend entsprechen die ermittelten Werte für eine Ostausrichtung der Fassade den Werten für eine Westausrichtung der Fassade bei analogen Sonnenständen und Profilanordnungen. In den Abbildungen sind die Ergebnisse bezüglich der Südausrichtung der Fassade

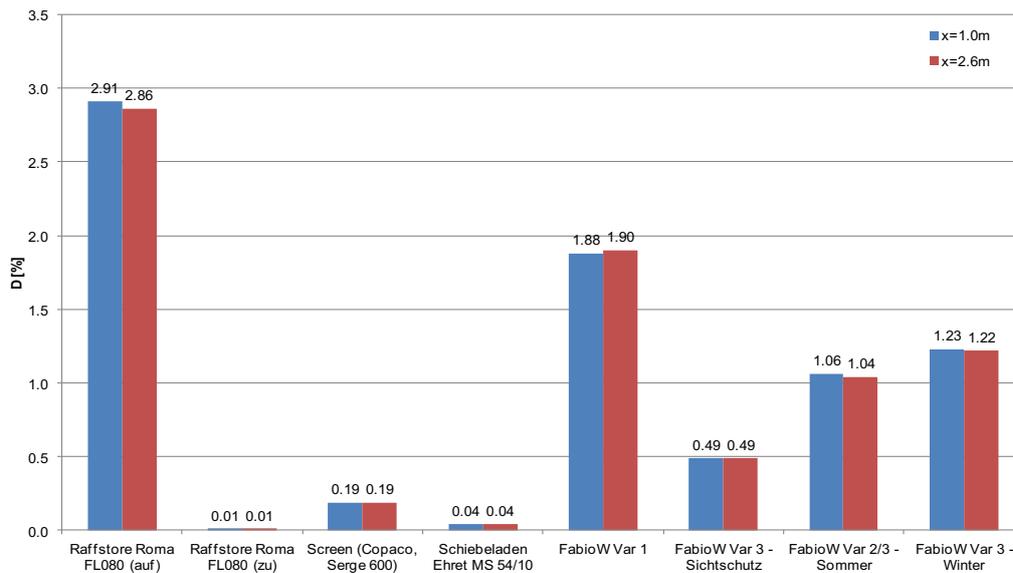


Abb. 98: Vergleich Tageslichtquotienten für Südausrichtung der Fassade (bedeckter Himmel nach CIE) auf Nutzebene (h = 0,8 m) in halber Raumtiefe am 21.03. (11.00 Uhr) (THN-ieg)

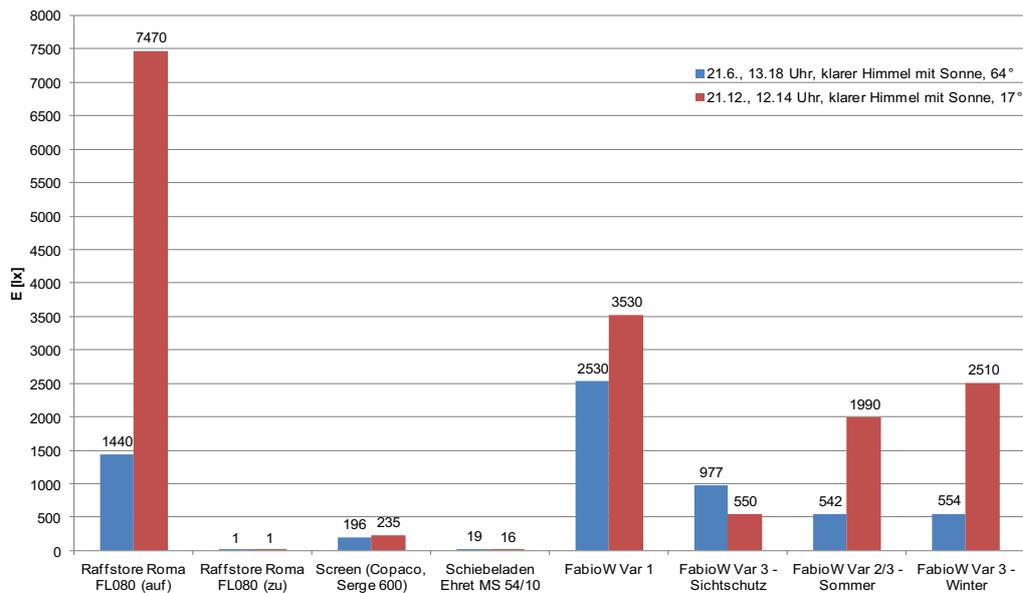
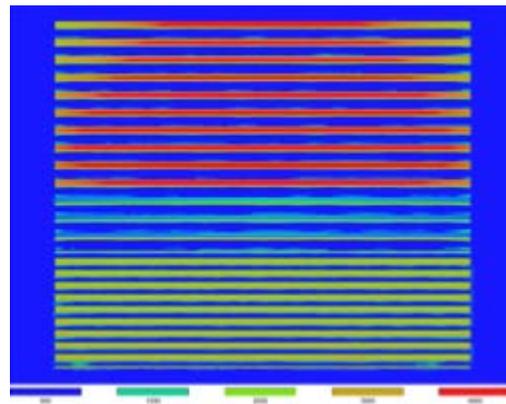


Abb. 99: Vergleich der mittleren Beleuchtungsstärke auf der Nutzebene (h=0,85 m) der untersuchten Systeme am 21.6. (13.18 Uhr) und am 21.12. (12.14 Uhr), Südausrichtung der Fassade, klarer Himmel mit Sonne nach CIE (THN-ieg)

wiedergegeben. Generell zeigt sich, dass je höher der Lichttransmissionsgrad des Gesamtsystems ist, desto höher ist der Tageslichtquotient (Abb. 98). und dementsprechend die Beleuchtungsstärke (Abb. 99). Es ist weiterhin ersichtlich, dass die untersuchten Fassadenladenvarianten generell höhere Werte erzielen als die Vergleichssysteme Schiebeladen, Screen und Raffstore (jeweils im geschlossenen Zustand), lediglich der geöffnete Raffstore liefert erwartungsgemäß bessere Werte. Generell wird der erforderliche minimale Tageslichtquotient für Variante 3A (Südausrichtung) eingehalten, ausgenommen ist hierbei die Sichtschutzstellung. Weiterhin zeigt sich, dass bei einer kompakteren Anordnung der Profile (Variante 3B) geringere Werte zu erwarten sind und der erforderliche Tageslichtquotient nicht erreicht wird. Abhilfe kann dabei ein Wegfahren des gesamten Fassadenladens aus der Aperturfläche schaffen.



FabioW
Ergebnisse
Simulation

Abb. 100: Bewertung der Leuchtdichteverteilung für den 21.12. (12.14 Uhr) für Variante 3A, Winterstellung für Südausrichtung der Fassade: Fotorealistische Darstellung (links), Falschfarbendarstellung (rechts) (THN-ieg)

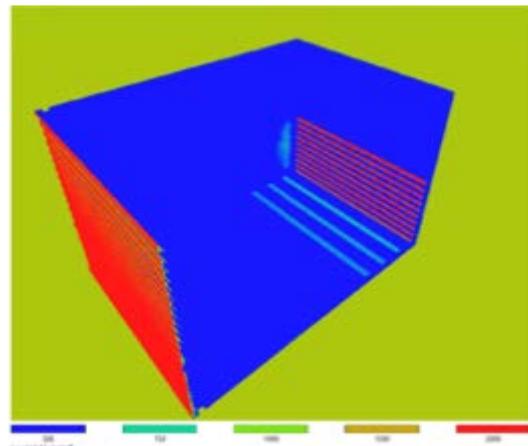
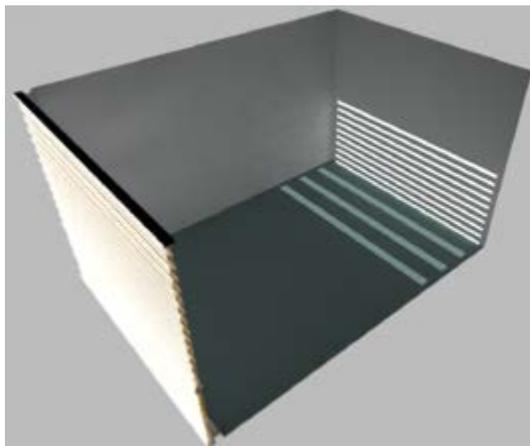
Es zeigt sich, dass mit allen untersuchten Anordnungen (Süd- und Ost- bzw. Westausrichtung) der Profile höhere Beleuchtungsstärken auf der Nutzenebene zu erwarten sind, als mit den Vergleichssystemen Screen, Schiebeladen und Raffstore im geschlossenen Zustand, lediglich der geöffnete Raffstore liefert höhere Werte als die untersuchten Anordnungen der Einzelprofile. Durch die kompaktere zweilagige Anordnung für Variante 3B sind geringere Tageslichtquotienten und dementsprechend Beleuchtungsstärken zu erwarten. Nach DIN EN 12464-1 (2011-08) steht für die psychologische Blendung durch Tageslicht zurzeit kein genormtes Blendungsbewertungsverfahren zur Verfügung. Generell sollen zu hohe Leuchtdichten, welche zu Direktblendung führen und zu hohe Leuchtdichteunterschiede vermieden werden. Weiterhin sind Reflexionen bzw. Spiegelungen auf Arbeitsplatz und Bildschirmen zu beschränken. Man spricht von Reflexblendungen. Aus verschiedenen Untersuchungen gibt es dennoch Anhaltswerte zur Begrenzung der Blendung durch Tageslicht, die eingehalten werden sollten:

- Mittlere Leuchtdichte des Fensters: max. 2.000 cd/m²
- Obergrenze der noch akzeptablen Leuchtdichten: max. 4.000 cd/m²
- Leuchtdichteunterschiede zwischen ausgedehnten Flächen der Arbeitsumgebung (z.B. Fenster) und dem Arbeitsfeld (z.B. Bildschirm): max.10:1

Betrachtet man die mittleren und maximalen Leuchtdichten auf dem Fenster für die verschiedenen Fassadenladenvarianten, so zeigt sich, dass alle den mittleren Grenzwert von 2.000 cd/m² einhalten. Die Sichtschutzstellung für Variante 3 (Süd- und Ost- bzw. Westrichtung) liefert Werte unterhalb des maximal zulässigen Leuchtdichtegrenzwerts von 4.000 cd/m². Grundlegend kann durch Anpassung der inneren Lage im Sichtfeld bzw. Oberlichtbereich direkte Blendung vermieden werden, dennoch ist zu erwähnen, dass es aufgrund der offenen Bereiche für die Anordnungen der Profile zu relativ hohen Leuchtdichteunterschieden im weiteren Blickfeld bzw. auf dem Fenster kommen kann.

In Abb. 100 sind die relativ hohen Leuchtdichteunterschiede bzw. die relativ hohen maximalen Leuchtdichten aufgrund der „offenen“ Bereiche im Bereich Sichtfeld / Oberlicht zu erkennen, dies kann, je nach Orientierung des Arbeitsplatzes, zu störender Reflexblendung führen. Weiterhin ist zu beachten, dass es bei einigen Anordnungen der Einzelprofile zu direkter Sonneneinstrahlung in den Raum kommt. Diese direkte Sonneneinstrahlung kann einerseits zu direkter Blendung oder aber andererseits zu Reflexblendungen durch zu helle Oberflächen führen (siehe Abb. 101, beispielhaft für Variante 1, Südausrichtung, Winterfall).

Ein klarer Vorteil der untersuchten Anordnungen beim Fassadenladen stellt die gute Tageslichtversorgung trotz Sichtschutz dar. Bei der Untersuchung der Nutzerbeeinträchtigung aufgrund von Blendung durch Tageslicht zeigt sich, dass durch entsprechende Anordnung der Profile Direktblendung (direkte solare Einstrahlung) vermieden werden kann.



FabioW
Ergebnisse
Simulation

Abb. 101: Bewertung der Leuchtdichtevertelung für den 21.12. (12.14 Uhr) für Variante 1 für Südausrichtung der Fassade: Fotorealistische Darstellung (links), Falschfarbendarstellung (THN-ieg) (rechts)

Aufgrund der Transluzenz der Einzelprofile und die durch die Anordnungen entstehenden freien Öffnungsflächen relativ hohe Leuchtdichteunterschiede im weiteren Blickfeld bzw. auf dem Fenster bei einzelnen Profilanordnungen resultieren, kann dies zu störender Reflexblendung im Bereich Arbeitsplatz führen. Durch geschickte Anordnung der Profile (Sichtschutzstellung) und des Arbeitsplatzes ist es dennoch möglich dies einzuschränken.

Bewertung des Lüftungsverhaltens (Nachtauskühlung)

Des Weiteren wird eine etwaige Einschränkung der Nachtauskühlung über das geöffnete Fenster durch den durch die ausgewählten Profilanordnungen reduzierten Lüftungsquerschnitt im Sichtfeld- / Oberlichtbereich betrachtet. Die Außentemperatur beträgt zum Betrachtungszeitpunkt 15 °C, bei einer Raumtemperatur von 26 °C, schwacher Wind mit einer mittleren Geschwindigkeit von 0,1 m/s, keine Sonne (Nachtsituation). Die Untersuchungen zur Bestimmung der lüftungstechnischen Eigenschaften der Profilanordnungen erfolgen für nachstehende Anordnungen:

- Kein Verschattungssystem (freier Strömungsquerschnitt)
- Variante 3A - Winterstellung: (\cong Maximalstellung im Sichtfeld- / Oberlichtbereich, offener Zustand)
- Variante 3A - Sichtschutzstellung: (\cong Minimalstellung im Sichtfeld- / Oberlichtbereich, geschlossener Zustand, Abb. 102)

Für einen Punkt im Raum ($x = 1,00$ m, $y = 0,85$ m, $z = 1,80$ m) resultieren folgende empfundene Raumtemperaturen für die untersuchten Varianten:

- Kein Verschattungssystem: 18,46 °C
- Variante 3A - Winterstellung: 18,62 °C
- Variante 3A - Sichtschutzstellung: 18,70 °C (Abb. 102)

Betrachtet man die resultierenden empfundenen Raumtemperaturen, zeigt sich, dass für die beiden untersuchten Anordnungen des Fassadenladens, trotz eines reduzierten freien Öffnungsquerschnitts von 2,12 m², nur geringfügig höhere empfundene Raumtemperaturen im Vergleich zu einem Raum ohne Verschattungssystem (Öffnungsquerschnitt: 6,61 m²) entstehen. Dies bedeutet, dass auch mit geschlossenem Fassadenladen in der Sichtschutzstellung eine effektive Nachtauskühlung bzw. Belüftung dahinterliegender Räume realisiert werden kann.

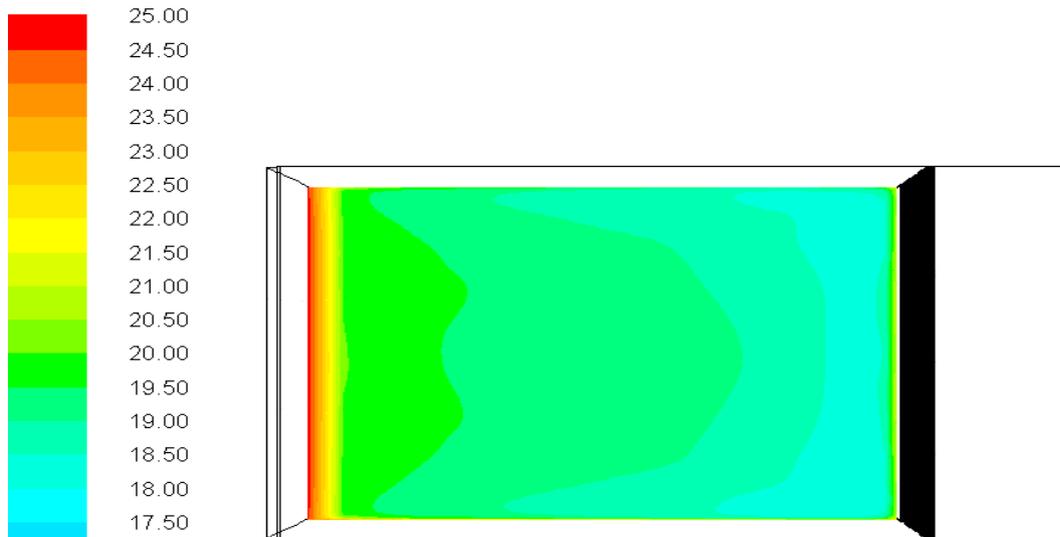


Abb. 102: Empfundene Raumtemperaturen (Mittel aus Luft- und Strahlungstemperaturen der Raumschließungsflächen) in 0,85 m Raumhöhe für Variante 3A (THN-ieg)

3.1.3 Weiterführende Simulationsbetrachtungen

In weiterführenden Simulationsbetrachtungen werden weitere Profilanordnungen betrachtet, dabei wird ebenso ein neues Material (ABOBLEND®3896 V) untersucht.

Randbedingungen

In einem ersten Schritt werden analog dem Werkstoff ARBOBLEND®3016 V für das neue Material ARBOBLEND®3896 V zunächst die spektralen Eigenschaften (Transmission, Reflexion und Absorption) der Einzelprofile¹³ aus Messungen für unterschiedlichen Materialdicken bestimmt. Anschließend werden die jeweiligen Systemkennwerte für die Einzelbereiche (Brüstung, Sichtfeld, Oberlicht) der Fassade ermittelt und später anteilig über die Flächenverhältnisse gewichtet. Daraus ergeben sich die Kennwerte für komplette Fassaden für gemischte Anordnungen (Sichtfeld / Oberlicht bzw. Brüstung / Sichtfeld / Oberlicht). Schließlich erfolgt eine Korrektur der Kennwerte Gesamtergiedurchlassgrad (g_{tot}), Strahlungstransmissionsgrad (τ_e) und Lichttransmissionsgrad (τ_v) für den nicht senkrechten Strahlungseinfall nach VDI 6007-3 (2012-04) für direkte und diffuse solare Einstrahlung.

Durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik / Abteilung Energiesysteme (Fh-IBP) wurden Messungen der spektralen Transmissions- und Reflexionsgrade für Proben des neuen Materials ARBOBLEND®3896 V mit einer Dicke von 1,1 mm bzw. 2,2 mm über einen Wellen-

Materialdicke 1,1 mm				Materialdicke 2,2 mm			
τ_e [-]	ρ_e [-]	τ_v [-]	ρ_v [-]	τ_e [-]	ρ_e [-]	τ_v [-]	ρ_v [-]
0,26	0,55	0,24	0,63	0,11	0,58	0,11	0,67

Tab. 13: Spektrale Transmissions- und Reflexionsgrade für 1,1 mm und 2,2 mm Materialdicke aus Messungen Fh-IBP (ARBOBLEND®3896 V) (THN-ieg)

τ_e : Solarer Transmissionsgrad gesamter Spektralbereich ($\lambda = 300$ bis 2.500 nm)

ρ_e : Solarer Reflexionsgrad für gesamten Spektralbereich ($\lambda = 300$ bis 2.500 nm)

τ_v : Lichttransmissionsgrad für Bereich des sichtbaren Lichts ($\lambda = 380$ bis 780 nm)

ρ_v : Lichtreflexionsgrad für Bereich des sichtbaren Lichts ($\lambda = 380$ bis 780 nm)

¹³ Bewertung von Anordnungen der Einzelprofile für das Material ABOBLEND®3896 V für den senkrechten und nicht senkrechten solaren Strahlungseinfall für unterschiedliche Teilbereiche der Fassade

	τ_e [-]	ρ_e [-]	τ_v [-]	ρ_v [-]
Flügel-außen	0,24	0,55	0,23	0,63
Flügel-innen	0,10	0,58	0,09	0,67
Kern	0,00	0,58	0,00	0,68
Gesamt ¹⁾	0,15	0,57	0,14	0,65

Tab. 14: Spektrale Transmissions- und Reflexionsgrade des Einzelprofils R 1.2.3 für das Material AR-BOBLEND®3896 V (THN-ieg)

τ_e : solarer Transmissionsgrad für gesamten Spektralbereich ($\lambda = 300$ bis 2.500 nm)

ρ_e : solarer Reflexionsgrad für gesamten Spektralbereich ($\lambda = 300$ bis 2.500 nm)

τ_v : Lichttransmissionsgrad für Bereich des sichtbaren Lichts ($\lambda = 380$ bis 780 nm)

ρ_v : Lichtreflexionsgrad für den Bereich des sichtbaren Lichts ($\lambda = 380$ bis 780 nm)

¹⁾ flächengewichtet

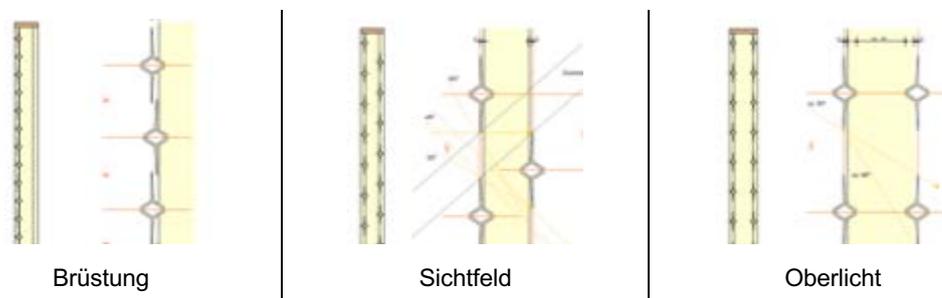


Abb. 103: Anordnungsvarianten für die Bereiche Brüstung, Sichtfeld und Oberlicht (THN-ieg)

längenbereich von 300 bis 2.500 nm durchgeführt. Weiterhin ergibt sich aus den Messungen ein Emissionsgrad (ε) für die Vorder- und Rückseite des Materials von 0,89.

Da das für den Fassadenladen vorgesehene Einzelprofil R 1.2.3 aus unterschiedlichen Materialdicken besteht, werden die für die Berechnungen erforderlichen spektralen Kennwerte für Transmission und Reflexion für die verwendeten Materialstärken über eine Interpolation aus den Messwerten abgeleitet. Als Verglasung wird eine 2-fach Wärmeschutzverglasung mit einem Energiedurchlassgrad (g) von 0,53 und einem Lichttransmissionsgrad (τ_v) von 0,78 verwendet; diese entspricht der Verglasung der Prüfstandsversuche. Zunächst werden die drei Einzelanordnungen Brüstung, Sichtfeld und Oberlicht als Einzelanordnungen betrachtet (Abb. 103 und Tab. 16).

Anordnung	Lagen	Beweglichkeit	vertikaler Achsabstand [mm]	horizontaler Achsabstand [mm]	vertikaler Versatz innere / äußere Lage [mm]
Brüstung	2	starr	193	2	4
Sichtfeld	2	starr	160	80	60
Oberlicht	2	starr	160	80	0

Tab. 15: Anordnungsvarianten für die Bereiche Brüstung, Sichtfeld und Oberlicht (THN-ieg)

3.2 Bewertung der energie- und lichttechnischen Kennwerte

Anordnung	Abminderungsfaktor (F_c) [-]	Gesamtenergiedurchlassgrad (g_{tot}) [-]	Lichttransmissionsgrad (τ_v) [-]	Gesamtlichttransmissionsgrad ($\tau_{v,tot}$) [-]
Brüstung	0,20	0,11	0,12	0,10
Sichtfeld	0,23	0,12	0,15	0,12
Oberlicht	0,49	0,26	0,39	0,33

Tab. 16: Vergleich der energetischen und lichttechnischen Kennwerte für senkrechten Strahlungseinfall (THN-ieg)

Abb. 104 bis Abb. 106 geben den Abminderungsfaktor (F_c) sowie den Lichttransmissionsgrad (τ_v) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe für die drei Einzelanordnungen wieder. Dabei ist deutlich der Einfluss der Sonnenhöhe (direkte Einstrahlung) auf die beiden Kennwerte zu erkennen.

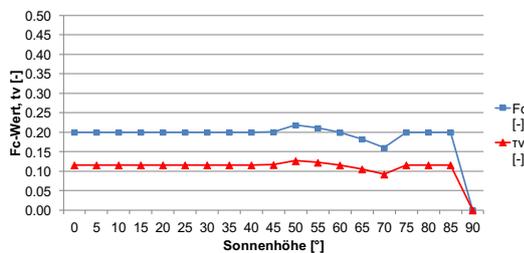


Abb. 104: Abminderungsfaktor (F_c) / Lichttransmissionsgrad (τ_v) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe – Anordnung Brüstung (THN-ieg)

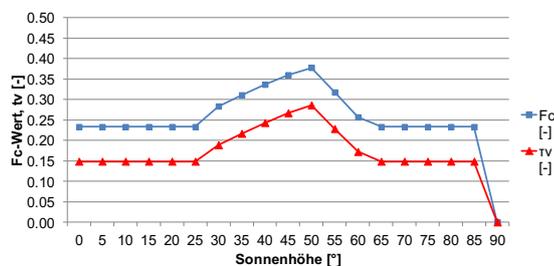


Abb. 105: Abminderungsfaktor (F_c) / Lichttransmissionsgrad (τ_v) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe – Anordnung Sichtfeld (THN-ieg)

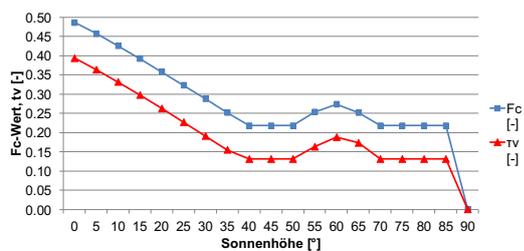


Abb. 106: Abminderungsfaktor (F_c) / Lichttransmissionsgrad (τ_v) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe – Anordnung Oberlicht (THN-ieg)

Leistungsprofil, Kennwerte, Abgleich der Prüfstandversuche mit Simulationsberechnungen

Anschließend werden die Ergebnisse der Prüfstandversuche des Projektpartners Fh-IBP Holzkirchen mit den Kennwerten aus den Simulationsberechnungen verglichen. Dabei werden die zuvor betrachteten Einzelanordnungen miteinander kombiniert und mit zwei Referenzsystemen verglichen. Der Büroraum hat eine vollverglaste Fassade, der Wohnraum ist hingegen mit einer Brüstung ausgestattet. Abb. 107 bis Abb. 110 stellen die simulierten energetischen bzw. lichttechnischen Kennwerte Abminderungsfaktor (F_c), Gesamtenergiedurchlassgrad (g_{tot}), Lichttransmissionsgrad (τ_v), Gesamtlichttransmissionsgrad ($\tau_{v,tot}$) der

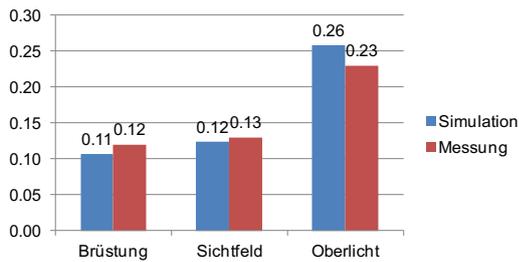


Abb. 107: Vergleich Gesamtenergie-durchlassgrad (g_{tot}) THN-ieg)

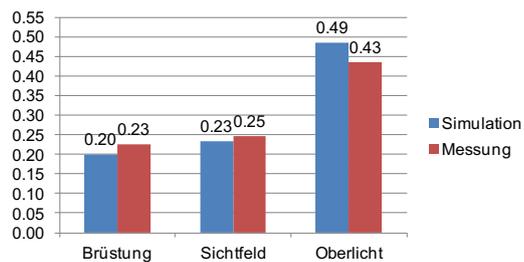


Abb. 108: Vergleich Abminderungsfaktor (F_c) (THN-ieg)

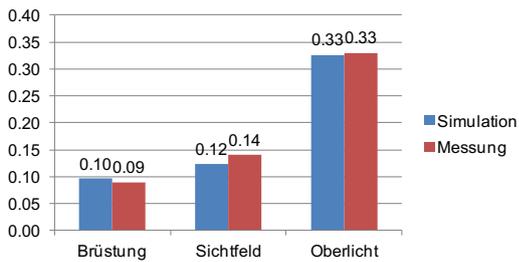


Abb. 109: Vergleich Gesamtlicht-transmissionsgrad ($\tau_{v,tot}$) (THN-ieg)

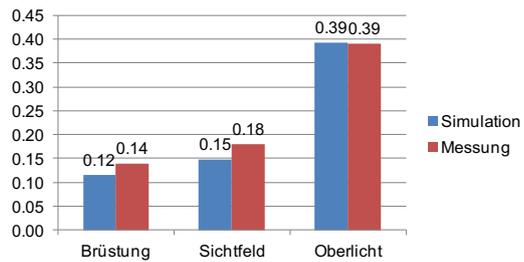


Abb. 110: Vergleich Lichttransmissionsgrad (τ_v) (THN-ieg)

drei Einzelanordnungen den Prüfstandsergebnissen gegenüber. Alle Werte gelten für den senkrechten Strahlungseinfall.

Der Vergleich zeigt, dass die Simulationsergebnisse nur unwesentlich von den Messergebnissen abweichen (2 bis 6 Prozentpunkte). Die Unterschiede bei den energetischen Kennwerten sind auf die unterschiedlichen Randbedingungen (solare Einstrahlung, Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und den daraus resultierenden konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten), welche zu unterschiedlichen sekundären Wärmeabgabegraden führen, zurückzuführen. Dennoch stimmen die Ergebnisse für alle Anordnungen gut überein.

3.2.1 Simulationsberechnungen Raum - Fassade

Das Gesamtsystem (Raum und Fassade) wird am Beispiel eines Büro- bzw. eines Wohnraumes durch eine thermisch-energetische und kombinierte lichttechnische Simulation bewertet. Es ist ein Modell mit dem Simulationsprogramm TRNSYS für einen typischen klimatisierten Büroraum (Heizen, Kühlen, natürliche Belüftung) und einen typischen Wohnraum (Heizen, natürliche Belüftung) erstellt und beurteilt worden. (Abb. 111 und Abb. 112) Als Verglasung wird die bei den Prüfstandsversuchen berücksichtigte 2-fach Wärmeschutzverglasung ($g = 0,53$, $\tau_v = 0,78$) verwendet. Die Fassade ist jeweils nach Süden ausgerichtet und die Räume haben jeweils eine Grundfläche von $19,8 \text{ m}^2$ ($3,6 \times 5,5 \text{ m}$) und ein Volumen von $56,8 \text{ m}^3$ ($h = 2,8 \text{ m}$).

Betrachtet werden neben den Fassadenladen-Anordnungen weiterhin zwei Referenzsysteme, zum einen ein Raffstore (Fa. Roma, Typ FL 080 / Aluminium-Flachlamelle) und zum anderen ein Textil-Screen (Fa. Roma, Typ Serge 600). Tab. 17 gibt hierzu die energetischen, lichttechnischen Kennwerte der untersuchten Systeme wieder. Weiterhin ist der Anteil der freien Öffnungsfläche im geschlossenen Zustand angegeben. Dieser Wert ist vor allem hinsichtlich der natürlichen Belüftung der Räume wichtig. Die beiden Referenzsysteme werden jeweils entsprechend der solaren Einstrahlung auf die Fassade gesteuert, dabei beträgt der Vorgabewert 180 W/m^2 , die Fassadenladenanordnungen sind nicht nachführbar und starr vor der Fassade befestigt. Die Kunstlichtsteuerung erfolgt in Abhängigkeit der Tageslichtverfügbarkeit (Büro: Sollwert zur Abschaltung - 500 lx , zweiter Sollwert zur Wiedereinschaltung - 300 lx ; Wohnraum: Sollwert zur Abschaltung - 300 lx , zweiter Sollwert zur Wiedereinschaltung - 100 lx).

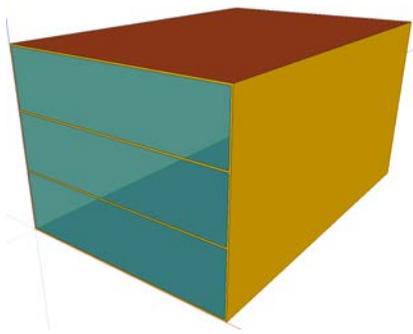


Abb. 111: Simulationsmodell Büroraum, TRNSYS (THN-ieg)

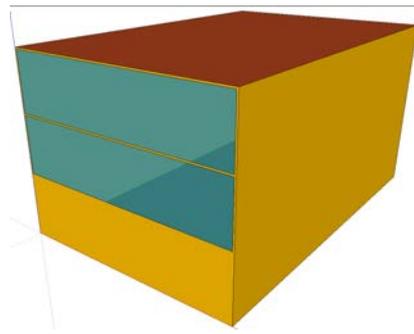


Abb. 112: Simulationsmodell Wohnraum, TRNSYS (THN-ieg)

Um die lichttechnischen Eigenschaften des Fassadenladens und der Referenzsysteme in TRNSYS modellieren zu können, werden zunächst in RELUX die Tageslichtquotienten für die verschiedenen Systeme bestimmt und anschließend in TRNSYS zur Ermittlung der Beleuchtungsstärke im Raum berücksichtigt.

Untersucht werden der Einfluss der untersuchten Sonnenschutzvorrichtungen auf die Beleuchtungsstärke im Raum und damit auf den Strombedarf für künstliche Beleuchtung sowie die Auswirkungen auf den Heiz- bzw. Kühlenergiebedarf. Für die untersuchten Systeme werden der Nutzenergiebedarf und die CO₂-Emissionen verglichen. Zur Energiebereitstellung wird in beiden Räumen ein konventioneller Gas-Brennwertkessel (Wirkungsgrad: 0,95) und zur Kälteerzeugung im Büro Raum ein konventioneller Kaltwassersatz (Arbeitszahl: 3,50) berücksichtigt, dies bedeutet ein CO₂-Äquivalent von 0,241 kg/kWh_{End} für Gas und 0,527 kg/kWh_{End} für Strom-Mix. Abschließend wird die Tageslichtverfügbarkeit mit Hilfe der Kennwerte Tageslichtautonomie (daylight autonomy, DA) und kontinuierliche Tageslichtautonomie (continuous daylight autonomy, CDA) bewertet. Die Tageslichtautonomie bezeichnet den Anteil der Nutzungsstunden, in denen ein Raum oder ein Arbeitsplatz während der Nutzungszeit ausreichend mit Tageslicht versorgt ist, ohne dass Kunstlicht zugeschaltet werden muss. Die kontinuierliche Tageslichtautonomie gibt Auskunft darüber, zu wie viel Prozent der täglichen Benutzungszeit der Raum oder der Arbeitsplatz durch das vorhandene Tageslicht ausreichend beleuchtet wird.

System	Abminderungsfaktor (F _c) [-]	Gesamtenergiedurchlassgrad (g _{tot}) [-]	Lichttransmissionsgrad (τ _v) [-]	Gesamtlichttransmissionsgrad (τ _{v,tot}) [-]	Freie Öffnungsfläche ² [-]
Sichtfeld / Oberlicht	0,36	0,19	0,27	0,23	0,38
Brüstung / Sichtfeld / Oberlicht	0,30	0,16	0,22	0,18	0,41
Raffstore – Roma Flachlamelle FL080 ¹	0,16	0,09	0,06	0,05	0,25
Screen – Roma / Copaco Serge 600	0,17	0,09	0,04	0,03	0,05

Tab. 17: Energetische, lichttechnischen und strömungstechnische Kennwerte für senkrechten Strahlungseinfall für die Anordnungen Fassadenladen und der Referenzsysteme (THN-ieg)
 1 Cut-Off-Stellung, d.h. keine direkte Sonneneinstrahlung, Lamellenwinkel im geschlossenen Zustand: 15 °
 2 bei geschlossener Sonnenschutzvorrichtung

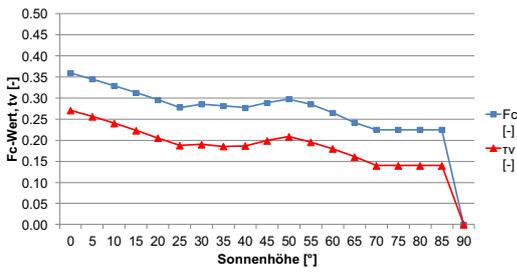


Abb. 113: Abminderungsfaktor (Fc) / Lichttransmissionsgrad in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe – Kombination Sichtfeld / Oberlicht (THN-ieg)

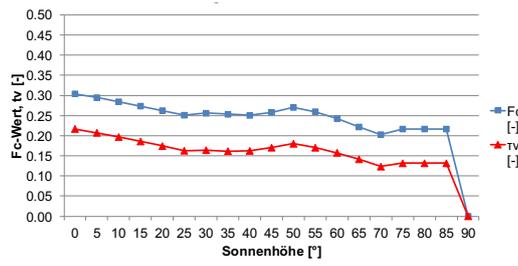


Abb. 114: Abminderungsfaktor (Fc) / Lichttransmissionsgrad in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe – Kombination Brüstung / Sichtfeld / Oberlicht (THN-ieg)

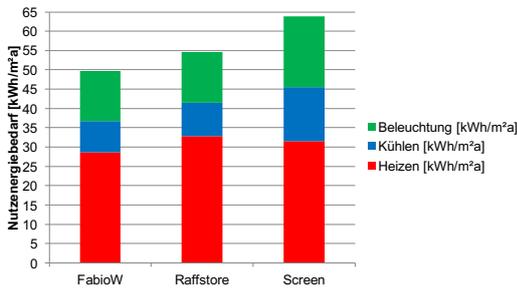


Abb. 115: Jährlicher spezifischer Nutzenergiebedarf – Büroraum (THN-ieg)

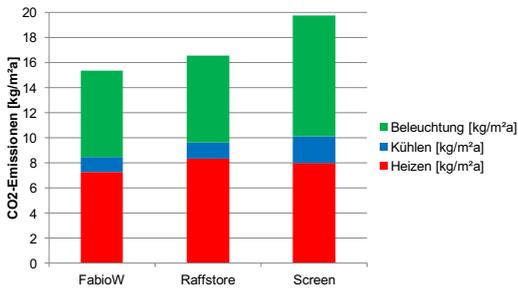


Abb. 116: Jährliche spezifische CO2-Emissionen – Büroraum (THN-ieg)

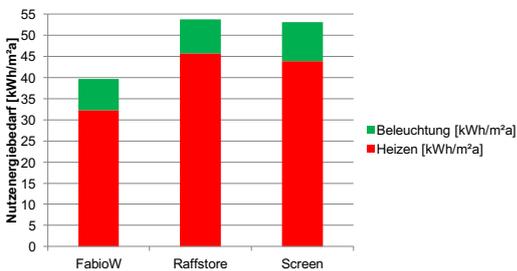


Abb. 117: Jährlicher spezifischer Nutzenergiebedarf – Wohnraum (THN-ieg)

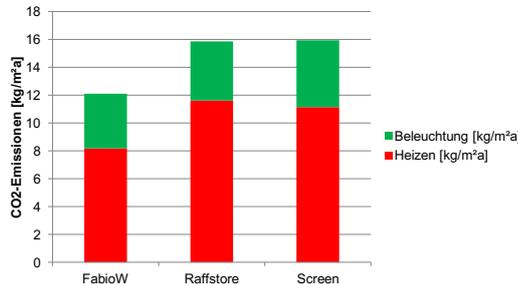


Abb. 118: Jährliche spezifische CO2-Emissionen – Wohnraum (THN-ieg)

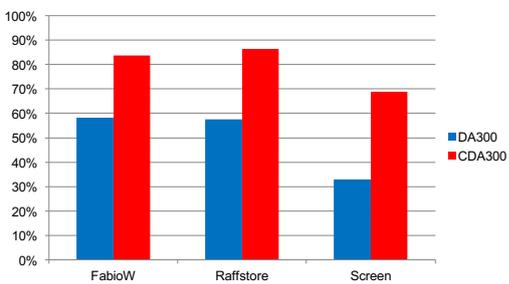


Abb. 119: Tageslichtkennwerte (DA, CDA) – Büroraum (THN-ieg)

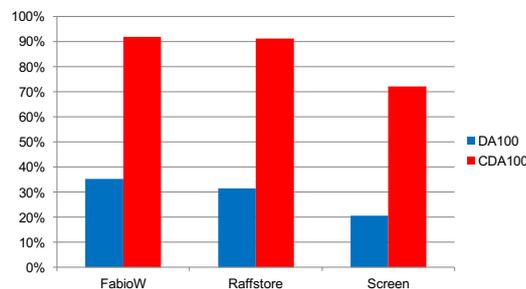


Abb. 120: Tageslichtkennwerte (DA, CDA) – Wohnraum (THN-ieg)

Dabei wird für beide Kennwerte ein definierter Beleuchtungsstärke-Schwellwert für den Raum vorgesehen. Der Kennwert Tageslichtautonomie bietet jedoch nicht die Möglichkeit

System	Empfundene Raumtemperatur (T _{op}) [°C]	Überschreitungsstunden > 24 °C [h/a]	Überschreitungsstunden > 25 °C [h/a]	Überschreitungsstunden > 26 °C [h/a]
Fassadenladen	26,1	407	109	6
Raffstore	24,1	3	0	0
Screen	24,6	22	0	0

Tab. 18: Maximale empfundene Raumtemperaturen und Überschreitungsstunden – Wohnraum (THN-ieg)

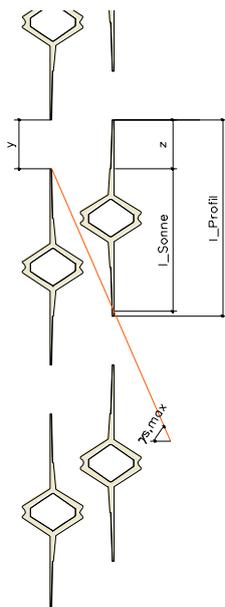


Abb. 121: Optimierte Profilanordnung für Cut-Off-Stellung (Peter Bonfig/THN-ieg)

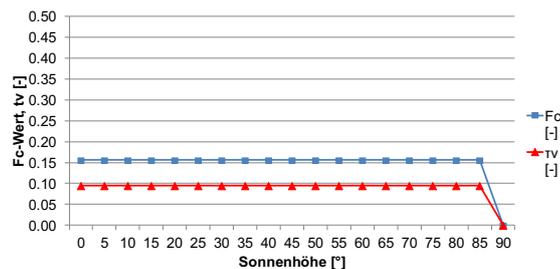


Abb. 122: Abminderungsfaktor (Fc) / Lichttransmissionsgrad (τ_v) in Abhängigkeit von Sonnenhöhe – Cut-Off-Stellung / a (THN-ieg)

das zur Verfügung stehende Tageslicht unter dem Beleuchtungsstärke-Schwellwert zu berücksichtigen. Daher wird die verfeinerte Methode der kontinuierlichen Tageslichtautonomie berücksichtigt, die die Beleuchtungsstärke auch unterhalb des Schwellwerts anteilsweise mit einbezieht. Es zeigt sich, dass beim System Fassadenladen für Büro- und Wohnraum bei allen Einzelkennwerten die niedrigsten Werte bestehen (Gesamt-Einsparung gegenüber Raffstore bzw. Screen für den Büroraum: 9 % bzw. 22 % und für den Wohnraum: 26 % bzw. 25 %). Der niedrigere Heizenergiebedarf resultiert aus der besseren Nutzung der solaren Wärmegewinne während der Heizperiode (Einsparung gegenüber Raffstore bzw. Screen für den Büroraum: 13 % bzw. 9 % und für den Wohnraum: 29 % bzw. 27 %).

In der Kühlperiode führt der dauerhaft geschlossene Zustand des Fassadenladens zu einem niedrigeren Kühlenergiebedarf (Einsparung gegenüber Raffstore bzw. Screen für den Büroraum: 8 % bzw. 43 %), die Referenzsysteme schließen erst ab einer bestimmten solaren Einstrahlung. Ebenso führen die niedrigeren Wärmelasten, aufgrund des geringeren Kunstlichtbedarfs aufgrund der besseren Tageslichtversorgung in den Räumen mit Fassadenladen zu einem niedrigeren Kühlenergiebedarf. Da im geschlossenen Zustand durch den Fassadenladen, aufgrund des im Vergleich zu den Referenzsystemen besseren Lichttransmissionsgrads, mehr Tageslicht in den Raum gelangen kann, resultiert deshalb ein geringerer Energiebedarf für das Kunstlicht (Einsparung gegenüber Raffstore bzw. Screen für den Büroraum: 1 % bzw. 29 % und für den Wohnraum: 7 % bzw. 18 %). (Abb. 115)

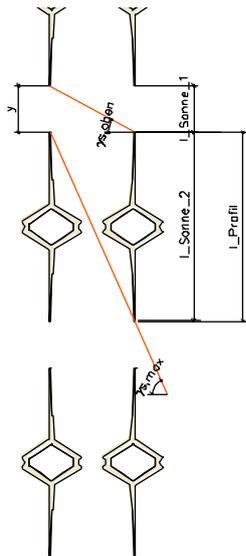


Abb. 123: Optimierte Profilanordnung für den Oberlichtbereich – Tageslichtnutzung (Peter Bonfig/THN-ieg)

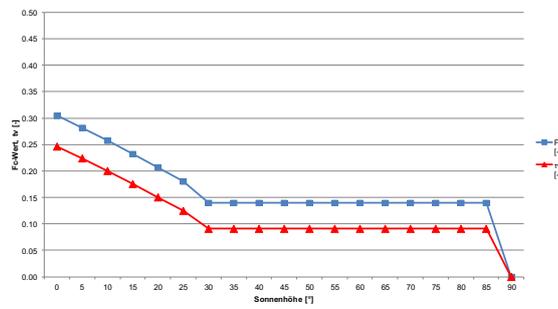


Abb. 124: Abminderungsfaktor (Fc) / Lichttransmissionsgrad (τv) in Abhängigkeit von Sonnenhöhe – Cut-Off-Stellung / a (THN-ieg)

Der bessere Lichttransmissionsgrad des Fassadenladens führt dementsprechend zu den besseren Lichtkennwerten Tageslichtautonomie und kontinuierliche Tageslichtautonomie. Ähnliche Einsparungen (Gesamt-Einsparung gegenüber Raffstore bzw. Screen für den Büroraum: 7 % bzw. 22 % und für den Wohnraum: 24 % gegenüber beiden Systemen) sind auch bei den CO₂-Emissionen zu erwarten (Abb. 116 und Abb. 118).

Die Beurteilung der thermischen Behaglichkeit im Wohnraum anhand der empfundenen Raumtemperaturen und deren Überschreitungshäufigkeit lässt erkennen, dass aufgrund des schlechteren Abminderungsfaktors für den Fassadenladen höhere Raumtemperaturen und dementsprechend höhere Überschreitungsstunden im Wohnraum resultieren. Die höheren Raumtemperaturen sind hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit jedoch als unkritisch anzusehen. (Tab. 18)

Die Simulationsergebnisse bestätigen, dass die untersuchten Fassadenladen-Belegungen in ihrer Leistungscharakteristik als Verschattungsvorrichtung mit auf dem Markt verfügbaren Systemen wie Raffstore oder Textil-Screen als vergleichbar eingestuft werden können. Darüber hinaus zeigen die Fassadenladen-Anordnungen bei der Tageslichtnutzung und der damit verbundenen Einsparung an künstlicher Beleuchtung Vorteile gegenüber den Referenzsystemen.

Anordnungsoptimierungen

Da es bei den zuvor betrachteten Belegungen des Fassadenladens zu Blendung aufgrund direkter Sonneneinstrahlung kommen kann, soll nun an einem Beispiel gezeigt werden, wie durch geschickte Anordnung der Einzelprofile ganzjährig direkte Einstrahlung vermieden werden kann. Als Bedingung muss der senkrechte Profilabstand der Einzelanordnung (y) der senkrechten Überlappung (z) zwischen erster und zweiter Profillage entsprechen, dies verhindert direkte solare Einstrahlung bei niedrigen Sonnenständen. Um auch bei hohen Sonnenständen direkte Einstrahlung zu vermeiden, gilt weiterhin Gleichung (1):

$$l_{\text{Sonne}} \leq l_{\text{Profil}} - z$$

Ziel ist es nun bei bekanntem Profilabstand (y) und bekannter maximaler Sonnenhöhe (γs) den horizontalen Lagenabstand zwischen den beiden Lagen (x) zu bestimmen. Bei einem beispielhaften Profilabstand von 25 mm und einer maximalen Sonnenhöhe von 65,6° ergibt sich demnach der horizontale Achsabstand (x) zwischen den einzelnen Lagen zu 34 mm. Es ergeben sich ein Abminderungsfaktor (Fc) von 0,16 und ein Lichttransmissionsgrad (τv) von

0,10. Unter Berücksichtigung der Verglasung bedeutet dies einen Gesamtenergiedurchlassgrad (g_{tot}) von 0,08 und einen Gesamtlchttransmissionsgrad ($\tau_{v,tot}$) von 0,08 für senkrechten Strahlungseinfall. Der Lichttransmissionsgrad dieser Anordnung ist zwar geringer als bei den bisher betrachteten Anordnungen. Der Lichttransmissionsgrad der optimierten Profilanordnung ist dennoch höher als bei den Referenzsystemen Raffstore und Screen. (Abb. 123) Hierbei soll lediglich direkte Einstrahlung ab einer bestimmten Sonnenhöhe vermieden werden, um mehr Tageslicht zu nutzen und um auch den Heizenergiebedarf durch höhere solare Wärmegevinne zu senken. Gleichzeitig soll störende Blendung vermieden werden. Zunächst gilt für die maximale Sonnenhöhe (γ_s) Gleichung (2).

$$I_{Sonne,2} \leq I_{Profil}$$

Ziel ist es wiederum bei bekanntem Profilabstand (y), bekannter Profillänge und maximaler Sonnenhöhe ($\gamma_{s,max}$) den horizontalen Lagenabstand zwischen den beiden Lagen (x) zu bestimmen. Dies stellt Gleichung (3) dar.

$$x = \frac{l_{Profil}}{\tan(\gamma_{s,max})}$$

Fazit

Merkmal	Auswirkung	Anmerkung
Sonnenschutz (sommerlicher Wärmeschutz)	+	- effektiver Sonnenschutz bei gleichzeitig guter Tageslichtnutzung
Nutzung solarer Wärmegevinne	+	- gute selektive Nutzbarmachung solarer Wärmegevinne während der Heizperiode
Tageslichtnutzung	+	- gute Tageslichtversorgung (trotz Sichtschutzfunktion und Sonnenschutzfunktion)
Belüftung	+	- ausreichende natürliche Belüftung der Räume bei gleichzeitigem Sichtschutz möglich (Nachtauskühlung, passive Lüftungsmaßnahmen)
Blendschutz	o	- Direktblendung kann durch geschickte Anordnung der Einzelprofile vermieden werden - Reflexblendung aufgrund Transluzenz der Einzelprofile und der freien Öffnungsflächen möglich (relativ hohe Leuchtdichteunterschiede)
Sichtverbindung nach außen	o	- aufgrund der Flexibilität des Systems gegeben - zeigt aufgrund der Transluzenz der Einzelprofile nicht ganz das Verhalten opaker Referenzsysteme
Sichtschutz	o	- aufgrund der Flexibilität des Systems gegeben - zeigt aufgrund der Transluzenz der Einzelprofile nicht ganz das Verhalten opaker Referenzsysteme

Tab. 19: Vor- und Nachteile des Systems Fassadenladen aus energetischer, licht- und lüftungstechnischer Sicht (THN-ieg)

3.3 Temperaturmessungen am Demonstrator

Die Messungen fanden an der TH Nürnberg auf dem KB-Gebäude vor der bestehenden Fassade im Dachgeschoss statt. Die Fassade ist nach Süden ausgerichtet, bei der Verglasung hinter den Profilen handelt es sich um eine Zweischeiben-Verglasung, deren energie-technischen Eigenschaften nicht bekannt sind. (Abb. 125)

Messgeräte Fabrikat testo	Messbereich	Genauigkeit	Auflösung
Drahtthermoelement Typ K (Nickel-Chrom / Nickel) in Kombination mit Daten-Logger (Typ 175-T3) zur Beurteilung der Oberflächentemperaturen Messgrößen: Oberflächentemperatur (°C)	-50 bis +400 °C	±0,5 °C (-50 bis +70 °C) ±0,7 % v. Mw. (+70,1 bis +400 °C)	0,1 °C
Daten-Logger Typ 175-T2 Messgrößen: Außentemperatur (°C)	-20 bis +70 °C	±0,5 °C	0,1 °C

Tab. 20: Übersicht der verwendeten Messgeräte (THN-ieg)

Ziel ist es, Oberflächentemperaturen an verschiedenen Punkten der Einzelprofile für eine Sommerperiode zu messen. Folgende Größen werden messtechnisch erfasst und beurteilt:

- Oberflächentemperaturen der Einzelprofile an vier Messorten
- Lufttemperatur zwischen Profilanordnung und Verglasung
- Außentemperatur an der Nordseite der Fassade
- Außentemperatur sowie die horizontale Globalstrahlung in Form von Messdaten vom Flughafen Nürnberg vom 03. August 2017 bis 12. September 2017 (<http://umweltdaten.nuernberg.de/wetterdaten/messstation-nuernberg-flugfeld.html>)
- Aus der horizontalen Globalstrahlung errechnete solare Einstrahlung auf die Südfassade

Messorte

Die Messung wurde am 03. August 2017 ab 13.00 Uhr mit einem Messintervall von zehn Minuten durchgeführt. Das Ende der ersten Messung war am 12. September 2017 um 11.00 Uhr. Insgesamt sind sechs Messorte mit den nachstehenden Messgrößen festgelegt worden (Abb. 126 und Abb. 127):

- Messort 1 (Logger 02): Außentemperatur an der Nordseite der Gebäudefassade
- Messort 2 und 3 (Logger 04): Oberflächentemperaturen an den Profilen
(Messort 2: Rückseite auf Flügel äußere Schicht im Bereich „Sichtfeld“ – Logger 04/1;
Messort 3: Vorderseite auf Flügel äußere Schicht im Bereich „Sichtfeld“ – Logger 04/2)

Messort		1	2	3	4	5	6
Außentemperatur [°C]	Min	7,5	-	-	-	-	-
	Max	33,8	-	-	-	-	-
	Mittel	19,8	-	-	-	-	-
Oberflächentemperatur [°C]	Min	-	7,5	6,1	6,2	5,3	-
	Max	-	37,3	52,5	42,8	47,2	-
	Mittel	-	19,4	19,6	19,9	20,1	-
Lufttemperatur Zwischenraum [°C]	Min	-	-	-	-	-	5,9
	Max	-	-	-	-	-	40,8
	Mittel	-	-	-	-	-	19,1

Tab. 21: Übersicht der gemessenen Werte vom 03. August 2017 bis 12. September 2017 (Oberflächentemperatur, Außentemperatur) (THN-ieg)



Abb. 125: Ansicht des zu untersuchenden Fassadenladens (THN-ieg)

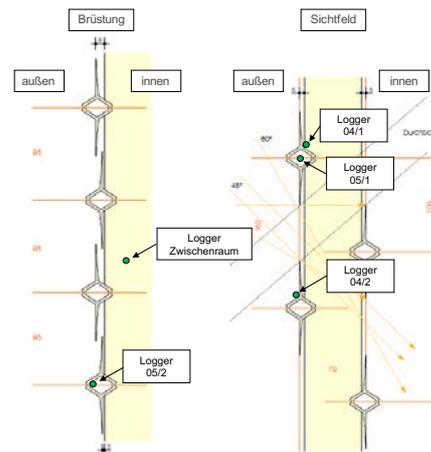


Abb. 126: Untersuchte Profilanordnungen – links: Anordnung „Brüstung“, rechts: Anordnung „Sichtfeld“ (Peter Bonfig/THN-ieg)



Abb. 127: Demonstrator „KB-Gebäude“ mit Messstellen (links: Vorderseite, rechts: Rückseite) (THN-ieg)

- Messort 4 und 5 (Logger 05): Oberflächentemperaturen an den Profilen bzw. im Zwischenraum im Bereich des Kerns (Messort 4: äußere Schicht im Bereich „Sichtfeld“, Luftraum im Kern – Logger 05/1; Messort 5: Vorderseite im Kern im Bereich „Brüstung“ – Logger 05/2) (Abb. 128)
- Messort 6 (Logger Zwischenraum): Lufttemperatur zwischen Anordnung „Brüstung“ und Verglasung (Abb. 129)



Abb. 128: Messort 5 (Logger 05/2) (THN-ieg)



Abb. 129: Messort 6 (Logger Zwischenraum) (THN-ieg)

FabioW
Ergebnisse
Simulation

Messergebnisse

Die maximale Außentemperatur erreichte in diesem Zeitraum 33,8 °C (30. August 2017), die maximale Globalstrahlung betrug 845 W/m² am 07. August 2017 und die maximale solare Einstrahlung auf die Südfassade 725 W/m² am 28. August 2017. Die höchsten Oberflächentemperaturen werden mit Ausnahme von Logger 04/2 am 26. August gemessen.

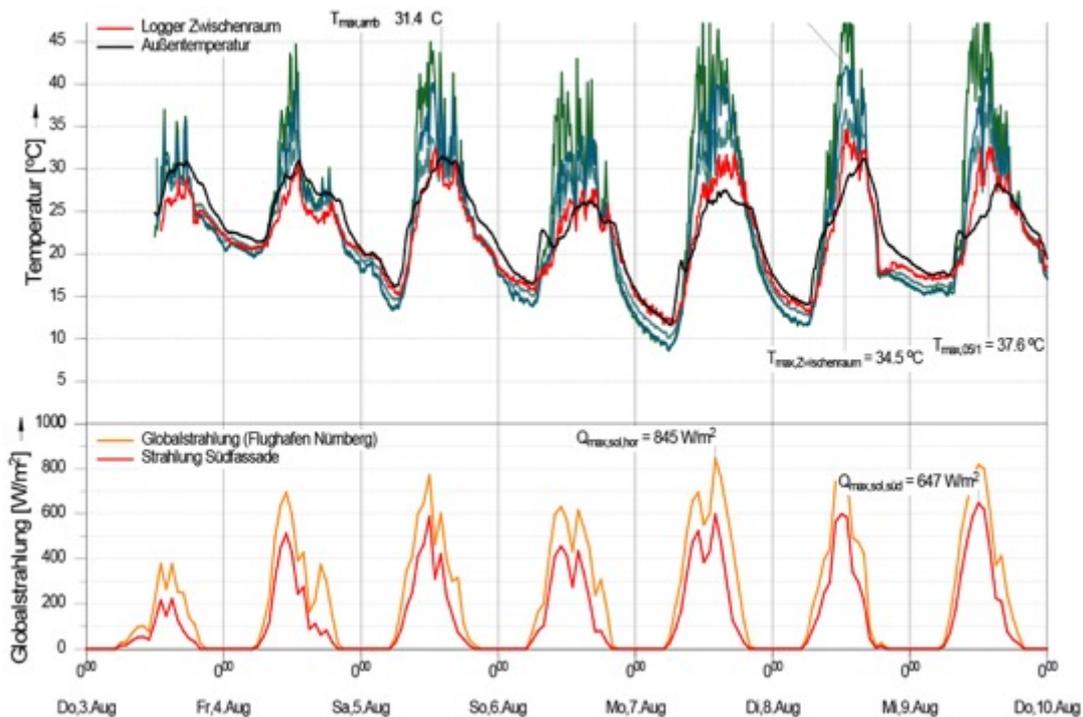


Abb. 130: Messergebnisse für die Messung vom 3. August 2017 bis 10. August 2017 (Messort 1: Logger 02, Messort 2 und 3: Logger 04/1 und 04/2, Messort 4 und 5: Logger 05/1 und 05/2) (THN-ieg)

Die Messdaten der Logger 04/1, 04/2 und vom Zwischenraum sind nur bedingt verwertbar. Die Logger lösten sich durch äußere Einflüsse (Wind, Regen, Vögel) von den Profilen ab. Daher können die Daten von Logger 04/2 nur bis einschließlich 10. August 2017 verwendet werden. Logger 04/1 hat ab dem 5. August lediglich die Lufttemperatur zwischen den beiden Profilschichten gemessen (Tab. 21).

FabioW
Ergebnisse
Simulation

Die Oberflächentemperaturen erreichten ein Maximum von 52,5 °C bei einer Außenlufttemperatur von 31,4 °C. Gegenüber den 'in situ'-Messungen konnte bei Auswertung und Vergleich der Daten mit Globalstrahlung und Windwerten am Standort Flughafen Nürnberg durchaus eine Abhängigkeit zwischen Windgeschwindigkeit und Materialtemperatur aufgrund einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung (Oberfläche, Kern) festgestellt werden. Bei Windeinfluss sinkt demnach die Oberflächentemperatur des Profils. (Abb. 130)

Daraus lassen sich folgende aussagekräftige Ergebnisse feststellen:

- Temperaturen bis etwa 50 °C an den Profilflügeln der Profile bei entsprechender Sonneneinstrahlung und Außentemperatur möglich
- Im Bereich Kern beläuft sich die Oberflächentemperatur auf max. 47,2 °C
- Für die Lufttemperatur zwischen der Anordnung „Brüstung“ und der Verglasung ergibt sich eine Maximaltemperatur von 40,8 °C

4 Bemessung

Lichttechnische und strahlungsphysikalische Kenngrößen

Die Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen erfolgt im Prüflaboratorium „Feuchte, Mörtel, Strahlung, Emissionen“ des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, das nach DIN EN ISO/IEC 17025 (2005) von der DAkkS akkreditiert ist. Die Kenngrößen werden für zwei verschiedene Materialien (ARBOBLEND® 3016V und 3896V) und jeweils zwei verschiedene Dicken ermittelt (Tab. 22, Abb. 133131 und Abb. 134).

Spektrale Transmission $\tau(\lambda)$ und spektrale Reflexion $\rho(\lambda)$ der Proben werden im UV/Vis/NIR-Bereich (300 nm bis 2500 nm) in Anlehnung an die DIN EN 410¹⁴ an einem Zweistrahl-Gitterspektrometer mit Integrationskugel (\varnothing 150 mm) unter nahezu senkrechtem Strahlungseinfall (normal-hemisphärisch) gemessen. Als Referenz für die Reflexion dient ein kalibriertes Material (Spectralon).

Die direkten Strahlungsreflexionsgrade ρ_e und -transmissionsgrade τ_e werden mit Hilfe der normierten relativen spektralen Verteilung der Globalstrahlung nach DIN EN 410, Tabelle 2 ermittelt. Die direkten Strahlungsabsorptionsgrade α_e der Proben ergeben sich zu: $\alpha_e = 1 - \rho_e - \tau_e$. Die Lichttransmissionsgrade τ_v werden entsprechend nach DIN EN 410, Tabelle 1 ermittelt.

Die Bestimmung des Emissionsgrads ε erfolgt in Anlehnung an die DIN EN 12898¹⁵. Die Messungen der spektralen Reflexion $R(\lambda)$ und der spektralen Transmission $T(\lambda)$ (normal-hemisphärisch) werden unter nahezu senkrechtem Strahlungseinfall im Wellenlängenbereich von 2,5 μm - 50 μm an einem FTIR-Spektrometer mit einer Integrationskugel (\varnothing 75 mm) durchgeführt. Als Referenzmaterial für die Reflexion dient Gold. Der Gesamtreflexionsgrad R wird unter Verwendung der Planckschen Strahlungsfunktion für einen schwarzen Körper bei 283 K als Wichtungsfunktion ermittelt. Der Emissionsgrad ε (normal-hemisphärisch) ergibt sich zu: $\varepsilon = 1 - R - T$.

Materialbezeichnung ARBOBLEND®			3016 V	3016 V	3986 V	3986 V
Materialdicke			1,1 mm	0,5 mm	2,2 mm	1,1 mm
visueller (Licht-) Bereich: 380 nm – 780 nm	Reflexionsgrad	ρ_v [-]	0,58	0,49	0,67	0,63
	Transmissionsgrad	τ_v [-]	0,21	0,44	0,11	0,24
Gesamtsolarbereich: 300 nm – 2500 nm	Reflexionsgrad	ρ_e [-]	0,53	0,44	0,58	0,55
	Transmissionsgrad	τ_e [-]	0,24	0,46	0,11	0,25
	Absorptionsgrad	α_e [-]	0,23	0,10	0,31	0,20
MIR-Bereich: 2,5 μm – 50 μm	Emissionsgrad	ε [-]	0,93	0,91	0,94	0,93

Tab. 22: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Kenngrößen (Fh-IBP)

¹⁴ DIN EN 410 (2011-04) Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen

¹⁵ DIN EN 12898 (2001-04) Glas im Bauwesen – Bestimmung des Emissionsgrades

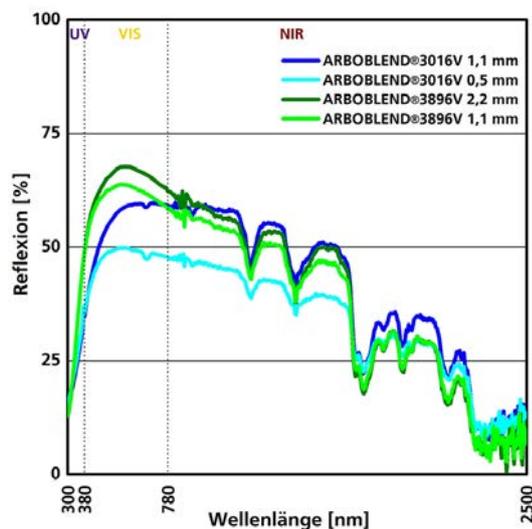


Abb. 132: spektrale Reflexion (Fh-IBP)

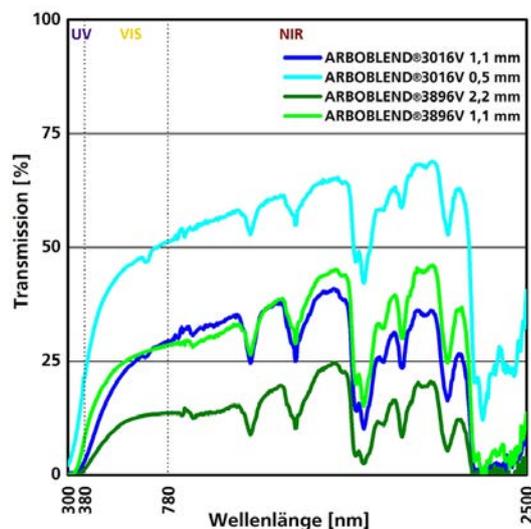


Abb. 133: spektrale Transmission (Fh-IBP)

4.1 Untersuchung zum Leistungsprofil und zu Kennwerten der Funktionsmodelle

Allgemeines

Für Abschlüsse außen und Außenjalousien existiert die Produktnorm DIN EN 13659¹⁶. Diese harmonisierte Norm gilt unabhängig von ihrem Gebrauch und der Art der verwendeten Werkstoffe. Sie legt die Leistungsanforderungen fest, die zur äußeren Befestigung an Gebäuden und anderen baulichen Anlagen vorgesehen sind.

Prüfstand	ermittelte Kennwerte	Probekörper
Goniophotometer	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Lichttransmission $\tau_{v,ger-h}$ (gerichtet-hemisphärisch) des Fassadenladens unter diversen Einstrahlwinkeln Berechnung der Lichttransmission $\tau_{v,dif-h}$ (diffus-hemisphärisch) des Fassadenladens 	<ul style="list-style-type: none"> Probe Brüstung Probe Sichtbereich Probe Oberlicht
kalorimetrischer Fassaden- und Dachprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> Messung des Gesamtenergiedurchlassgrades g_{tot} von Verglasung mit Fassadenladen Messung der Lichttransmission τ_v und der direkten Strahlungstransmission τ_e von Verglasung mit Fassadenladen 	<ul style="list-style-type: none"> Prototyp Brüstung + Verglasung* Prototyp Sichtbereich + Verglasung* Prototyp Oberlicht + Verglasung*

* ähnlich Referenzverglasung C (DIN EN 14500)

Tab. 23: Prüfstände und die ermittelten Kennwerte (Fh-IBP)

Sie behandelt auch wesentliche Gefährdungen bei Zusammenbau, Transport, Einbau, Bedienung und Instandhaltung. Bezüglich der energetischen sowie lichttechnischen Eigenschaften sind nach dieser Produktnorm zwar der zusätzliche Wärmedurchlasswiderstand

¹⁶ DIN EN 13659 (2015-07) Abschlüsse außen und Außenjalousien – Leistungs- und Sicherheitsanforderungen

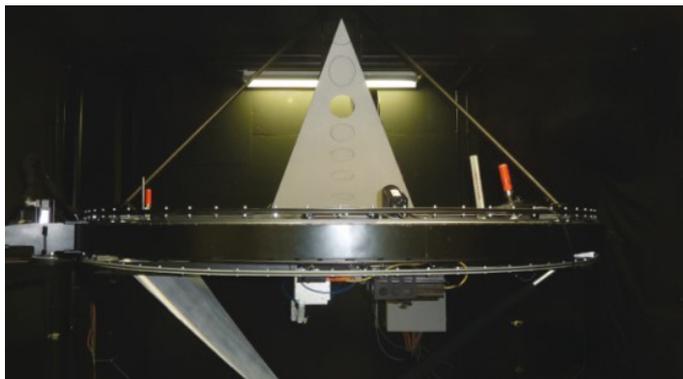


Abb. 134: Fotografische Aufnahme des Goniophotometers (Fh-IBP)

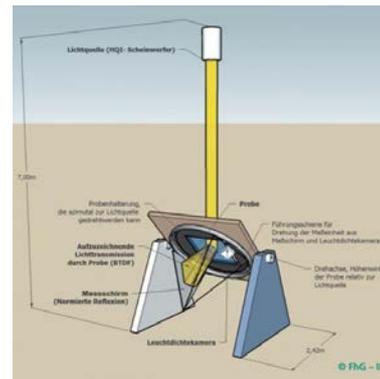


Abb. 135: Prinzipskizze des Goniophotometers (Fh-IBP)

FabioW
Ergebnisse
Bemessung

sowie der Gesamtenergiedurchlassgrad (inklusive verwendeter Verglasung) zu ermitteln, es sind jedoch keine Anforderungskriterien einzuhalten.

Die Leistungsfähigkeit und Einsetzbarkeit des Fassadenladens soll mit Funktionsmodellen an Prüfständen getestet werden. Der Fassadenladen setzt sich aus drei verschiedenen Bereichen zusammen, die sich in der Anordnung der Lamellen unterscheiden: Brüstung, Sichtbereich und Oberlicht. Für die drei verschiedenen Anordnungen werden jeweils eigene Funktionsmodelle hergestellt und somit drei Untersuchungen durchgeführt. Die Kennwerte für die gesamte Baukomponente Fassadenladen, bestehend aus den unterschiedlichen Belegungsbereichen, können somit je nach Zusammensetzung flächenanteilig bestimmt werden. Die Kennwerte werden an zwei Prüfständen, einem Goniophotometer und am kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand, ermittelt (Tab. 23).

4.2 Goniophotometer

Das Goniophotometer ermöglicht es, die Lichttransmission von Fassadenkomponenten und Systemen schnell und richtungsaufgelöst zu messen. Mit der Bestimmung der gerichtet-diffusen und der gerichtet-direkten Lichttransmission ergänzt dies die bestehende Messtechnik zur thermisch-energetischen Bewertung von Fassadenkomponenten. Die Versuchseinrichtung basiert auf dem Prinzip der Lichtstrommessung. (Abb. 134 und Abb. 135)

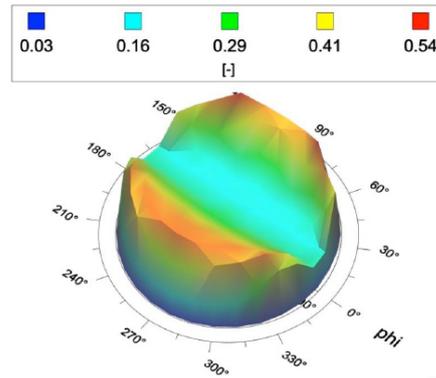
Eine in Höhenwinkel (θ) und Azimutwinkel (φ) verstellbare Probenhalterung wird mit einem Strahler (HMI-Lampe) beleuchtet (Abb. 136). Das durch die Probe transmittierte Licht fällt auf einen Schirm, der ein Sechstel des Halbraumes über der Probe abdeckt und in sechs Schritten um die Probe zur vollständigen Erfassung der Lichttransmission verfahren wird. Die Leuchtdichten auf dem Schirm werden mit Hilfe einer mitlaufenden Leuchtdichtekamera aufgezeichnet und via Bestimmung des Lichtstroms zu Leuchtdichtekoeffizienten verrechnet (Abb. 137). Durch die unmittelbare Auswertung jeweils eines Sechstels der Hemisphäre kann im Vergleich zu Goniophotometern, die auf Punktmessungen der Beleuchtungsstärke basieren, erheblich schneller gemessen werden. Die Versuchseinrichtung wird über eine am Fraunhofer IBP entwickelte Steuerungs- und Auswertungssoftware betrieben. Die Messdaten und physikalischen Eigenschaften von Fassadensystemen werden in einem XML-basierendes Datenformat gespeichert. Hiermit lassen sich diverse lichttechnische Berechnungen und Analysen der Fassadenkomponenten vornehmen.

Für den Fassadenladen wird die gerichtet-hemisphärische Transmission für die 3 Bereiche (Brüstung, Sichtbereich, Oberlicht) unter Tregenza-Schema¹⁷ gemessen und die diffus-hemisphärische Transmission über alle 145 Einfallswinkel bestimmt (Tab. 24).

¹⁷ Tregenza, P. (1987): Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements, Lighting Research and Technology 19, Nottingham, H.1, S. 13-14



Abb. 136: Eingebaute Probe (Brüstungsbereich) (Fh-IBP)



FabioW
Ergebnisse
Bemessung

Abb. 137: Beispielmessung Sichtfeld (gerichtet-hemisphärische Transmission) (Fh-IBP)

	Einfallswinkel		Lichttransmission	
	φ	θ	direkt-hemisphärisch	diffus-hemisphärisch
	$90^\circ \triangleq$ Richtung 4	\triangleq Richtung 7	$\tau_{v,dir-h}$	$\tau_{v,dif-h}$
	[°]	[°]	[-]	[-]
Oberlichtbereich	0	0	0,39	0,21
	90	24	0,21	
	90	48	0,10	
	90	60	0,29	
Sichtbereich	0	0	0,18	0,24
	90	24	0,16	
	90	48	0,31	
	90	60	0,36	
Brüstungsbereich	0	0	0,14	0,13
	90	24	0,13	
	90	48	0,13	
	90	60	0,15	

Tab. 24: Messergebnisse am Goniophotometer (Fh-IBP)

Wie zu erwarten und gewünscht, sind die Transmissionsgrade bei Sicht- und Oberlichtbereich vom Höhenwinkel der Einstrahlung abhängig. Mit dem diffus-hemisphärische Transmissionsgrad kann nach DIN EN 14501¹⁸ die Tageslichtnutzung klassifiziert werden.

¹⁸ DIN EN 14501 (2006-02) Abschlüsse - Thermischer und visueller Komfort - Leistungsanforderungen und Klassifizierung

Klassifizierung des visuellen Komforts	Tabelle 5 – Einteilung der Klassen					
	Einfluss auf den visuellen Komfort					
	0	1	2	3	4	
	sehr geringe Auswirkung	geringe Auswirkung	mäßige Auswirkung	hohe Auswirkung	sehr hohe Auswirkung	
Tagelichtnutzung	Tabelle 11 – Tageslichtnutzung – Klassifizierung					
	Klasse	0	1	2	3	4
	$\tau_{v, dif-h}$	$\tau_{v, dif-h} < 0,02$	$0,02 \leq \tau_{v, dif-h} < 0,10$	$0,10 \leq \tau_{v, dif-h} < 0,25$	$0,25 \leq \tau_{v, dif-h} < 0,40$	$\tau_{v, dif-h} \geq 0,40$

Tab. 25: Klassifizierung der Tageslichtnutzung nach DIN EN 14501 (Fh-IBP)

Dabei wird die Tageslichtnutzung bestimmt durch

- die Fähigkeit der Sonnenschutzeinrichtung, die Zeitdauer zu verkürzen, während der künstliches Licht erforderlich ist; sowie
- die Fähigkeit der Sonnenschutzeinrichtung, das verfügbare Tageslicht zu optimieren.

Bei Klassifizierung nach DIN EN 14501 werden die Umgebungsbedingungen wie z.B. die Größe und Form des Raums, der Reflexionsgrad der inneren Oberflächen und das Fenster nicht berücksichtigt.

Für die Klassifizierung der Tageslichtnutzung ergibt sich für alle 3 Bereiche die Klasse 2 (Tab. 25)

4.3 Kalorimetrischer Fassaden- und Dachprüfstand

Die energierelevanten bauteilspezifischen Kenndaten der drei Funktionsmodelle (Brüstung, Sichtbereich und Oberlicht) werden am kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand des IBP in Holzkirchen (Abb. 139) in Kombination mit einer Verglasung unter realen Wetterbedingungen gemessen.

Bei diesem Fassaden- und Dachprüfstand handelt es sich im Wesentlichen um ein sehr großes in situ Kalorimeter. Hinter der Öffnung der Prüfbox, die Prüfkörper bis zu einer Größe von 2,30 m x 3,14 m aufnehmen kann, sitzen an den Innenflächen fünf hoch absorbierend lackierte, wasserführende Absorberregister. Diese Register, welche von der Anlagentechnik des Prüfstandes auf eine konstante Temperatur gehalten werden, absorbieren sämtliche in die Prüfbox eindringende Strahlungsenergie. Dabei werden die Wärmemengen, die zur Aufrechterhaltung der Registertemperatur abgeführt werden müssen, von einer hochgenauen Messensorik erfasst. Um ausschließlich den Energietransport durch den Prüfling zu erfassen, muss jede energetische Interaktion zwischen den Absorberregistern und der Umgebung der Prüfbox unterbunden werden. Zu diesem Zweck ist zwischen den fünf innenseitig in der Prüfbox angeordneten Absorberregistern und den Außenoberflächen der Prüfbox, zusätzlich zu einer starken Dämmschicht, ein weiteres Set von Registern (Adiabatregister) angeordnet. Diese Adiabatregister werden derart angesteuert, dass kein Energietransport in oder aus der Prüfbox über die Hüllflächen stattfindet. Die von der Verglasung konvektiv erwärmte Luft in der Prüfkammer wird von einem Querstromlüfter zu einem Wärmetauscher transportiert. Dieser Wärmetauscher hält die Lufttemperatur in der Prüfkammer konstant und erlaubt so die Abschätzung des konvektiv in die Prüfkammer eindringenden sekundären Wärmestromanteils. Die an der Prüflingsoberfläche eingestrahlte Strahlungsleistung wird mit Hilfe eines Pyranometers erfasst, dessen Mess-Hemisphäre der Sicht-Hemisphäre des Prüflings entspricht. Aus den Messergebnissen sämtlicher in die Prüfkammer eindringenden Energiemengen und der Solarstrahlung außerhalb der Prüfkammer ist es möglich den g-Wert des Prüflings zu errechnen.



Abb. 138: Kalorimetrischen Dach- und Fassadenprüfstand (Fh-IBP)

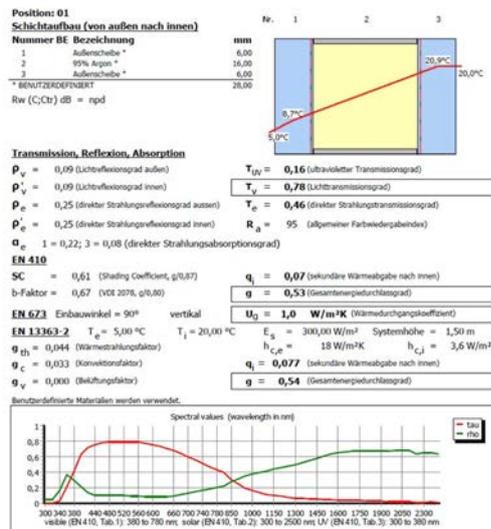


Abb. 139: Kenndaten der verwendeten Verglasung (Fh-IBP)

FabioW
 Ergebnisse
 Bemessung

Die gesamte Prüfbox ist um annähernd 360 ° drehbar und um 90 ° neigbar. (Abb. 138) Sie kann entweder in einer starren Position betrieben werden, heliostatisch ausgerichtet bleiben (um einen permanent senkrechten Strahlungseinfall zu gewährleisten) oder sie kann der Sonne mit einem vorgegebenen Vorhaltewinkel (Azimut und Sonnenhöhe) heliostatisch nachgeführt werden um einen definierten, nicht-senkrechten Einfallswinkel zu erreichen. Diese Prüfanordnung erlaubt eine detaillierte Messung des Energieeintrags durch eine (transparente) Fassade für verschiedene Sonnenstände, solare Einfallswinkel, Temperaturdifferenzen und weitere Randbedingungen.

Das Messkonzept des Prüfstands erlaubt eine umfassende kalorimetrische Messung des Gesamtenergieeintrags bzw. -austrags. Eine detailliertere Erfassung von lokalen Temperaturen, Strömungsgeschwindigkeiten, Transmissionskennwerten und Blendungsparametern wie z.B. der Leuchtdichte ist mittels des kalorimetrischen Messprinzips nicht möglich. Um diese lokalen Parameter ebenfalls bestimmen zu können, ist der kalorimetrische Fassaden- und Dachprüfstand mit einem Raumportal (Abb. 140), einem dreidimensionalen Roboter, ausgerüstet, der mit Hilfe eines Messkopfs jede beliebige Stelle innerhalb der Prüfkammer anfahren kann. Dieser Messkopf ist für die Messungen in diesem Projekt mit einem Pyranometer und einem Photometerkopf zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke ausgestattet. Mit Hilfe des Pyranometers und des Photometers können, zusammen mit ihren an der Außenseite angebrachten Gegenstücken (Abb. 141), integrale Transmissionswerte für das solare und das sichtbare Strahlungsspektrum ermittelt werden. Transmissionswerte geben an, wie hoch der Anteil an Strahlung ist, der direkt durch den Prüfling dringt. Bei der Messung der Transmission wird der Quotient aus der Strahlungsleistung in der Prüfbox zu der äußeren Strahlungsleistung gebildet. Der Sensor im Inneren der Prüfkammer ist auf dem Messkopf des Raumportals montiert. So ist es möglich, nicht nur die Transmission an einer einzigen vorher festgelegten Stelle des Prüflings zu messen, sondern auch mehrere Positionen abzuscannen. Durch das Abfahren eines Rasters kann ein Flächen-Mittelwert der Transmission des Prüflings ermittelt werden. Durch gezieltes Stoppen an festgelegten Punkten kann eine flächenaufgelöste Darstellung der Transmissionseigenschaften des Prüflings erstellt werden.

Für die Messung des Fassadenladens befindet sich eine Zweifachverglasung (Abb. 139) in der Prüfföffnung vor die nacheinander die einzelnen Funktionsmodelle installiert werden. Dabei werden für die einzelnen Belegungen die Gesamtenergiedurchlassgrade g_{tot} unter verschiedenen Einstrahlwinkeln gemessen. Außerdem wird die Lichttransmission τ_v sowie die Transmission der Gesamtstrahlung τ_e für senkrechte Einstrahlung über die Höhe des Prüflings gemessen. In den Diagrammen sind beispielhaft die Messungen unter Normaleinstrahlung für den Oberlichtbereich dargestellt (Abb. 142 und Abb. 143).



Abb. 140: Raumportal in Prüfbox (Fh-IBP)



Abb. 141: Messtechnik an Prüfbox außen (Fh-IBP)

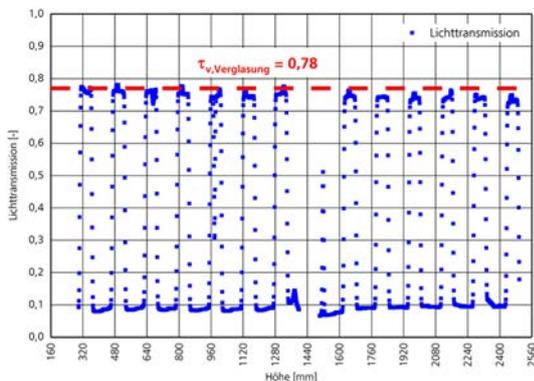


Abb. 142: Lichttransmission (Oberlichtbereich) in situ gemessen (Fh-IBP)

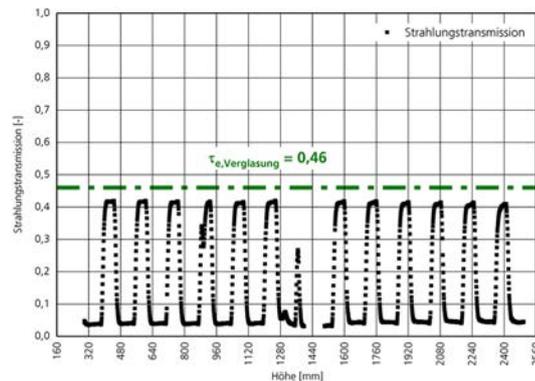


Abb. 143: Transmission der Gesamtstrahlung (Oberlichtbereich) in situ gemessen (Fh-IBP)

4.4 Zusammenstellung der Kennwerte (Tab. 26)

Am Goniophotometer wurde nur der Fassadenladen gemessen, während am kalorimetrischen Dach- und Fassadenprüfstands der Fassadenladen mit Verglasung gemessen wurde. Um die so ermittelten Kennwerte zu vergleichen, werden diese mit Hilfe des Rechenverfahrens nach DIN EN 13363 Teil 2¹⁹ bzw. DIN EN ISO 52022-3²⁰ (Software WinSLT²¹) verglichen.

¹⁹ DIN EN 13363-2 (2005-06) Sonnenschutzeinrichtungen in Kombination mit Verglasungen - Berechnung der Solarstrahlung und des Lichttransmissionsgrades Teil 2: Detailliertes Berechnungsverfahren

²⁰ DIN EN ISO 52022-3 (2018-01) Energieeffizienz von Gebäuden - Wärmetechnische, solare und tageslichtbezogene Eigenschaften von Bauteilen und Bauelementen - Teil 3: Detailliertes Berechnungsverfahren zur Ermittlung der solaren und tageslichtbezogenen Eigenschaften von Sonnenschutz in Kombination mit Verglasungen

²¹ WinSLT, Software zur Berechnung von Solarstrahlung, Lichttransmission und Temperaturen in Verglasungen von Sommer Informatik GmbH Rosenheim

				Brüstungsbereich		Sichtbereich		Oberlichtbereich	
				Gonio- photometer	in situ Messung	Gonio- photometer	in situ Messung	Gonio- photometer	in situ Messung
Verglasung	g_{\perp}	[-]	-	0,53	-	0,53	-	0,53	
	$\tau_{v,\perp}$	[-]	-	0,80	-	0,80	-	0,80	
	$\tau_{e,\perp}$	[-]	-	0,45	-	0,45	-	0,45	
Verglasung + Fassadenladen	$g_{tot,\perp}$	[-]	-	0,12	-	0,13	-	0,23	
	$\tau_{v,tot,\perp}$	[-]	-	0,09	-	0,14	-	0,33	
	$\tau_{e,tot,\perp}$	[-]	-	0,06	-	0,08	-	0,18	
	F_c	[-]		0,23		0,25		0,43	
	$g_{tot,30^\circ}$	[-]	-	0,10	-	0,10	-	-	
	$\tau_{v,tot,30^\circ}$	[-]	-	0,09	-	0,11	-	-	
	$\tau_{e,tot,30^\circ}$	[-]	-	0,06	-	0,07	-	-	
Fassadenladen	$\tau_{v,\perp}$	[-]	0,14		0,18	0,18*	0,39	0,41*	
	$\tau_{e,\perp}$	[-]	-		-	0,17*	-	0,32*	
	$\tau_{v,24^\circ}$	[-]	0,13		0,16		0,21		
	$\tau_{v,48^\circ}$	[-]	0,13		0,31		0,10		
	$\tau_{v,60^\circ}$	[-]	0,15		0,36		0,29		
	$\tau_{v,dif-h}$	[-]	0,13		0,24		0,24		
Legende		g Gesamtenergiedurchlassgrad τ Transmissionsgrad v Licht e Gesamtsolar \perp senkrechte Einstrahlung tot Verglasung + Sonnenschutzvorrichtung 24° Einstrahlung unter 24° (alternativ 48° oder 60°) dif-h diffus-hemisphärisch F_c Abminderungsfaktor definiert für senkrechte Einstrahlung							

* bestimmt durch Berechnung nach DIN EN 13363-2: in situ Messung – Verglasung

Tab. 26: Zusammenfassung der Kennwerte (Fh-IBP)

Die Ergebnisse beziehen sich jeweils auf die einzelnen Belegungsbereiche (Brüstung, Sichtbereich bzw. Oberlicht). Diese können dann entsprechend den gewählten Flächenanteilen verrechnet werden. Die Ergebnisse für senkrechten (normalen) Strahlungseinfall sind grau

Glasytyp	Kennwerte, ohne Sonnenschutzvorrichtung			Kennwerte mit außenliegender Sonnenschutzvorrichtung										Kennwerte mit innenliegender Sonnenschutzvorrichtung						
				Außenjalousie ^b (10°-Stellung)		Außenjalousie (45°-Stellung)		vertikale Markise		Rollladen (vollst. geschlossen)		Rollladen ^c (3/4 geschlossen)		innenl. Jalousie ^b (10°-Stellung)		innenl. Jalousie (45°-Stellung)		Textil-Rollo		Folie
	U_g^d	g	τ_e	weiß	dunkel-grau	weiß	dunkel-grau	weiß	Mittel-grau	weiß	dunkel-grau	weiß	dunkel-grau	weiß	dunkel-grau	weiß	dunkel-grau	weiß	alubedampft	weiß ^c
Einfachglas	5,8	0,87	0,85	0,12	0,20	0,18	0,21	0,28	0,23	0,23	0,25	0,39	0,40	0,43	0,64	0,45	0,65	0,42	0,46	0,38
Zweifachglas mit Luftfüllung, ohne Beschichtung	2,9	0,78	0,73	0,10	0,15	0,15	0,16	0,25	0,19	0,20	0,19	0,35	0,34	0,44	0,63	0,46	0,64	0,42	0,47	0,40
Dreifachglas mit Luftfüllung, ohne Beschichtung	2,0	0,70	0,63	0,08	0,12	0,13	0,13	0,23	0,16	0,18	0,16	0,31	0,30	0,43	0,59	0,45	0,60	0,41	0,46	0,40
Wärmedämmglas zweifach mit Argonfüllung, eine Beschichtung	1,7	0,72	0,60	0,08	0,11	0,13	0,12	0,23	0,15	0,18	0,16	0,32	0,30	0,44	0,61	0,46	0,62	0,42	0,47	0,40
	1,4	0,67	0,58	0,07	0,10	0,12	0,10	0,21	0,14	0,17	0,14	0,29	0,27	0,43	0,58	0,44	0,58	0,41	0,45	0,39
	1,1	0,64	0,58	0,07	0,08	0,11	0,09	0,20	0,13	0,16	0,13	0,28	0,25	0,42	0,56	0,44	0,56	0,40	0,44	0,39
	1,0	0,53	0,45	0,06	0,08	0,10	0,08	0,17	0,11	0,14	0,11	0,24	0,22	0,38	0,47	0,39	0,48	0,37	0,40	0,36
Wärmedämmglas dreifach mit Argonfüllung, 2 Beschichtungen	0,8	0,60	0,50	0,06	0,07	0,10	0,07	0,19	0,11	0,15	0,11	0,26	0,23	0,41	0,53	0,42	0,54	0,39	0,43	0,38
	0,7	0,53	0,46	0,05	0,06	0,09	0,06	0,17	0,10	0,13	0,10	0,23	0,20	0,38	0,48	0,39	0,48	0,37	0,40	0,36

Abb. 144: Standardwerte für die Kennwerte von Gläsern und Sonnenschutzvorrichtungen nach DIN V 18599-2: 2016-10 (Tabelle 8) (Fh-IBP)

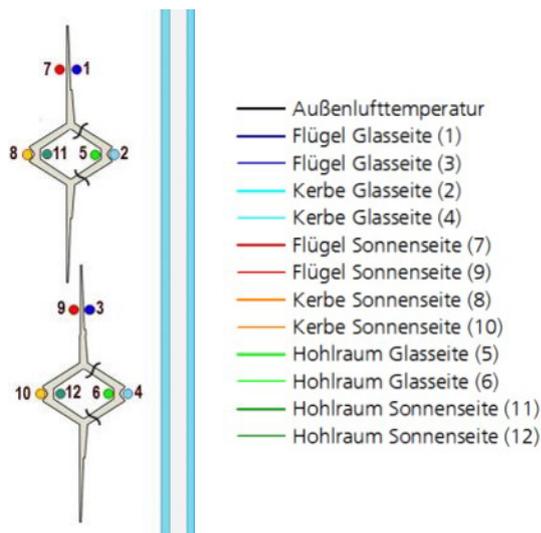


Abb. 145: Übersicht der 12 Temperaturmessstellen (Fh-IBP)



Abb. 146: Temperatursensoren auf Funktionsmodell „Brüstungsbereich“ (Fh-IBP)

unterlegt. Diese sind vergleichbar mit den Kennwerten nach den oben genannten Normverfahren.

Um die Ergebnisse einzuordnen, sollen sie mit Standardwerten nach DIN V 18599-2²² verglichen werden. Maßgebend ist die rot markierte Zeile (Abb. 144), da diese Verglasungskennwerte mit der am Prüfstand verwendeten Verglasung vergleichbar sind. Kennwerte von Jalousien werden in der Regel für die Cut-Off-Stellung (keine direkte Sonneneinstrahlung in den Raum) angegeben.

²² DIN V 18599-2 (2016-10) Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen

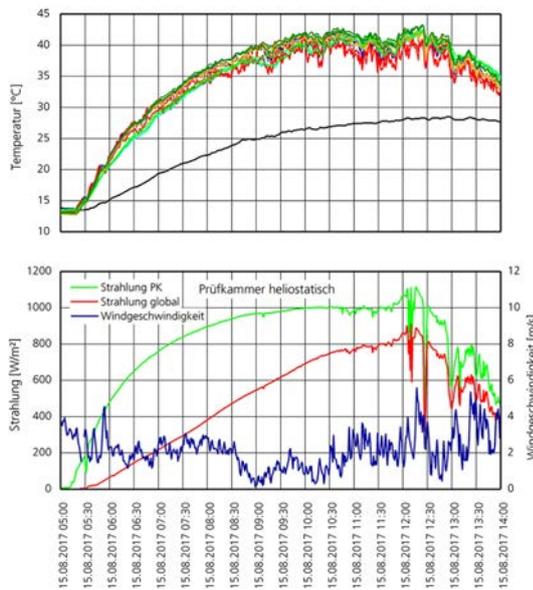


Abb. 147: Profilttemperaturen (1min-Mittelwerte) am 15.08.2017 (Legende siehe Abb. 145 (Fh-IBP))

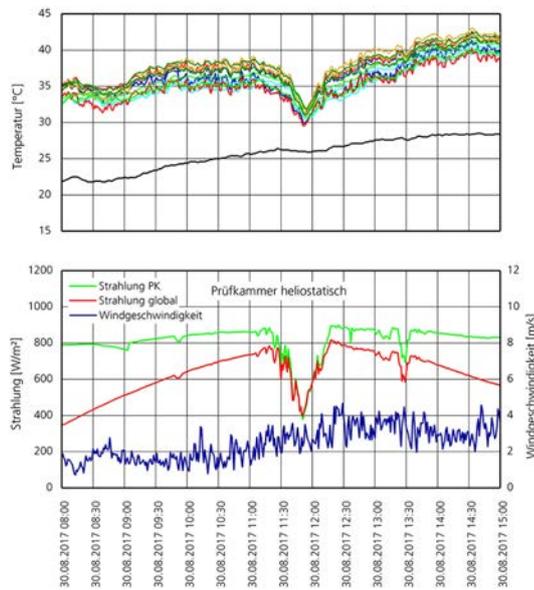


Abb. 148: Profilttemperaturen (1min-Mittelwerte) am 30.08.2017 (Legende siehe Abb. 145 (Fh-IBP))

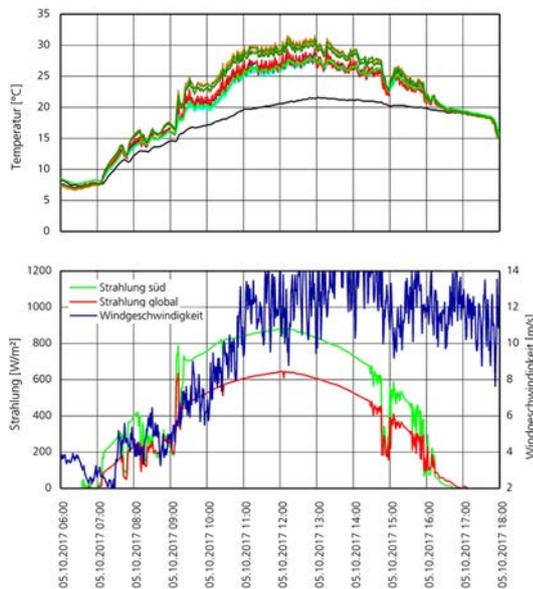


Abb. 149: Profilttemperaturen (1min-Mittelwerte) am 05.10.2017 (Legende siehe Abb. 145 (Fh-IBP))

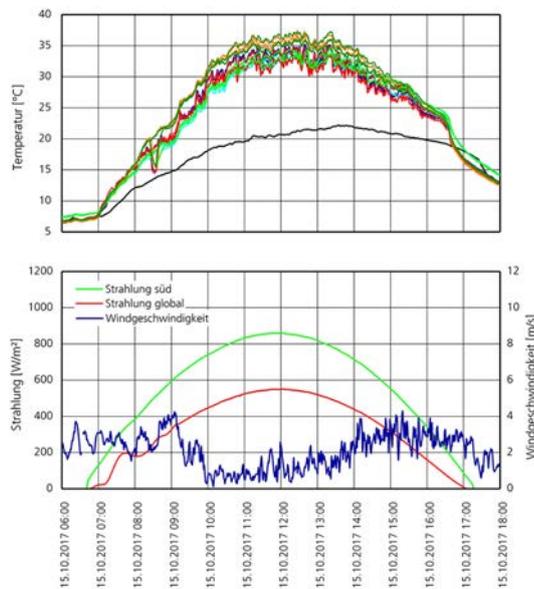


Abb. 150: Profilttemperaturen (1min-Mittelwerte) am 15.10.2017 (Legende siehe Abb. 145 (Fh-IBP))

Vergleicht man den Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} des Sichtbereichs sowie des Brüstungsbereichs inkl. der Verglasung unter einem Höhenwinkel von 30° ($g_{tot,30^\circ}$), entspricht dieser dem Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} bei einer weißen Außenjalousie (45° geneigt, Cut-Off-Stellung) von $g_{tot} = 0,10$. Für den Oberlichtbereich liegt der Gesamtenergiedurchlassgrad ($g_{tot,\perp}$) für eine senkrechte Einstrahlung (entsprechend Normberechnung) mit $0,23$ im Bereich eines dreiviertel geschlossenen Rollladens.

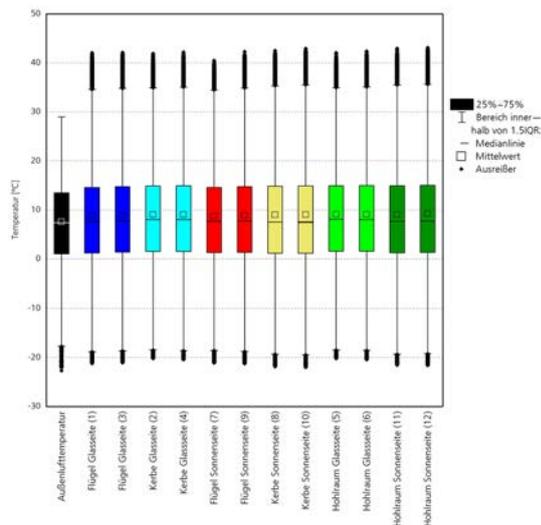


Abb. 151: Außentemperatur und Profilttemperaturen (5 min-Mittelwerte) von August 2017 bis Juni 2018 (Legende siehe Abb. 145 (Fh-IBP))



Abb. 152: Funktionsmodell Brüstungsbereich eingebaut vor Verglasung auf Südseite (Fh-IBP)

FabioW
Ergebnisse
Bemessung

Profilttemperaturen

Nach DIN EN 13659 (2015-07) Anhang A sind für Abschlüsse aus Kunststoff Temperatureinflüsse von Bedeutung und können schon im Entwicklungsstadium berücksichtigt werden, indem die linearen Ausdehnungskoeffizienten sowie die Elastizitätsmodule der Werkstoffe auch für erhöhte Temperaturen beachtet werden. Die Norm differenziert diese nach der Farbe des Behangs (Tabelle A.2). Zur Bestimmung der tatsächlichen Profilttemperaturen unter den vorherrschenden klimatischen Randbedingungen am Versuchsstandort in Holzkirchen werden 12 Temperatursensoren an den Profilen angebracht (Abb. 145 und Abb. 146). In Abb. 147 bis Abb. 150 sind die Temperaturverläufe und Klimadaten beispielhaft für 4 sonnenreiche Tage dargestellt. In den Augusttagen wird die Messung am Funktionsmodell „Brüstungsbereich“ am Prüfstand gemessen (Abb. 147 und Abb. 148). Bei den Messungen im Oktober (Abb. 149 und Abb. 150) wurde dasselbe Funktionsmodell vor einer Verglasung an der Südfassade eines Testgebäudes am Fraunhofer IBP in Holzkirchen installiert (Abb. 152).

Abb. 151 zeigt die Verteilung der Profilttemperaturen sowie der Außenlufttemperatur mit den entsprechenden Mittelwerten und Medianen von August 2017 bis Juni 2018.

5 Marktanalysen – Marktpotenzial

FabioW
Ergebnisse
Marktanalysen –
Marktpotenzial

Das Modell der Triangulation findet im Folgenden Anwendung bei der Berechnung des Marktpotenzials der Baukomponente Fassadenladen. Hier werden jeweils zwei unterschiedliche, methodische Ansätze hinzugezogen, deren Resultate im Nachgang zusammengeführt und auf Fehlersensitivität geprüft werden. Im Rahmen des Projektes wird im Weiteren das qualifizierte Marktpotenzial beispielhaft für das Teilsegment Büro- und Verwaltungsbau (BuV) mittels der Methodik der Triangulation ermittelt. Entsprechende Vorarbeiten wurden zudem in den Teilsegmenten des privaten Wohnungsbaus, für Bauten des Gesundheitswesens sowie für den Hotel- und Gaststättenbau durchgeführt.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung des qualifizierten Marktpotenzials lässt sich anhand folgender Schritte darstellen:

- Zielformulierung/Identifikation des relevanten Marktes
- Berechnung mittels zweier methodischer Zugänge (a: deduktive Ableitung, bei der die Marktgröße von der Bedarfsseite aus bestimmt wird und b: Induktive Herleitung über die Absatzvolumina einzelner Anbieter)
- Zusammenführung der Ergebnisse und Plausibilitätsprüfung

Das Ziel der Marktpotenzialanalyse ist die Ermittlung des jährlichen, qualifizierten Marktpotenzials von Fensterflächen²³ im BuV-Markt in Deutschland. Qualifiziert bedeutet in diesem Zusammenhang, dass nicht alle am BuV-Markt bestehenden Fensterflächen hinsichtlich einer Markteinschätzung bzgl. Fassadenladen relevant sind. Um sich dem qualifizierten Marktpotenzial zu nähern, werden somit einerseits Neubauten und andererseits Sanierungen analysiert, da hier tatsächlich jährlich Potenzial im Rahmen einer erstmaligen bzw. erneuten Bestückung entsteht. Die Anwendung zweier Methodenzugänge dient der wechselseitigen Überprüfung der abgeleiteten Marktpotenzialgröße.

5.1 Deduktive Herleitung – Bestimmung des Bedarfs im BuV-Markt

Hierfür werden bekannte Marktvolumina aus übergeordneten, bedarfsbestimmenden Größen herangezogen. Im Fall des Fensters als einzelnes Bauteil sind hier der Baubestand von BuV-Gebäuden für den Bedarf durch Sanierungen, sowie die jährlichen Baugenehmigungen im BuV-Markt für den Bedarf durch Neubauten relevant. Anhand dessen können im weiteren Verlauf die Fensterflächen abgeleitet werden, sowie weitere Qualifizierungskriterien bestimmt werden. (Abb. 153)



Abb. 153: Teilbedarf Neubauten und Sanierungen (THN-BW)

²³ Die Bezeichnung „Fensterfläche“ bezieht sich allgemein auf Öffnungen, d.h. umfasst sowohl bewegliche Fensterflügel als auch Festverglasungen.

Berechnung des Teilbedarfs durch Sanierungen

Der BuV-Baubestand beläuft sich auf eine Bruttogrundfläche²⁴ von 407 Mio. m² (Stand 2012) und auf eine Nutzfläche²⁵ von 276 Mio. m² (Stand 2011). Für die Ableitung der Belichtungsfläche und somit für die weitere Hinführung zum Marktpotenzial ist allerdings die Nutzfläche eines Gebäudes relevant.

Gemäß dem Institut für Wohnen und Umwelt und dem Bremer Energie-Institut²⁶ liegt die Sanierungsquote bei ca. 0,8 %. Die Erneuerung der Fenster ist bei den Sanierungsmaßnahmen inbegriffen. Für die Berechnung wird angenommen, dass die Sanierungsquote des Gesamtmarktes Deutschland allgemeingültig ist und auf das Teilsegment Büro- und Verwaltungsgebäude übertragen werden kann. Die durch Sanierungen jährlich relevant werdende Fläche beträgt demnach 2,2 Mio. m².²⁷

Im weiteren Verdichtungsprozess folgt die Ableitung der Belichtungsfläche. Da die Größe der Belichtungsfläche innerhalb unterschiedlicher BuV-Gebäude sehr stark variiert, wird neben einem Minimalwert auch ein optimaler Wert bestimmt, um letztendlich einen Korridor des qualifizierten Marktpotenzials zu definieren. Laut gesetzlicher Anforderungen an die Mindestbelichtungsfläche beträgt diese in Bayern²⁸ und der Mehrheit der Bundesländer 1/8 der Raumfläche (=Nutzfläche), sodass die gesamte durch Sanierungen sich ergebende Mindestfensterfläche bei 0,275 Mio. m² liegt. Eine optimale Belichtungsfläche²⁹ von 65 % wird in einem Experteninterview bestätigt. Somit ergibt sich eine gesamte, optimale Fensterfläche von 1,43 Mio. m².³⁰

Im letzten Schritt der Verdichtung erfolgt der Einsatz eines Qualifizierungsfilters. Es wird davon ausgegangen, dass die Nordseite im BuV-Markt aufgrund mangelnder Sonneneinstrahlung nicht mit Fassadenläden ausgestattet wird. Der Sichtschutz als weiteres Kriterium für Fassadenläden spielt eher im Wohnungs-Markt eine Rolle und kann bei Nicht-Wohngebäuden vernachlässigt werden. Somit entspricht die relevante Belichtungsfläche am BuV-Gebäude nur 75 % der Gesamtbelichtungsfläche, d.h. das Intervall des qualifizierten Marktpotenzials durch Sanierungsbedarf liegt zwischen 0,21 Mio. m² und 1,07 Mio. m².³¹

Berechnung des Teilbedarfs durch Neubauten

Für die Berechnung des qualifizierten Marktpotenzials, das sich jährlich durch Neubauten ergibt, wird die Anzahl jährlicher Baugenehmigungen benötigt. Im BuV-Markt liegt der Durchschnittswert aus den Jahren 2011 bis 2015 bei 1700 Neubauten pro Jahr.³²

Des Weiteren wird für die Berechnung des jährlich entstehenden Bauvolumens durch Neubauten die durchschnittliche Nutzfläche eines BuV-Gebäudes benötigt, welche mit der Anzahl jährlich entstehender Neubauten multipliziert wird. Hierzu wird der bereits ermittelte Gesamtbestand von 276 Mio. m² herangezogen. Das BVMB (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung³³ beziffert die Anzahl der BuV-Gebäude in Deutschland im Jahr 2011 auf 189.000, sodass sich eine durchschnittliche Größe eines BuV-Gebäudes von 1460 m² ergibt.³⁴

²⁴ <https://www.zia-deutschland.de> (2012) <30.05.2016>

²⁵ http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2011/DL_O_N162011.pdf <30.05.2016>

²⁶ Dehmer, Dagmar: Energieeffizienz. Verloren im Sanierungsdschungel. In: Tagesspiegel, 24.08.2018, o.S. <http://www.tagesspiegel.de> <30.05.2016>

²⁷ 276 Mio. m² * 0,008 ~ 2,2 Mio. m² (Jährliche Sanierungsfläche BuV)

²⁸ Bayerische Bauordnung (BayBO) 2015 / Art. 45 (4) Aufenthaltsräume. <http://www.baurecht.de/landesbauordnung-Bayern.html#Aufenthaltsraeume> <30.05.2016>

²⁹ Verglasungs- und Fensterflächenanteil. <https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/vertikale-glaselemente/verglasungs--und-fensterflaechenanteil-5506645> <08.06.2016>

³⁰ 2,2 Mio. m² * 0,125 ~ 0,275 Mio. m² (Minimale Belichtungsfläche Gesamt)

2,2 Mio. m² * 0,65 ~ 1,43 Mio. m² (Optimale Belichtungsfläche Gesamt)

³¹ 0,275 Mio. m² * 0,75; 1,43 Mio. m² * 0,75] ~ [0,21 Mio. m²; 1,07 Mio. m²

³² Energieeffizienz bei Büroimmobilien. dena-Analyse über den Gebäudebestand und seine energetische Situation. Berlin 2016, S. 10

³³ vgl. Anm. 16

³⁴ 276 Mio. m² / 189.000 ~ 1460 m² (Durchschnittliche Nutzfläche eines BuV)

Durch die zuvor ermittelte Anzahl jährlicher Neubauten von 1700 wird nun das jährlich entstehende Bauvolumen durch Neubauten berechnet.³⁵ Anhand dieses Wertes wird im weiteren Verlauf die Belichtungsfläche abgeleitet. Das Intervall der gesamten Belichtungsfläche, das sich jährlich durch Neubauten ergibt, liegt zwischen 0,31 Mio. m² und 1,61 Mio. m².³⁶ Nach Abzug der Nordseite verbleibt ein qualifiziertes Marktpotenzial, das sich zwischen 0,23 Mio. m² und 1,21 Mio. m² bewegt.³⁷ Das gesamte, deduktiv ermittelte Marktpotenzial, liegt zwischen 0,44 und 2,28 Mio. m².

Induktive Herleitung – Bestimmung des Angebots im BuV-Markt

Im Rahmen des induktiven Ansatzes wird das Marktpotenzial durch die Angebotsseite analysiert. Ziel hierbei ist es, durch Aufaddieren der einzelnen Absatzvolumina der relevanten Wettbewerber im Fassadengeschäft eine übergreifende, gültige Marktgröße zu erhalten mit der wiederum Rückschlüsse auf den BuV-Markt gezogen werden können.

Im ersten Schritt werden die im DACH-Markt tätigen Unternehmen identifiziert, welche die folgenden Qualifizierungskriterien erfüllen:

- Jahresumsatz (> 4 Mio. €)
- Mitarbeiter (+ 35)
- Markttätigkeit in mindestens einer der vier Produktfelder: Raffstores, Rollläden, Textilscreens und Fensterläden.

Die hieraus sich ergebenden 24 Unternehmen werden mit Hilfe weiterführender Qualifizierungskriterien in Stufe 2 zum relevanten Markt verdichtet.

Die 10 verbleibenden Unternehmen erfüllen folgende Entscheidungskriterien:

- Markttätigkeit in Deutschland
- mind. 20 % des Jahresumsatzes in einer der vier Produktkategorien (bei Unternehmen mit Umsatz p.a. > 100 Mio. € sind es 10 %).

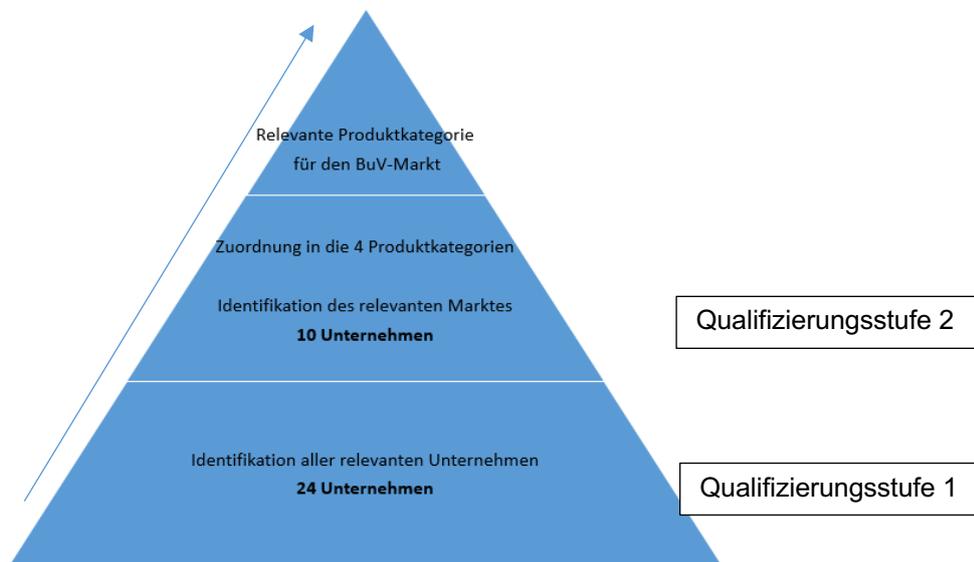


Abb. 154: Vorgehensweise der induktiven Herleitung (THN-BW)

³⁵ 1700 * 1460 m² ~ 2,48 Mio. m² (Jährliches Bauvolumen BuV)

³⁶ 2,48 Mio. m² * 0,125 ~ 0,31 Mio. m² (Minimale Belichtungsfläche Gesamt)
2,48 Mio. m² * 0,65 ~ 1,61 Mio. m² (Optimale Belichtungsfläche Gesamt)

³⁷ 0,31 Mio. m² * 0,75; 1,61 Mio. m² * 0,75] ~ [0,23 Mio. m²; 1,21 Mio. m²

Firma	Umsatz	%-Anteil an A,B,C,D
Alukon KG	73 Mio. € (2011)	80 % an B: 58 Mio. €
Alulux GmbH	75 Mio. € (2011)	80 % an B: 60 Mio. €
Beck+Heun GmbH	55 Mio. € (2011)	90 % an B: 49,5 Mio. €
Blank GmbH	4 Mio. € (2015)	80 % an D: 3,2 Mio. €
Ehret GmbH (Schenker)	46 Mio. € (2014)	90 % an D: 41,4 Mio. €
Hella Sonnen- und Wetterschutztechnik GmbH	174 Mio. € (50 % in Deutschland) (2015)	70 % an A: 61 Mio. €
Erwilo GmbH (KADECO)	33 Mio. € (2010)	20 % an C: 6,6 Mio. €
RENSON®	100 Mio. € (2013)	10 % an C: 10 Mio. €
ROMA KG	200 Mio. € (80 % in Deutschland) (2015)	30 % an A: 54 Mio. € 60 % an B: 108 Mio. € 10 % an C: 18 Mio. €
WAREMA Renkhoff SE	400 Mio. € (2014)	60-80 % (70) an A: 280 Mio. €

Tab. 27: Unternehmen des relevanten Marktes. Umsatz in Mio. € (THN-BW)

% -Verteilung / Jahresumsatz an den vier Produktkategorien in Mio. € (gerundet)				
Raffstore (A)	Rollladen (B)	Textilscreen (C)	Fensterladen (D)	A,B,C,D
395	276	35	45	751

Tab. 28: Umsatzübersicht der vier Produktfelder in Mio. € (THN-BW)

Zudem werden auch die projektbezogenen Unternehmen Gartner, Colt und Seele ausgeklammert, da diese überwiegend global in Sonderbauprojekten tätig sind und der Teil am deutschen BuV-Markt, der durch diese Unternehmen bedient wird, als verhältnismäßig gering angenommen wird (< 1 %). Dies bestätigt die Analyse der bisherigen Projektpreferenzen dieser Unternehmen, wobei nach aktuellem Stand ca. 50 Gebäude (Gesamtbestand: 189.000) des deutschen BuV-Marktes bedient wurden.

Im weiteren Verdichtungsprozess wird heuristisch eingeschätzt,³⁸ welche Rangreihung die zehn Unternehmen in den Produkt- bzw. Marktsegmenten haben und wie sich im Zielmarkt Deutschland erwirtschaftete Umsätze den definierten Produktkategorien zuordnen lassen.

Erste Einschätzungen ergeben die folgende prozentuale Zuordnung am Umsatz (Raffstores: A, Rollläden: B, Textilscreens: C und Fensterläden: D) sowie die daraus resultierende Gesamtübersicht (Tab. 27 und Tab. 28).

Ein Teil der bisher nicht erklärten, residualen Prozente des Umsatzes der jeweiligen Unternehmen entfällt zusätzlich auf die vier relevanten Produktkategorien. Im Zuge dessen wird das gesamte Produktspektrum eines Unternehmens untersucht und folglich geschätzt, wie groß der residuale Anteil des Umsatzes ist, der ebenso auf die relevanten Produktkategorien entfällt und somit in der Hochrechnung hinzugezogen werden muss. Durch die residuale Umsatzverteilung³⁹ (Tab. 30) ergibt sich folgende (bereinigte) Gesamtübersicht für die vier Produktfelder (Tab. 29).

Der Grundsatz des Pareto-Prinzip beschreibt das statistische Phänomen, dass eine kleine Anzahl von hohen Werten einer Wertemenge mehr zu deren Gesamtwert beiträgt als die

³⁸ Basierend auf Vertriebsexpertise der ROMA KG / Herr Christian Könitzer

³⁹ Residuale Umsatzverteilung durch Analyse des Angebotspektrums (Firmenwebsite) sowie Experteneinschätzung der ROMA KG / Herr Christian Könitzer

Inkl. residuärer Umsatzverteilung an den vier Produktkategorien in Mio. € (gerundet)				
Raffstore (A)	Rollladen (B)	Textilscreen (C)	Fensterladen (D)	A,B,C,D
Hella: 61	Alukon: 58	Erwilo: 6,6	Ehret: 41,4	
ROMA: 54	Alulux: 53	Renson: 10	Blank: 3,2	
Warema: 280	Beck+Heun: 49,5	ROMA: 18	Renson: 1	
Renson: 2,5	ROMA: 108	Alukon: 3,7		
Alukon: 3,7	Hella: 2,2	Alulux: 5,25		
Alulux: 5,25	Warema: 40	Warema: 20		
Beck+Heun: 1,4				
Gesamt: 408	Gesamt: 311	Gesamt: 64	Gesamt: 46	Gesamt: 829

Tab. 29: Relevante Unternehmen und residuale Umsatzverteilung auf Produktkategorien (in rot) (THN-BW)

Firmen und Jahresumsatz	Residuärer Anteil, der auf A,B,C oder D entfallen könnte	Anmerkung zu Marktaktivität	Anteil nicht erklärter Prozente durch A,B,C,D (geschätzt)
Alukon 73 Mio. €	0-20 %	4 weitere Produktbereiche u.a. Raffstores und Textil	Je 5 % auf A / C
Alulux 75 Mio. €	0-20 %	3 weitere Produktbereiche, u.a. Raffstores/Textilscreens	Je 7 % auf A / C
Beck + Heun 55 Mio. €	0-10 %	u.a. Raffstores	<5 % (2,5) an A
Blank 4 Mio. €	0-20 %	v.a. Raffstores und Rollläden	Verbleibenden 20 % = 800.000€. Keine weitere Beachtung.
Ehret 46 Mio. €	0-10 %	Nicht relevante, anderweitige Produktbereiche	0
Erwilo (Kadeco) 33 Mio. €	0-80 %	Nicht relevante, anderweitige Produktbereiche	0
Hella 174 Mio. € (50 % in DEU)	0-30 %	8 weitere Produktbereiche, u.a. Rollläden	<5 % (2,5) auf B
Renson (Belgien) 100 Mio. €	0-90 %	Marktführer in Textil mit einem Umsatz von 10 % in Deutschland. Gefolgt von Raffstores und Fensterläden. Geschätzter Anteil daher < als 10 %.	<5 % (2,5) auf A, 1 % auf D
ROMA KG 200 Mio. €		bestimmt	bestimmt
Warema 400 Mio. €	0-30 %	Zweitgrößter Markt: Rollläden, gefolgt von Textil. Weitere Produktbereiche vorhanden.	10 % auf B, 5 % auf C

Tab. 30: Residuale Umsatzverteilung der relevanten Unternehmen (THN-BW)

hohe Anzahl der kleinen Werte dieser Menge. Umgesetzt auf die Marktvolumenberechnung (Gesamtwert), bedeutet dies, dass die 10 selektierten Unternehmen (kleine Anzahl mit relativ hohen Umsatzwerten) bereits ein Gros des definierten Gesamtmarkts bestimmen.

Durch Analyse des Ausstellerverzeichnisses der R+T 2015 (Weltleitmesse für Rollläden und Sonnenschutz) kann die Zahl nicht berücksichtigter, in Deutschland tätiger Kleinunternehmen auf 15 begrenzt werden. Da diese Unternehmen per definitionem < 4 Mio. Umsatz p.a. zum Markt beitragen und maximal 2 Mio. € hiervon jeweils auf die relevanten Produktkategorien entfallen, läge das vernachlässigte Umsatzresiduum demnach bei max. 30 Mio. € p.a. bzw. $30 \text{ Mio. €} / 829 \text{ Mio. €} = 3,5 \%$ (gerundet). Daraus resultiert ein Pareto-Verhältnis hier von 96,5:3,5 bzw. ein Gesamtmarkt der vier Produktkategorien mit einem Umsatzvolumen von 859 Mio. € p. a. (Tab. 31).

Marktanteil 100 % in Mio. € (gerundet) nach Pareto-Prinzip (96,5; 3,5)				
Raffstore	Rollläden	Textilscreen	Fensterladen	Gesamt
423	322	66	48	859

Tab. 31: Umsatzverteilung der 4 Produktfelder nach Pareto-Hochrechnung (THN-BW)

Das gesamte Marktvolumen verteilt sich auf die vier Kategorien Raffstore, Rollläden, Textilscreens und Fensterläden. Um mögliche Absatzpotenziale aufzuzeigen und eine Vergleichsbasis zu ermöglichen, werden die Umsätze für alle Produktbereiche mitgeführt. Um nun die Marktgröße für den BuV-Markt zu schätzen, wird angenommen, dass BuV-Gebäude grundsätzlich mit Raffstores (100 %) als Fassadenläden ausgestattet werden. Somit bildet die durch Raffstores ermittelte, monetäre Größe von 423 Mio. €, die Obergrenze der Marktgröße für den BuV-Markt. Obergrenze insofern, da ein (noch) unbekannter Teil dieses Absatzpotenzials auf andere Segmente, wie z.B. den Wohnungsmarkt, entfällt. Ebenso ist es möglich, dass die Verteilung im BuV-Markt sich aus Raffstores (z.B. 90 %) und Textil (z.B. 10 %) zusammensetzt. Dies muss im Rahmen weiterer Marktforschungsaktivitäten überprüft werden.

5.2 Zusammenführung der Ergebnisse

Um nun einen Vergleich des ermittelten Marktpotenzials aus Bedarfs- und Angebotsseite zu ermöglichen, erfolgt zuerst eine Umrechnung auf den gemeinsamen Nenner: Flächenmaß (m²). Das zuvor über die deduktive Methode ermittelte, qualifizierte Marktpotenzial liegt zwischen 0,44 Mio. m² und 2,28 Mio. m². Die induktiv ermittelte Marktgröße von 423 Mio. € wird mittels exemplarischer Mindest- und Maximalkaufpreise (pro m²) für Raffstores umgerechnet. Es folgt eine beispielhafte Berechnung, wobei sich die Preise ab Werk am Angebotsspektrum der Firma ROMA KG orientieren.

- Raffstore ROMA (min.) pro m² = 200,00 €
- Raffstore ROMA (max.) pro m² = 890,00 €

Intervall des Marktpotenzials durch deduktive Herleitung	Intervall des Marktpotenzials durch induktive Herleitung
[0,44 Mio. m²; 2,28 Mio. m²]	[0,48 Mio. m²; 2,12 Mio. m²]

Tab. 32: Übersicht der induktiv und deduktiv ermittelten Intervalle (THN-BW)

Hieraus folgt für die Anbieterseite (deduktiv und induktiv ermittelte Intervalle liegen in einem ähnlichen Größenbereich):

- Qualifiziertes Marktpotenzial Raffstores in m² (min.) = Jährlicher Gesamtumsatz (Raffstores) / Preis pro m² (min.) = $423 \text{ Mio. €} / 200,00 \text{ € pro m}^2 = 2,12 \text{ Mio. m}^2$
- Qualifiziertes Marktpotenzial Raffstores in m² (max.) = Jährlicher Gesamtumsatz (Raffstores) / Preis pro m² (max.) = $423 \text{ Mio. €} / 890,00 \text{ € pro m}^2 = 0,48 \text{ Mio. m}^2$

5.3 Fehlersensitivitätsanalyse

Annahme	Modifizierte Annahme(n)
Sanierungsquote	Annahme 1: 0,8 % Annahme 1a: 2 %
Belichtungsfläche	Annahme 2: [12,5 % ; 65 %] Annahme 2a: [12,5 % ; 39 %] Annahme 2b [12, 5 % ; 20 %]
Abzug der Nordseite	Annahme 3: Abzug von 25 % Annahme 3a: Kein Abzug 0 % Annahme 3b: Pauschalabzug 12,5 %

Tab. 33: Übersicht der (modifizierten) Annahmen im deduktiven Ansatz.

Jede der getroffenen Annahmen muss kritisch hinterfragt werden, um eventuelle Diskrepanzen und Verzerrungen aufzeigen und auf zukünftige Verbesserungspotenziale hinweisen zu können. Kritische Daten im deduktiven Ansatz, die Einfluss auf die Fehlersensitivität haben, sind die Sanierungsquote, die optimale Belichtungsfläche sowie die Irrelevanz der Nordseite eines BuV-Gebäudes. Für diese kritischen Daten wurden modifizierte Annahmen gebildet (Tab. 33). Stehen keine näheren Daten zur Verfügung, wurden die modifizierten Annahmen so ausgerichtet, dass Best-, Worst-, und Average-Case-Szenarien aufgegriffen werden. Bestehen jedoch Hinweise auf nähere Daten, wie z.B. bei der Sanierungsquote, bei der diverse Institute auf eine Quote von 2 % verweisen⁴⁰, baut die veränderte Annahme darauf auf (Tab. 37).

Unter Anwendung und beliebiger Kombination dieser modifizierten Annahmen zeigt die folgende Übersicht (Tab. 34) die Auswirkungen auf das qualifizierte Marktpotenzial. Es lassen sich Worst- (0,98 Mio. m²), Average- (1,36 Mio. m²) und Best-Case- (2,06 Mio. m²) Szenarien zuordnen.

Sanierungsquote	Belichtungsfläche	Abzug Nordseite	Qual. Marktpotenzial in Mio. m ²	Mittelwert in Mio. m ²
1	2	3	[0,44; 2,28]	1,36
1a	2	3	[0,75; 3,9]	2,02
1a	2a	3	[0,75; 2,34]	1,55
1a	2b	3	[0,75; 1,2]	0,98
1a	2a	3a	[1; 3,12]	2,06
1a	2b	3a	[1; 1,6]	1,3
1a	2a	3b	[0,88; 2,73]	1,81
1a	2b	3b	[0,85; 1,4]	1,13

Tab. 34: Kombination der (modifizierten) Annahmen im deduktiven Ansatz.

Die induktive Herleitung beruht auf einer komplexeren Annahmenkette und jedes Annahmeglied weist einen Fehlertoleranzbereich auf. Die Annahmen werden zum heutigen Stand

⁴⁰ vgl. u.a. International Energy Agency, Paris

durch einen Experten mit langjähriger Fachexpertise gestützt. Vertiefende Marktforschungsaktivitäten verfolgen das Ziel, die Annahmekette durch zusätzliche Experteninterviews zu validieren. Folgende Annahmen haben Einfluss auf die Fehlersensitivität:

- Jahresumsatzzahlen selektierter Unternehmen aus abweichenden Geschäftsjahren
- Heuristische Umsatzzuordnung in die Produktkategorie Raffstore
- Übertragung des jährlichen Marktvolumens für Raffstores komplett auf den BuV-Markt
- Festlegung der ab Werk Preisspanne für Raffstoren.

Eine Übersicht der modifizierten Annahmen (Tab. 38) des induktiven Ansatzes ist Tab. 35 zu entnehmen.

Annahme	Modifizierte Annahme(n)
Jahresumsatzzahlen aus abweichenden GJ	Annahme 4: 1160 € Marktvolumen (Gesamt) Annahme 4a: 1100 € Marktvolumen (Gesamt) (Rückschreibung der Umsätze auf das Basisjahr 2011, das auch im deduktiven Ansatz gilt, erfolgt mit Abzug der durchschnittlichen Wachstumsquote in der Fensterindustrie)
Heuristische Umsatzzuordnung (Raffstore)	Annahme 5: 70 % WAREMA anteilig an Raffstores Annahme 5a: 60 % WAREMA anteilig an Raffstores Annahme 5b: 80 % WAREMA anteilig an Raffstores
Übertragung des jährlichen Marktvolumens (Raffstore) komplett auf BuV-Markt	Annahme 6: 100 % Raffstore Marktvolumen auf BuV-Markt Annahme 6a: Korrektur um – 50 %
Festlegung der ab Werk Preisspanne (Raffstore)	Annahme 7: 200 € min., 890 € max. Annahme 7a: 128 € min., 890 € max.

Tab. 35: Übersicht der (modifizierten) Annahmen im induktiven Ansatz.

In Tab. 36 werden die Auswirkungen auf das qualifizierte Marktpotenzial bei beliebiger Kombination der modifizierten Annahmen dargestellt. Auch für die induktive Bestimmung des qualifizierten Marktpotenzials lassen sich Worst-Case- (0,53 Mio. m²), Average-Case- (1,28 Mio. m²) und Best-Case- (1,76 Mio. m²) Szenarien zuordnen.

Umsatz- zahlen	Heuristische Zuordnung	Übertragung BuV-Markt	Umrechnung	Min. in Mio. m²	Max. in Mio. m²	Mittelwert in Mio. m²
4	5	6	7	0,44	2,12	1,28
4a	5a	6	7	0,39	1,72	1,05
4a	5b	6	7	0,47	2,10	1,29
4a	5a	6a	7	0,19	0,86	0,53
4a	5b	6a	7	0,24	1,05	0,64
4a	5a	6a	7a	0,19	2,69	1,44
4a	5b	6a	7a	0,24	3,28	1,76

Tab. 36: Kombination der modifizierten Annahmen im induktiven Ansatz.

<p>Deduktive Herleitung - Sanierungsquote</p> <p>Annahme 1: 0,8 % Eine Sanierungsquote von 0,8 % würde bei einer Anzahl von 189.000 BuV-Gebäuden einer Sanierung eines BuV-Gebäudes nach mehr als 100 Jahren entsprechen. Infolgedessen wird eine modifizierte Annahme mit einer geeignete(re)n Sanierungsquote formuliert.</p> <p>Annahme 1a: 2 % Hierfür wird eine Sanierungsquote von 2 % zugrunde gelegt</p> <p>Deduktive Herleitung – Belichtungsfläche</p> <p>Annahme 2: [12,5;65 %] Während die minimale Belichtungsfläche gesetzlich fundiert ist, gibt es wenig Aufschluss über die optimale Belichtungsfläche. Eine optimale Belichtungsfläche von 65 % wird nur in einem verhältnismäßig geringen Anteil der BuV-Gebäude umgesetzt sein.</p> <p>Annahme 2a: [12,5;39 %] / Annahme 2b: [12,5;20 %] Da aktuell keine näheren Daten zur Verfügung stehen, werden modifizierte Annahmen eingeführt, die die maximale Belichtungsfläche mit 39 % (angepasstes Best-Case-Szenario) sowie mit 20 % (Average-Case-Szenario) aufgreifen.</p> <p>Deduktive Herleitung - Nordseite</p> <p>Annahme 3: abzüglich 25 % Durch Marktforschungsaktivitäten ist zu prüfen, ob ein Abzug der Nordfassaden bzw. von 25 % dem Regelfall entspricht oder ob der Anteil der Gebäude, die z.B. NO- oder NW-Ausrichtung haben, doch so hoch ist, dass nicht pauschal von allen Gebäuden 25 % abgezogen werden können.</p> <p>Annahme 3a: abzüglich 0 % / Annahme 3b: abzüglich 12,5 % Um aufzuzeigen, wie sich der Marktpotenzialkorridor bei einem Best-Case- (kein Abzug: 0 %) und Average-Szenario (Abzug 12,5 %) entwickelt, werden die modifizierten Annahmen entsprechend formuliert.</p>
--

Tab. 37: Modifizierte Annahmen der deduktiven Herleitung (THN-BW)

<p>Induktive Herleitung – Jahresumsatzzahlen aus abweichenden GJ</p> <p>Annahme 4: 1160 € (gesamte Marktgröße) Die ermittelten Umsatzzahlen stammen aus unterschiedlichen Geschäftsjahren (2010 – 2015). Zur Abschätzung der zu erwartenden Fehlertoleranz wurden diese auf das Jahr 2011 fort- bzw. rückgeschrieben, da dieses auch im deduktiven Ansatz als Basisjahr gilt.</p> <p>Annahme 4a: 1100 € (gesamte, bereinigte Marktgröße) Die Rückschreibung erfolgt unter Abzug der durchschnittlichen, jährlichen Wachstumsquote in der Fensterbranche von 2 %. Es ergibt sich eine bereinigte Marktgröße von 1100 Mio. €.</p> <p>Induktive Herleitung – Heuristische Umsatzzuordnung Raffstore</p> <p>Annahme 5: 70 % des Umsatzes von Warema Hinsichtlich der heuristischen Umsatzzuordnung in die Produktkategorie Raffstore wird davon ausgegangen, dass die prozentualen Werte nach bestem Wissen und Gewissen des Experten angegeben wurden und lediglich bei der in einer Spanne angegebenen Schätzung bei Warema Unsicherheiten für eine genaue Umsatzverteilung vorlagen. Laut Experte entfallen 60 bis 80 % des Umsatzes von Warema auf die Produktkategorie Raffstore.</p> <p>Annahme 5a: [60 %] / Annahme 5b: [80 %] Während bei der ursprünglichen Herleitung der Marktgröße, ein Mittelwert von 70 % herangezogen wird, werden im Weiteren modifizierte Annahmen gebildet, die die Marktgröße entsprechend nach unten bzw. oben korrigieren (Best-/Worst-Case-Szenario).</p> <p>Induktive Herleitung – Übertragung des jährlichen Marktvolumens (Raffstores) zu 100 % auf den BuV-Markt</p>

<p>Annahme 6: Anrechnung 100 % Das jährliche Absatzvolumen durch Raffstores wird zu 100 % auf den BuV-Markt übertragen, da nach aktuellem Stand und noch unzureichender Datenlage keine Kenntnisse über die %-Verteilung der einzelnen Produktkategorien auf die (Teil-)Segmente vorliegen.</p>
<p>Annahme 6a: abzüglich 50 % Da ein aktuell noch nicht abschätzbarer Teil der Raffstores auf weitere Segmente entfällt (v.a. auf den verhältnismäßig großen Wohnungsmarkt), muss die Marktgröße des BuV-Marktes nach unten korrigiert werden. Da dort im Gegenzug auch ein Einsatz von Textil-screens denkbar ist, erhöht sich die Marktgröße wiederum marginal. Infolgedessen wird nach aktuellem Stand die Marktgröße ex post um 50 % nach unten korrigiert.</p>
<p>Induktive Herleitung – Festlegung der ab Werk Preisspanne (ROMA KG)</p>
<p>Annahme 7: [200 €; 890 €] Da ROMA eher hochpreisig angesiedelt ist, wird für die modifizierte Annahme nach dem günstigsten Preis pro m² Raffstore gesucht.</p>
<p>Annahme 7a: [128 €; 890 €] Der Online-Shop <i>Raffstore24</i> (Raffstore24 (2017) o. S.) bietet den Quadratmeterpreis 128 €.</p>

Tab. 38: Modifizierte Annahmen der induktiven Herleitung (THN-BW)

5.4 Planung und Durchführung eines Konzepttests zur Messung der Marktakzeptanz: Motivation, Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Ziel der Arbeiten ist es, die Akzeptanz künftiger Nutzer und Käufer des Fassadenladens zu ermitteln. Für eine solche Marktforschungsmaßnahme in einem frühen Stadium des Innovationsprozesses eignet sich das Verfahren des Konzepttests. Diese sind Teil der Primärmarktforschung, die die Erhebung primärer Daten aus eigenen Mitteln umfasst. Konzepttests werden noch vor der Realisierung neuer Produkte, also in einer frühen Phase des Innovationsprozesses, eingesetzt, um Produktideen zu bewerten.

Um eine solche Überprüfung durchzuführen, ist es wichtig, Entwürfe sowie Ideen anschaulich darzustellen, da dem Befragten zu diesem frühen Zeitpunkt der Innovationsphase noch keine konkreten Anschauungsgegenstände wie erste Funktionsmodelle oder Prototypen zur Veranschaulichung des Konzepts vorliegen. Skizzen, verbale Beschreibungen des Produktes, aber auch computergestützte Modelle sowie Zeichnungen und Abbildungen dienen zu einer solchen Veranschaulichung des Konzepts. Weiterhin muss die Zielgruppe der Befragung festgelegt werden. Der Konzepttest bietet die Möglichkeit, Änderungen am Produkt vorzunehmen, die auf Auswertungen der Marktforschungsmaßnahmen basieren.⁴¹

Definition Akzeptanz des Fassadenladens

Zur Messung des Konstruktes Akzeptanz wurde einerseits die Wahrnehmung von Produktvorteilen herangezogen und andererseits Informationen über Kauf-, Weiterempfehlungs- und Zahlungsbereitschaften erhoben. Notwendig für das Vorhandensein von Akzeptanz einer Innovation ist zunächst das Erkennen von Produktvorteilen und deren Überlegenheit gegenüber anderen Lösungen. Die konativen Dimensionen der Einstellung, Kauf-, Weiterempfehlungs- und Zahlungsbereitschaft dienen einer Plausibilitätsprüfung.

5.4.1 Erhebungsdesign und Stichprobendefinition

Zunächst wurde die Methode der Befragung als quantitative Methode der Marktforschung gewählt. Grundlage der Befragung ist ein Fragebogen. Die Befragung wurde auf einer Plattform, auf der die zuvor definierten Zielgruppen anzufinden sind, durchgeführt. Die Erhebung besteht aus vier Teilen, die jeweils Fragen zu produktspezifischen Vorteilen des Fassadenladens beinhalten. Verwendet wurden sowohl offene als auch geschlossene Fragen, die entweder anhand einer sechsstufigen „Likert“-Skalierung oder einer dichotomen Nominalskala

⁴¹ Fantapié Altobelli, Claudia; Hoffmann, Sascha: Grundlagen der Marktforschung. Konstanz [u.a.] 2011, S. 417ff.

abgefragt werden. Bei allen Antwortmöglichkeiten besteht stets die Möglichkeit der Nichtbeantwortung („kann ich nicht beurteilen“ oder „keine Antwort“). Fragen wurden zu den folgenden Themenbereichen gestellt:

Fragebogen Teil 1: Produktvorteile

Elementare Produktvorteile des neuen Fassadenelements:

- biogener Werkstoff als nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Materialien
- optimale Nutzung von Tageslicht
- optimierte Sicht- und Blendschutz
- modulares Baukastensystem, bietet viel Spielraum in der Wahl der Profil-Anordnung
- Vielzahl an gestalterischen Möglichkeiten

Diese werden jeweils zunächst allgemein mit Blick auf ihre Bedeutung und schließlich in Bezug auf den Fassadenladen abgefragt.

Fragebogen Teil 2: Vergleich Fassadenladen/Raffstore

Das Produkt wird mit einem konkurrenzfähigen Produkt verglichen. Hierfür wurde der Raffstore als eine der meistgekauften Sonnenschutzlösungen als Vergleichsprodukt gewählt. Der Vergleich mit dem Raffstore erfolgt anhand der folgenden Kriterien:

- Flexibilität in der Einstellung des Sonnenschutzelementes
- Ästhetik und Design des Bauteils
- optimale Tageslichtnutzung und Raumqualität

Fragebogen Teil 3: Kauf-, Weiterempfehlungs-, Zahlungsbereitschaft

Dieser Teil des Fragebogens besteht aus geschlossenen Fragen zu Themen wie der Zahlungsbereitschaft des Kunden sowie offenen Fragen. Die geschlossenen Fragen decken die folgenden Aspekte ab:

- Kaufbereitschaft
- Weiterempfehlungsbereitschaft
- Zahlungsbereitschaft

Teil drei beinhaltet zudem drei offene Fragen. Fragen eins und zwei sollen ergänzende Produktvor- und -nachteile in offener Form offenlegen. Die letzte Frage schließlich dient dem Probanden dazu, dem Forschungsteam Anmerkungen und Wünsche insgesamt mitzuteilen.

Fragebogen Teil 4: Soziodemografische Angaben der Befragten und Visualisierungen

Soziodemografische Angaben zum Befragten, ermöglichen es später in der Auswertung der Befragung, anhand verschiedener Erhebungsgruppen Unterschiede herauszufiltern und Erkenntnisse aus Vergleichen der verschiedenen Gruppen zu gewinnen. Für den Konzepttest wurden neben dem Fragebogen zur Veranschaulichung Bilder und Skizzen bereitgestellt, die den erst mündlich beschriebenen Fassadenladen anschaulich darstellen. Es wurden jeweils zwei Darstellungen zu Ästhetik und Design des Fassadenelementes, zu Sicht- und Blendschutz und zur Tageslichtnutzung im Raum verwendet. Weiterhin wurden zwei Skizzen zum Zonenkonzept des Fassadenladens und vier Darstellungen für den Vergleich mit dem Raffstore erstellt und dem Befragten während des Interviews zur Verfügung gestellt.

Stichprobendefinition

Die Auswahl der Stichprobe erfolgte innerhalb des „Buying-Networks“ im Branchenumfeld des Baugewerbes – hier speziell für Lösungen im Sicht- und Blendschutz sowie im Fensterbau. Die Befragungen wurden teilweise auf der Fachmesse Fensterbau Frontale⁴² durchgeführt. Deren Besucherprofil setzt sich aus Fachbesuchern verschiedener Branchen wie Fensterbau, Holzbau, Sonnenschutz und Planungswesen zusammen. Mit der Roma KG als

⁴² Messe für Fenster, Tür und Fassade 21. - 24.03.2018 in Nürnberg

Projektpartner bestand die Möglichkeit, die Befragung auf deren Messestand durchzuführen, wodurch die Ansprache der Befragten vereinfacht werden konnte. Weiterhin wurden Befragungen mit Architekten an der Fakultät Architektur durchgeführt.

5.4.2 Ergebnisse der empirischen Studie

Die befragten Personen setzten sich aus den folgenden Gruppen zusammen:

Rolle	Anzahl	Prozent
Produktmanager / Marketing	10	22,2
Beschaffungsumfeld ⁴³	14	37,8
Geschäftsführer / Unternehmen Bereich Fensterbau und Sonnenschutz	7	15,6
Architekten	11	24,4
Gesamt	45	100,0

Tab. 39: Rollenverteilung der Befragten

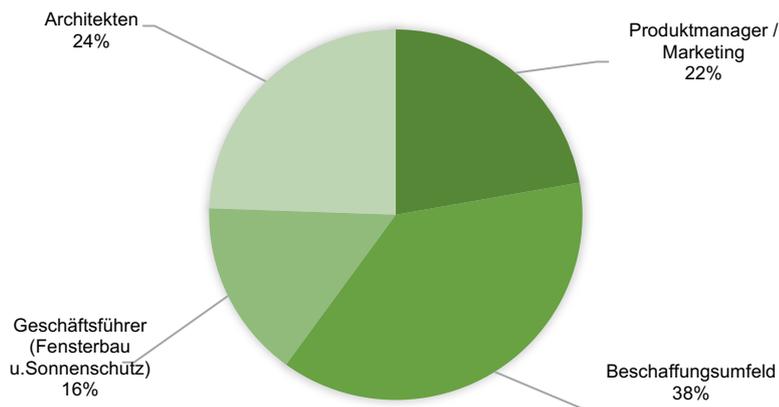


Abb. 155: Rollenverteilung der Befragten

Nach der Analyse der Rolle der Befragten folgt der erste Teil der Befragung, der die Produktvorteile zunächst allgemein und schließlich in Bezug auf den Fassadenladen abfragt.

Punkt eins, der sich mit dem Aspekt der Nachhaltigkeit befasst, wird detailliert dargestellt; auf die anderen abgefragten Kriterien wird im Anschluss kurz eingegangen.

Teil 1 des Fragebogens

- Frage 1.1

„Die Verwendung biogener Werkstoffe hat bei der Materialauswahl unseres Unternehmens bzw. der Kaufentscheidung unserer Kunden einen hohen Stellenwert.“

⁴³ Befragte aus dem Beschaffungsumfeld waren beispielsweise Technische Angestellte von Unternehmen

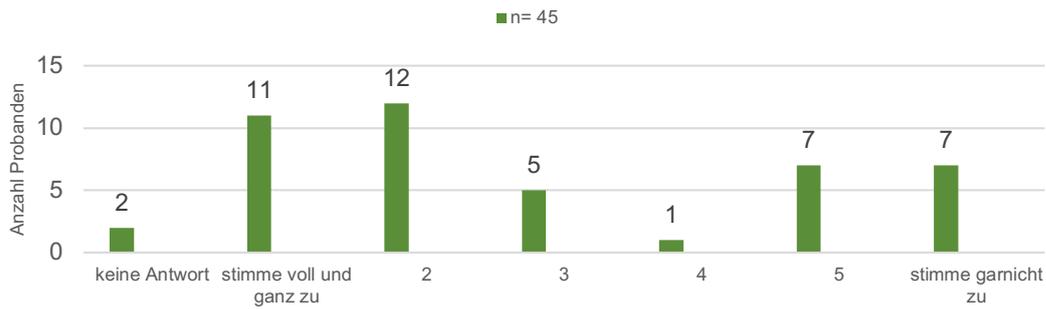


Abb. 156: Stellenwert Nachhaltigkeit im Fassadenbau

- Frage 1.2

„Das Profil des Fassadenladens, überwiegend basierend auf biogenen Werkstoffen, bietet eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Sonnenschutzsystemen.“

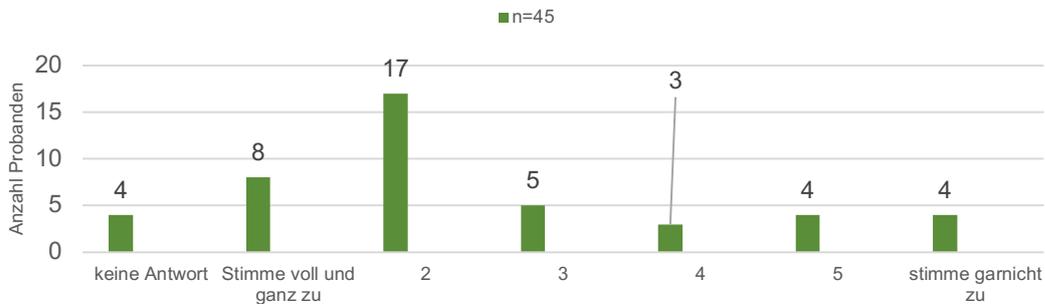


Abb. 157: Der Fassadenladen als alternatives Sonnenschutzelement

Es wird deutlich, dass der Aspekt der Nachhaltigkeit sehr unterschiedlich wahrgenommen wird; mit einem Median von 2,0 sind die Wichtigkeit der Nachhaltigkeit allgemein und der Ansatz beim Fassadenladen jedoch als gut bis verhalten zu bezeichnen. In Hinblick auf die Akzeptanz kann dieser Wert als positiv, aber nicht ausschlaggebend, eingeschätzt werden.

Frage	1.1 „Die Verwendung biogener Werkstoffe hat bei der Materialauswahl unseres Unternehmens bzw. der Kaufentscheidung unserer Kunden einen hohen Stellenwert.“	1.2 „Das Profil des Fassadenladens, überwiegend basierend auf biogenen Werkstoffen, bietet eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Sonnenschutzsystemen.“	2.1 „Ein Sonnenschutzsystem anhand der Zonen einer Fassade zu unterteilen sehe ich aufgrund verschiedener Anforderungen an Sicht- und Blendschutz und Tageslichtnutzung als großen Vorteil an.“	2.2 „Das Zonenkonzept des Fassadenladens wird den Anforderungen an den Sonnenschutz in besonderem Maße gerecht.“
Mittelwert	2,91	2,51	1,76	2,13
Median	2	2	1	2

Tab. 40: Produktvorteile Teil 1

3.1 „Bei Wahl eines Sonnenschutzes wird auf eine optimale Tageslichtnutzung besonders Wert gelegt.“	3.2 „Der Fassadenladen bietet das Potential einer optimierten Tageslichtnutzung.“	4.1 „Bei Wahl eines Sonnenschutzes wird auf einen effektiven Sicht- und Blendschutz besonders Wert gelegt.“	4.2 „Der Fassadenladen bietet einen optimierten Sicht- und Blendschutz.“	5.1 „Elemente des Sonnenschutzes sollten bei optisch / ästhetischer Gestaltung von Fassaden eine große Rolle spielen.“	5.2 „Der Fassadenladen bietet durch seinen modularen Aufbau eine hohe Vielzahl an faszinierenden ästhetischen Gestaltungsmöglichkeiten.“
1,22	2,13	1,22	2,02	1,62	2,60
1	2	1	2	1	2

Tab. 41: Produktvorteile Teil 2.

Teil 2 des Fragebogens

Es folgt ein Vergleich des Fassadenladens mit einem herkömmlichen Raffstore:

Frage	Fassadenladen 6.1 Einstellung von Zonen und La- mellen	Raffstore 6.2 Einstellung von Zonen u. Lamel- len	Fassadenladen 7.1 Ästhetik und Design der Fassadenele- mente	Raffstore 7.2 Ästhetik und De- sign der Fassaden- elemente	Fassadenladen 8.1 Raumqualität durch Tages- lichtnutzung und Lichteinfall	Raffstore 8.2 Raumqua- lität durch Tageslicht- nutzung und Licht- einfall
Mittelwert	2,88	3,88	3,66	4,16	3,05	4,38
Median	2	3	3	4	3	4

Tab. 42: Vergleich mit Raffstore

grüne Markierung = Lösung, die in einem direkten Vergleich besser abschneidet;
rote Markierung = Lösung, die in einem direkten Vergleich schlechter abschneidet

Die Vergleiche der Mittelwerte und des Median aller weiteren Bestandteile des ersten Teils des Fragebogens (Tab. 40 bis 42) machen deutlich, dass gegenüber dem Raffstore der Fassadenladen in allen drei abgefragten Aspekten besser eingeschätzt wird. Dieser schneidet am besten in der Flexibilität der Einstellung von Zonen und Lamellen ab, während die Ästhetik des Fassadenladens mit 3,66 im Vergleich zu den anderen abgefragten Kriterien am niedrigsten, und geringfügig besser als beim Raffstore eingestuft wurde.

Teil 3 des Fragebogens

Dieser Teil befasst sich mit der Zahlungs-, Kauf- und Weiterempfehlungsbereitschaft, die unterstützend zu den im ersten Teil getesteten Produktvorteilen zu einer Plausibilitätsprüfung herangezogen werden.

- Frage 3.1

„Wären Sie bereit, für den Fassadenladen einen Aufpreis zum handelsüblichen Raffstore zu zahlen?“

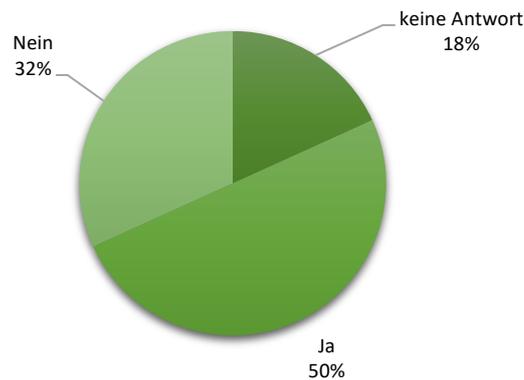


Abb. 158: Zahlungsbereitschaft beim Fassadenladen, einfache Häufigkeitsauswertung

- Frage 3.2

„Ich bin bereit, den Fassadenladen guten Bekannten und Kollegen weiterzuempfehlen.“

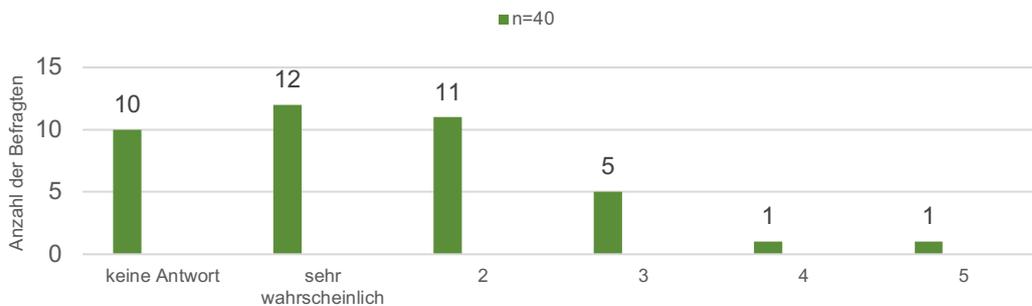


Abb. 159: Weiterempfehlungsbereitschaft

- Frage 3.3

„Würden Sie den Fassadenladen für ein Pilotprojekt einsetzen?“

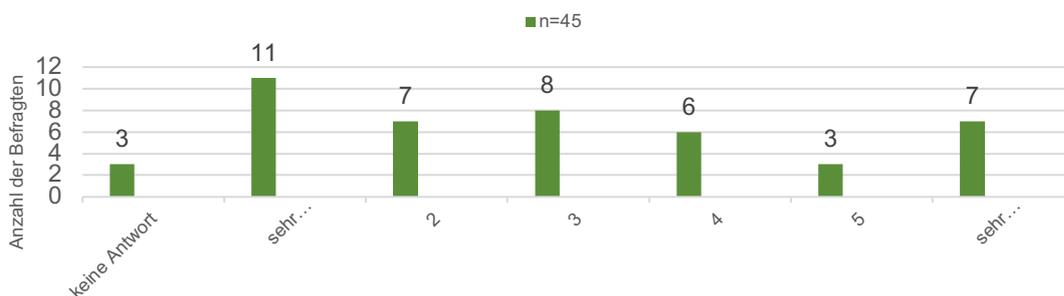


Abb. 160: Kaufbereitschaft

Es folgt ein Vergleich der Rolle der Befragten mit der Kaufbereitschaft in Form einer Kreuzta-
belle. Diese gibt Auskunft über den Zusammenhang der Rolle der Befragten in Bezug auf die
Kaufbereitschaft.

	keine Antwort	sehr wahrscheinlich	2	3	4	5	Sehr unwahrscheinlich	
Produktmanager / Marketing	1	1	2	2	3	0	1	10
Beschaffungsumfeld	0	2	4	4	1	3	3	17
Geschäftsführer	1	1	0	2	2	0	1	7
Architekt	1	7	1	0	0	0	2	11
Gesamt	3	11	7	8	6	3	7	45

Tab. 43: Kaufbereitschaft in Abhängigkeit der Rolle

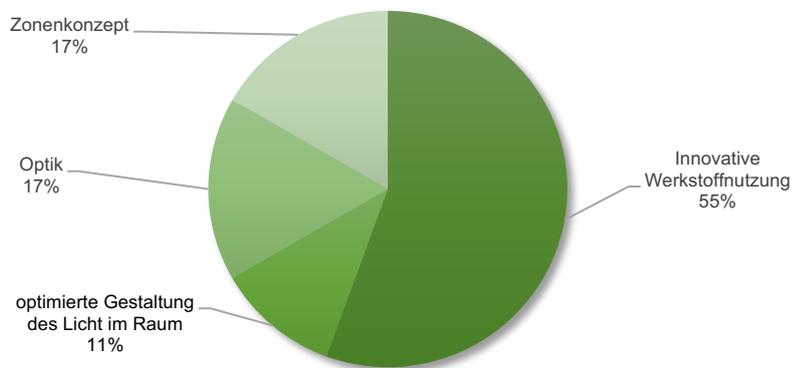


Abb. 161: Kaufargumente⁴⁴ für den Fassadenladen

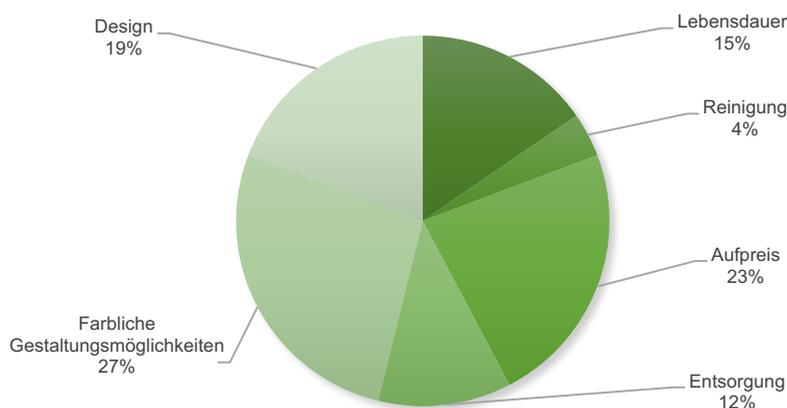


Abb. 162: Argumente⁴⁵ gegen den Einsatz des Fassadenladens

Es fällt auf, dass besonders Architekten bereit sind, den Fassadenladen für ein Pilotprojekt einzusetzen. Neben der Abhängigkeit der Kaufbereitschaft mit der Rolle der Befragten im Beschaffungsprozess wurde auch die Abhängigkeit der Rolle mit der Zahlungsbereitschaft

⁴⁴ Die Antworten belaufen sich insgesamt auf 18 Nennungen

⁴⁵ Insgesamt 26 Argumente; ein Befragter konnte sich auch zu mehreren Argumenten, die für oder gegen den Kauf sprächen, äußern

getestet. Hier erschließen sich jedoch keine Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Rolle im Kaufentscheidungsprozess.

FabioW
Ergebnisse
Marktanalysen –
Marktpotenzial

5.4.3 Bewertung der empirischen Studie

Zusammenfassung Fragebogen Teil 1

Eine Akzeptanz des Fassadenladens lässt sich feststellen, wenn der Befragte die Produktvorteile erkennt und diese anderen Produkten gegenüber als positiv einschätzt. Der erste Teil der Befragung diente dazu, die Produktvorteile zunächst allgemein als solche zu erkennen und schließlich in Bezug auf den Fassadenladen abzufragen. Dies ist möglich, indem jeweils der erste und zweite Teil der Fragen zu einem Vorteil des Produktes gegenübergestellt werden. Hier lässt sich feststellen, dass eine Differenz zwischen den Mittelwerten der jeweils ersten und zweiten Frage besteht. Die Befragten gewichten den Produktvorteil im Bereich 1,22 und 2,91 ein und ordnen den Fassadenladen dann jeweils niedriger ein. Sie ordnen dem vorgestellten Konzept also nur bedingt zu, den Vorteil gewährleisten zu können.

Zusammenfassung Fragebogen Teil 2

Es folgt ein Vergleich des Fassadenladens mit dem Raffstore. Dieser trägt ebenso zur Messung der Akzeptanz des Fassadenladens bei. Der Fassadenladen schneidet in allen drei abgefragten Bereichen besser ab als der Raffstore. Als erstes Kriterium wurde die Flexibilität der beiden Sonnenschutzsysteme in Bezug auf die Einstellung der Lamellen geprüft. Hier schneidet der Fassadenladen besser ab – der durchschnittliche Mittelwert des Fassadenladens liegt bei 2,8, der des Raffstore bei 3,8. Die Ergebnisse können so interpretiert werden, dass der Fassadenladen durch die flexible Anordnung der Lamellen in den verschiedenen Zonen als flexibler eingeschätzt wird und der Befragte diesen Vorteil gegenüber dem Raffstore wahrnimmt. Bei Ästhetik und Design schneidet der Fassadenladen (Mittelwert von 3,6) besser ab als der Raffstore (Mittelwert von 4,1), wobei der wahrgenommene Unterschied zwischen beiden Konzepten klar geringer ausfällt.

Beim Vergleich der Raumqualität, die durch die jeweiligen Sonnenschutzsysteme erzeugt wird, schneidet der Fassadenladen besser ab: der Mittelwert liegt bei 3,05, der des Raffstore bei 4,38. Das Konzept, ein angenehmeres Raumklima zu schaffen, wird von den Befragten als positiv wahrgenommen und stellt den wichtigsten Vorteil des Fassadenladens gegenüber dem Raffstore dar.

Zusammenfassung Fragebogen Teil 3 Weiterempfehlungsbereitschaft, Kaufbereitschaft, Zahlungsbereitschaft

Die Hälfte der Befragten sprach ihre Bereitschaft aus, einen Aufpreis für den Fassadenladen zu zahlen, sodass für diesen Teil ein überdurchschnittlicher Nutzen unterstellt werden kann. Es gilt jedoch bei dieser Frage und deren Interpretation zu beachten, dass in dieser frühen Phase der Innovation wichtige Informationen, wie beispielsweise solche zur Bedienung der Baukomponente, fehlten. Die Weiterempfehlungsbereitschaft ist noch etwas höher ausgeprägt als die Kaufbereitschaft. Die Befragten reagierten auf diese Frage durchweg positiv. Bei der Kaufbereitschaft stellte sich eine verhaltenere Zustimmung ein; so traten auch vermehrt Nennungen auf, die den Kauf des Fassadenladens ausschließen würden. Insgesamt kann die Beurteilung der drei Indikatoren als verhalten positiv eingestuft werden.

Offene Fragen

Die Aspekte, die für einen Kauf oder Einsatz des Fassadenladens sprechen und im letzten Teil in Form offener Fragen abgefragt wurden, umfassen vor allem den Einsatz des biogenen Werkstoffs. Als weiterer Vorteil wird die Nutzung von Tageslicht im Raum genannt, die sich auch im Vergleich zum Raffstore als positiv darstellt. Design und Zonenkonzept des Fassadenladens sind weitere Aspekte, die die Befragten als positiv wahrnehmen.

Argumente, die die Befragten von einem Kauf eher abhalten, sind zum einen ein möglicher Aufpreis, das Design und die fehlenden farblichen Gestaltungsmöglichkeiten des Fassadenladens, die auch im Interview immer wieder Diskussionen entfachten. Eine große Rolle spielte ebenso die Frage nach der Entsorgung des Fassadenladens sowie der Reinigung der

Profile. Auch wurde kritisch gesehen, dass der Fassadenladen in einem frühen Stadium der Entwicklung steht und somit die Frage nach der Lebensdauer zwar bedacht wurde, sich in der Realität jedoch noch nicht über mehrere Jahre bewährt hat.

FabioW
Ergebnisse
Marktanalysen –
Marktpotenzial

5.4.4 Zusammenfassende Betrachtung der empirischen Studie

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein Konzepttest im aktuellen Stadium der Entwicklung hilfreich war, um ein erstes Markt Feedback bezüglich der Akzeptanz des Fassadenladenkonzeptes zu erhalten. Einschränkende Bedingung war das frühe Stadium des Entwicklungsprozesses, welches den Befragten in der empirischen Untersuchung eine Einschätzung nur mittels vorhandener Bilder und Skizzen ermöglichte. Auch erschwerten es noch ungeklärte Fragen wie die Bedienung des Fassadenladens, die Gestaltung des Rahmens oder genauere Preiskorridore, die Marktakzeptanz einzuschätzen. Dennoch lässt sich sagen, dass eine Akzeptanz in Form des Wahrnehmens von Produktvorteilen und Vorteilen gegenüber anderen Lösungen durchaus festgestellt wurde. Zum einen nimmt die Gruppe der Befragten die Produktvorteile durchgängig als solche wahr, zum anderen erkennt sie Vorteile gegenüber herkömmlichen Lösungen im Bereich Sonnenschutz, insbesondere gegenüber dem Raffstore. Schließlich hat der Konzepttest – und hier insbesondere die offenen Fragen – gezeigt, welche Themen in einem weiteren Stadium des Innovationsprozesses noch eingehender bearbeitet werden müssen. Zu empfehlen wäre den Konzepttest im fortgeschrittenen Stadium des Innovationsprozesses mit Produkt- oder Funktionsmodelltests zu ergänzen. Zu validieren wäre hier insbesondere, inwieweit die jetzt angenommenen Produktvorteile in ihrer Ausprägung akzentuiert werden können und insbesondere Vorzüge des Designs und der Ästhetik noch besser zum Ausdruck kommen können.

Entscheidend wird – neben der Frage der Lebensdauer – auch das Bedienungs- und Reinigungskonzept, zu dem aktuell noch keine Aussagen gemacht werden konnten. Schlussendlich wären für eine weitere Akzeptanzprüfung auch direkte bzw. indirekte (z.B. Conjoint-Messungen) Preisbefragungen notwendig, um Preisobergrenzen festlegen zu können.

B Verwertung

FabioW
Anhang

THN-AR: Für das Konzept „Fassadenladen“ als universeller Baukasten liegen mit den Profilgeometrien und Anordnungsprinzipien wesentliche konzeptionelle Grundlagen und erprobte Funktionsmodelle vor, für die Weiterentwicklung zu einer marktreifen Baukomponente. Beim Deutschen Patent- und Markenamt in München wurde nachfolgende Patentanmeldung eingereicht:

- Bonfig, Peter; Krippner, Roland: Profilelement zur Abdeckung einer Gebäudehülle; Deutsche Patentanmeldung mit dem amtlichen Aktenzeichen DE10 2018 106 519.1 vom 20.3.2018.

Die erarbeiteten Ergebnisse bilden eine profunde Basis zum Akquirieren von Folgeprojekten für den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen im Bauen und für Weiterentwicklung bzw. Optimierung energieeffizienter und nachhaltiger Fassadensysteme. Für die Baukomponente „Fassadenladen“ sind auf dem Weg zum marktreifen Produkt insbesondere Fragen zum Fertigungsprozess noch zu klären. Zur Erprobung der Schnittstelle Baukomponente / Gebäude ist im Rahmen von Folgeprojekten die funktionale und konstruktive Anpassungsfähigkeit zu vertiefen sowie die Durchführung von Demonstrationsvorhaben wichtig.

THN-BI: Die zur Beurteilung der lastabtragenden und verformungsrelevanten Eigenschaften verwendete Vorgehensweise kann für weitere Fassadensysteme, insbesondere für eine Weiterentwicklung der hier betrachteten Systeme herangezogen werden. Folgende Erfindermeldungen an die TH Nürnberg liegen vor:

- Marcel Neberich, Simon Thomas, Ute Keßner, 001-Rahmen-KeNeTh, „Umlaufender Rahmen für Kunststoffprofile aus Kunststoff zur Fertigung im Extrusionsverfahren mit nur einem Extrusionswerkzeug“
- Marcel Neberich, Simon Thomas, Ute Keßner, 002-Profil R 1.2.4-KeNeTh, „Anpassung eines Kunststoffprofils zur Herstellung von Lamellen für äußere Abschlüsse“

THN-ieg: Die Modelle zur Bewertung der energetischen sowie licht- und strömungstechnischen Kennwerte können für weitere Fassadensysteme angewendet werden.

Die entwickelten wissenschaftlichen Grundlagen der Systeme können in Zusammenarbeit in weiteren Projekten für energieeffiziente Fassaden verwendet werden.

Die energie-, licht- und strömungstechnischen Eigenschaften des Fassadenladens sind bereits gut, müssen jedoch noch für jeweilige Anwendungsfälle angepasst werden.

TECNARO: Die Verwertung der Ergebnisse wird von TECNARO mit folgender Ausrichtung verfolgt: TECNARO wird den Vertrieb und die Produktion der entwickelten Compounds vorantreiben bzw. die bestehenden Vermarktungsaktivitäten weiter ausbauen.

Von TECNARO wurden bisher keine Schutzrechte zu Ergebnissen aus dem Projekt Fassadenladen angemeldet.

Joma Polytec: Joma Polytec: Für die Joma-Polytec GmbH findet maßgeblich das Ergebnis zur Verfügbarkeit, eines im Bausektor einsetz- und durch Extrusion bearbeitbaren biogenen Werkstoffes einen Verwertungsansatz über das Projekt hinaus. Das im Zuge des Projektes ermittelte Leistungsspektrum der hauptsächlich verarbeiteten Materialtype „Arboblend 3896V“ unterstützt dabei, das Material für bestimmte Anwendungen als Alternative zu gängigen Kunststoffen nennen und dem Kunden gegenüber präsentieren bzw. anbieten zu können.

Eine Anmeldung von Schutzrechten für die Joma-Polytec GmbH fand nicht statt.

C Erkenntnisse von Dritten

THN: Es sind keine Erkenntnisse von Dritten bekannt.

Joma Polytec: Joma Polytec: Es sind keine Erkenntnisse von dritten bekannt

D Veröffentlichungen

FabioW
Anhang

THN-AR: Veröffentlichungen der Ergebnisse in Fachzeitschriften sowie auf Tagungen sind ebenso geplant wie die Durchführung eines Experten-Workshops. Mit der FNR wird auch die Beteiligung an Messeauftritten mit Funktionsmodellen avisiert.

- Sigmund, Bettina: Neuartige Sonnenschutzelemente nach Vorbildern aus der Natur. Neuartige Baukomponenten für innovative und variable Sonnenschutzelemente optimieren den Status quo durch biobasierte Materialien und bionische Vorbilder. Fassadenladen aus nachwachsenden Biopolymeren. München: DETAIL Business Information GmbH, 22.07.2019. <https://www.detail.de/artikel/neuartige-sonnenschutzelemente-nach-vorbildern-aus-der-natur-34433/> <22.07.2019>.
- Krippner, Roland; Bonfig, Peter: [in Vorbereitung] Fassadenladen – Neuinterpretation des Fensterladens mit biogenen Werkstoffen. In: Andreas Karweger (Hrsg.): 14th Conference on Advanced Building Skins. Hrsg. v.: EF - Economic Forum, Munich. Proceedings. Bern, Congress Center Kursaal 2019, o.S.

THN-BI: Eine gemeinsame Veröffentlichung der Ergebnisse zusammen mit THN-AR ist geplant.

THN-ieg: Veröffentlichung der Ergebnisse zur Erstellung, Erprobung und Validierung der Simulationsmodelle der energetischen sowie licht- und strömungstechnischen Kennwerte im Rahmen der BauSim 2018 in Karlsruhe.

- Franz, Mario; Schade, Almuth; Stephan, Wolfram: Beurteilung Innovativer Fassadenladenkonzpte – Erweiterung der VDI 6007-2. In: Petra von Both; Andreas Wagner (Hrsg.): BauSIM2018 - 7. Deutsch-Österreichische IBPSA-Konferenz. 26.-28. September 2018, Karlsruhe, Germany. Tagungsband. Karlsruhe: KIT – Karlsruher Institut für Technologie, September/2018, S. 431–438.

Joma Polytec: Joma Polytec: Veröffentlichungen der Ergebnisse sind von Joma-Polytec derzeit nicht geplant. In persönlichen Gesprächen sollen die Kunden der Joma-Polytec jedoch über die Teilnahme am interdisziplinären Forschungsvorhaben „FabioW“ sowie der daraus erhaltenen Erkenntnisse bzw. Verfügbarkeit eines biogenen Polymers zur Verwendung im Bausektor informiert werden.

Anhang

FabioW
Anhang

A1 Teilvorhaben 1: wissenschaftliche Begleitung, Koordinierung (THN) Förderkennzeichen: 22031012

A1.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

THN-AR: Systematische Entwicklung von Lösungsprinzipien für die Profilgeometrie des Fassadenladens nach erstelltem Lastenheft, unterstützt von Computersimulationen und dreidimensionalen Arbeitsmodellen. Anfertigen von ‚Werkstattzeichnungen‘. Recherche von Referenzbeispielen und Erarbeitung einer Bewertungsmatrix die einen Vergleich von Aussehen und Leistungsfähigkeit der Varianten mit am Markt erhältlichen Produkten ermöglicht. Die Systematische Entwicklung von Lösungsprinzipien führte zu einem zweiten Extrusionsprofil.

Die Materialentwicklung wurde von THN-AR durch Diskussionen über die Eignung unterschiedlicher Werkstoffe und Bemusterung von Profilen begleitet.

Auf Basis des entwickelten Extrusionsprofils wurden unterschiedliche Belegungsvarianten und Konzepte für Profilbefestigung für Funktionsmodelle des Fassadenladens als Baukastensystem erarbeitet, visualisiert und bewertet. Bau von Muster und Funktionsmodellen (M 1:1) und Anfertigung von Konstruktionszeichnungen sowie Visualisierungen von Einbausituationen (insbesondere für Marktstudien / Akzeptanztests). Auswahl der Funktionsmodelle des Baukastensystems für die Testdurchgänge; Systematisierung der Schnittstellen zum Gebäude für Fallstudien und Demonstratorbau. Fortlaufende fotografische Dokumentation des Fassadenladens zu Dokumentationszwecken.

THN-AR leistete als Koordinator des Verbundes den organisatorischen Rahmen für eine effiziente und interdisziplinäre Diskussion und Arbeitsweise mit allen Kooperationspartnern. Kontrolle des Projektfortschritts durch regelmäßige Projekttreffen aller Projektpartner sowie Meilensteintreffen. Von diesen regelmäßigen Treffen wurden Protokolle erstellt, in denen der Fortschritt und eventuelle Änderungen am Arbeitsplan dokumentiert sind. Workshops wurden aufgrund der Erfindermeldung zurückgestellt. THN-AR koordiniert durch Layout-Vorlagen und redaktionelle Arbeiten die Erstellung der Zwischenberichte und des Abschlussberichts.

THN-ieg: Die energetischen, licht- und lufttechnischen Eigenschaften von Fassaden bestimmen wesentlich den Energiebedarf und den Komfort von Gebäuden. Daher werden immer wieder neue innovative Fassadenkonzepte entwickelt und untersucht. Im Gegensatz zu den Standardsystemen handelt es sich bei dem untersuchten Verschattungssystem um ein teiltransparentes, flexibles und mehrschichtiges System aus einem biogenen Werkstoff welches in dieser Art von bestehenden Berechnungsmethoden nicht vollständig abgebildet werden kann.

Zur Bestimmung und Beurteilung der energetischen und lichttechnischen Eigenschaften wurde das Berechnungsmodell der VDI 6007-2 weiterentwickelt und in der Simulationsumgebung EES. Die Ergebnisse sind mit an Prüfständen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (im Labor und in situ) gemessenen Werten evaluiert und bestätigt worden. Ein Vergleich der ermittelten Kennwerte mit ausgewählten Referenzsystemen zeigt die Vor- und Nachteile des Konzepts. Die Kennwerte werden in das Gebäudesimulations-programm TRNSYS integriert und Büroraumsituationen werden simuliert. Die Tageslichtnutzung und die Blendwirkung werden zusätzlich über ein detailliertes Geometriemodell im Tageslichtsimulationsprogramm RELUX abgebildet.

A1.2 Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspakete (AP) – THN-AR	Bearbeitungsstand
AP 0 - Projektmanagement	Projektorganisation, u. a. regelmäßiger Sitzungen und Dokumentation der Arbeitsergebnisse (Protokolle)

AP 1 - Entwicklung von Lösungsstrategien	Erstellung eines Lastenheftes. Systematische Entwicklung von Lösungsprinzipien für Extrusionsprofil und Belegungsvarianten „Fassadenladen“; Überprüfung anhand von Computersimulationen und dreidimensionalen Arbeitsmodellen
AP 2 - Materialentwicklung	Diskussion der Eignung unterschiedlicher Werkstoffe; Bemusterung von Profilen
AP 3 - Untersuchung, Bewertung und Auswahl Realisierungskonzept	Referenzprodukte ausgewählt und Bewertungskriterien erstellt; Matrix entwickelt und in Verbindung mit Simulationen Bewertung und Auswahl für Realisierungskonzept erarbeitet, durchgeführt und dokumentiert.
AP 4 - Entwicklung und prototypische Realisierung eines modularen Baukastens für den Fassadenladen	Referenzprojekte ausgewählt und Bewertungskriterien erstellt; Muster und Funktionsmodelle im M 1:1 erstellt und Konstruktionszeichnungen sowie Visualisierungen von Einbausituationen (insbesondere für Marktstudien / Akzeptanztests) erarbeitet; Systematische Entwicklung von Lösungsprinzipien für zweites Extrusionsprofil; Workshops wurden aufgrund Erfindermeldung zurückgestellt
AP 5 - Untersuchung zum Leistungsprofil und zu Kennwerten der Funktionsmodelle und ihrer Komponenten	Auswahl prototypischer Varianten des Baukastensystems für die Testdurchgänge vorgenommen; Systematisierung der Schnittstellen Gebäude für Fallstudien und Demonstratorbau erarbeitet, durchgeführt und dokumentiert
AP 6 - Auswertung der Daten und Dokumentation	Ergebnisse zu Profilgeometrie und Flächenbelegung des Fassadenladens wurden ausgewertet und dokumentiert. Koordinierung und Dokumentation der Projektergebnisse in Zwischenberichten und Abschlussbericht

Meilenstein (M)	Erreichungsstand
M 1 - Lösungsstrategien	Vollständig erreicht Extrusionsprofil in Varianten für ausgewählten Werkstoff wurde entwickelt und liegt in ‚Werkstattzeichnungen‘ vor.
M 2 - Realisierungskonzept	Vollständig erreicht Für den prototypischen Fassadenladen als Baukastensystem wurden unterschiedliche Belegungsvarianten erarbeitet, visualisiert und bewertet. Konzepte für Profilbefestigung liegen vor.
M 3 - Funktionsmodell	Weitgehend erreicht: Funktionsmodell Für Demonstratoren wurden für verschiedene Materialisierungen Kenndaten erarbeitet, Funktionsmodelle und Visualisierungen erstellt; fortlaufende fotografische Dokumentation des Fassadenladens
M 4 - Abschluss	Vollständig erreicht

Arbeitspakete (AP) – THN-BI	Bearbeitungsstand
AP 1 - Entwicklung von Lösungsstrategien	Mitwirkung bei der Definition des Lastenheftes und der Lösungsstrategien und Zusammenstellung der erforderlichen Materialkennwerte ist erfolgt.

AP 2 - Materialentwicklung	Diskussion der Eignung unterschiedlicher Werkstoffe auf Basis von Untersuchungsergebnissen der Projektpartner und eigener Untersuchungen zur temperaturbedingten Verformung der Profile ist erfolgt.
AP 3 - Untersuchung, Bewertung und Auswahl Realisierungskonzept	Beitrag zur Ermittlung von Beanspruchbarkeit von Baustoffen oder Bauteilen geleistet. Statische Beanspruchung von tragenden Elementen des prototypischen Fassadenladens ermittelt.
AP 4 - Entwicklung und prototypische Realisierung eines modularen Baukastens für den Fassadenladen	Lastableitung, Verformungen, Berechnungen und Versuche in Prüfständen zu einzelnen technischen Fragestellungen (z.B. mechanische Beanspruchbarkeit) erledigt. Bemessung von tragenden Teilen des Fassadenladens und von Unterkonstruktion und Befestigungen ist erfolgt.
AP 5 - Untersuchung zum Leistungsprofil und zu Kennwerten der Funktionsmodelle und ihrer Komponenten	Unterstützung bei Fragen der Konstruktion und Bemessung von Befestigungen ist erfolgt.
AP 6 - Auswertung der Daten und Dokumentation	Daten zur Profilgeometrie und zur Befestigung des Systems wurden ausgewertet und dokumentiert.

Arbeitspakete (AP)– THN-ieg	Bearbeitungsstand
AP 1 - Entwicklung von Lösungsstrategien	Mitwirkung bei der Definition des Lastenheftes und der Lösungsstrategien und Zusammenstellung der erforderlichen Materialkennwerte ist erfolgt. Simulationsmodelle für die Bewertung des Energie- und Lichtdurchgangs und Lüftungsverhalten sind erstellt und erprobt.
AP 2 - Materialentwicklung	Diskussion des Wechselspiels unterschiedlicher Materialien in der Kombination im Fassadensystem mittels einer grundlegenden Analyse analog VDI 6007-2 (2012-03) ist erfolgt.
AP 3 - Untersuchung, Bewertung und Auswahl Realisierungskonzept	Bewertung der energie- und lichttechnischen, sowie der strömungstechnischen Eigenschaften durch Computersimulation typischer Anwendungsfälle ist erfolgt.
AP 4 - Entwicklung und prototypische Realisierung eines modularen Baukastens für den Fassadenladen	Endgültige Bewertung von Energie-, Licht- und Lüftungskennwerten für das neue Material ist erfolgt. Eine Bewertung der CO ₂ -Emissionen im Vergleich zu konventionellen Systemen im Zuge der Bewertungen Fassade inklusive Raum ist erfolgt.
AP 5 - Untersuchung zum Leistungsprofil und zu Kennwerten der Funktionsmodelle und ihrer Komponenten	Abgleich der Ergebnisse der Prüfstandsversuche mit den Kennwerten aus den Simulationsberechnungen ist erfolgt. Ausarbeitung typischer Szenarien und Musteranwendungen durch Simulation von Gesamtsystemen Fassade / Raum ist erfolgt.
AP 6 - Auswertung der Daten und Dokumentation	Betrachtung optimierter Anordnung zur Vermeidung von Blendung und zur Tageslichtnutzung Dokumentation der Vor- und Nachteile aus energetischer, licht- und lüftungstechnischer Sicht.

A1.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

THN-AR: Nach umfangreichem Variantenstudien liegt ein neuartiger Profiltyp vor, der als Grundtypus über einen statisch wirksamen ‚Kern‘ als Hohlprofil in Rautenform verfügt und in einer Achse liegende flächige Fortsätze als dünne ‚Flügel‘ zur Optimierung der Lichtdurchlässigkeit aufweist. Anhand zweier unterschiedlicher Profile ist es gelungen eine differenzierte Erscheinungsform sowohl über die Profilgeometrie als auch die abgestuften Wandstärken der Flügel für Tageslichtnutzung zu erzielen. (Kapitel 2.1)

Anknüpfend an Vorarbeiten von Peter Bonfig wurden verschiedenste Anordnungsprinzipien der Profile mit Bezug zu den prinzipiellen Fassadenzonen sowohl einlagig als auch mehrlagig (beweglich) erarbeitet. Dabei konnten mit dem Bau von Mustern und Funktionsmodellen des Fassadenladens im Maßstab 1:1 gleichermaßen die funktionale Leistungsfähigkeit als auch die ästhetischen Besonderheiten erfolgreich getestet werden. (Kapitel 2.2, 2.3, 2.4)

In Visualisierungen von Einbausituationen zeigt sich eine sehr gute Anpassungsfähigkeit der Baukomponente in verschiedenen Fassadenbeispielen, sowohl hinsichtlich Konstruktion als auch Material, ebenso wie in der positiven atmosphärischen Wirkung auf den Innenraum. Hierbei wird auch das unterschiedliche Erscheinungsbild des Fassadenladens deutlich, der im Licht betrachtet opak wirkt und im Gegenlicht transluzent. (Kapitel 2.6)

THN-BI: Die Verwendbarkeit des vorgeschlagenen biogenen Kunststoffes für einen Fassadenladen als sommerliche Wärmeschutzkomponente bei gleichzeitiger guter Tageslichtversorgung konnte durch Berechnungen nachgewiesen werden.

Die seitens FAU-LKT herausgearbeiteten Materialparameter wurden den Berechnungen zugrunde gelegt und erweisen sich als hinreichend für die vorgesehene Verwendung.

Die für eine Anwendung möglichen Abmessungen sind sowohl für Wohngebäude, wie auch Bürogebäude ausreichend groß und damit praxistauglich.

THN-ieg: Die Verwendbarkeit des Fassadenladens als sommerliches Wärmeschutzsystem bei gleichzeitiger guter Tageslichtversorgung konnte durch Simulationen, auch in Kombination mit angrenzenden Räumen nachgewiesen werden. Ein klarer Vorteil stellt dabei die selektive Nutzarmachung solarer Wärmegevinne während der Heizperiode sowie die gute Tageslichtversorgung dar, die sich wiederum in niedrigeren Energiebedarfswerten für die künstliche Beleuchtung widerspiegeln.

Bei der Untersuchung der Nutzerbeeinträchtigung aufgrund von Blendung durch Tageslicht zeigt sich, dass es aufgrund der Transluzenz der Einzelprofile und die durch die Anordnungen entstehenden freien Öffnungsflächen zu störender Blendung kommen kann. Durch geschickte Anordnung der Profile kann dies vermieden werden.

Die Ergebnisse sind mit an Prüfständen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (im Labor und in situ) gemessenen Werten evaluiert und bestätigt worden. Die Ergebnisse der Simulationsberechnungen und die Messergebnisse der Prüfstandsversuche stimmen gut überein. Die geringen Unterschiede sind auf die unterschiedlichen und nicht exakt erfassbaren äußeren Randbedingungen zurückzuführen.

A2 Teilvorhaben 2: Werkstoffprüfung (FAU-LKT) Förderkennzeichen: 22013515

A2.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

AP1 - Entwicklung von Lösungsstrategien

Bei der Entwicklung der Lösungsstrategien wurde bereits zu Beginn des Vorhabens ein Lastenheft erarbeitet, welches im Verlauf des Vorhabens stetig weiter spezifiziert worden ist. Hierzu erfolgte in Kooperation mit den Projektpartnern eine ausführliche Recherche von Zulassungen und Normen. Die durchgeführte Recherche wurde mit den Projektpartnern diskutiert und im Hinblick auf die Anwendung „Fassadenladen“ bewertet und zusammengestellt. Insbesondere die DIN EN 13659 „Abschlüsse außen und Außenjalousien - Leistungs- und Sicherheitsanforderungen“ wurde als maßgeblich erachtet und in Teilen angewendet. Dies

schließt vor allem die Vicat Erweichungstemperatur, den E-Modul bei Biegung als auch natürliche bzw. künstliche Alterung mit ein. Ein Überblick über die Anforderungen ist in Tabelle 1 dargestellt. Grundsätzlich wurde eine feste Definition von Kennwerten vermieden, so dass im Rahmen des Vorhabens die Konstruktion der Einzelelemente, wie z. B. die freitragende Profillänge, auf Basis der Eigenschaften des Materials definiert worden ist.

AP2 – Materialentwicklung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets erfolgte fokussiert die Analyse und Prüfung der biogenen Werkstoffe in Bezug auf die erforderlichen Kriterien im Einsatzbereich. In einem ersten Schritt erfolgte die Charakterisierung unterschiedlicher kommerziell verfügbarer biogener Werkstoffe. Hierzu zählen z. B. die dynamische Differenzkalorimetrie (DSC), die thermogravimetrische Analyse (TGA) und die thermomechanische Analyse (TMA) zur Charakterisierung des Längenausdehnungskoeffizienten, deren Ergebnisse bereits ausführlich innerhalb des Sachteils diskutiert worden sind (vgl. Kapitel 1.2; Tab. 3 und Abb. 4 bis Abb. 8, Seite 12ff.). Zusätzlich zu den bereits genannten Analysen wurden auch weitere Analysemethoden, wie z. B. die Wärmekapazität mit Hilfe eines Kalorimeters (vgl. Tab. 44), betrachtet. Zusammenfassend konnte eine ausführliche Datenbasis kommerziell verfügbarer Polymerklassen zur Auswahl der möglichen Polymere als Ausgangsmaterialien für die Werkstoffentwicklung generiert werden.

Polymerklasse	PHB	PE	CA	PA1012	PA1010	Bio-PET	PLA
Wärmekapazität [J/g°C]	1,363	1,897	1,498	1,826	1,796	1,151	1,288

Tab. 44: Wärmekapazität der unterschiedlichen Materialien

In Kooperation mit den Projektpartnern erfolgte in einem zweiten Schritt eine Auswahl vielversprechender Polymere auf Basis des Eigenschaftsprofils in Kombination mit wirtschaftlichen Aspekten. Die in Kooperation mit den Projektpartnern entwickelten Werkstoffe wurden am LKT weitergehend hinsichtlich ihres Eigenschaftsprofils inklusive verarbeitungsrelevanter Materialdaten und Werkstoffkennwerte für die Dimensionierung des Fassadenladens charakterisiert (vgl. Kapitel 1.3). Eine Zusammenfassung ausgewählter Werkstoffe sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Darüberhinausgehend wurden weitere Materialien entwickelt und im Rahmen des Vorhabens untersucht, aufgrund ungewünschter Eigenschaften aber nicht weiter in Betracht gezogen. So zeigte z. B. das Material ARBOBLEND®3584V ungünstige Verarbeitungseigenschaften im Extrusionsprozess, die einer Herstellung des gewünschten Profils entgegenstanden.

Vergleichbar zu den kommerziell verfügbaren Materialien wurden auch die entwickelten Werkstoffe hinsichtlich ihres Eigenschaftsprofils charakterisiert. Die Analysemethoden wurden entsprechend den definierten Einsatzbedingungen, als auch in Bezug auf die recherchierten Normen und Richtlinien ausgewählt und aussagekräftig zusammengefasst und diskutiert (vgl. Tabelle 5, sowie Abb. 9 bis Abb. 18, Seite 15ff.). Die ermittelten Kennwerte wurden für die Auswahl geeigneter Materialien, aber auch für die detaillierte Dimensionierung des Fassadenladenprofils genutzt, um dieses an die spezifischen Werkstoffeigenschaften anzupassen. So basiert z. B. die Auslegung der Profillänge in der Anwendung auf den charakterisierten mechanischen Kennwerten der Materialien. Neben den bereits diskutierten Analysemethoden wurden exemplarisch auch Untersuchungen zum Fließverhalten zur Bewertung der Verarbeitungseigenschaften mit Hilfe des Melt Flow Index (MFI) und des Hochdruckkapillarrheometers oder auch zum möglichen Recycling der Materialien durchgeführt. Hierzu erfolgte eine Mehrfachverarbeitung des Materials ARBOBLEND®3016V innerhalb des Spritzgießprozesses, sowie eine Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften nach jedem Mehrfachverarbeitungsschritt. Der E-Modul ist nur geringfügig von der Mehrfachverarbeitung beeinflusst, wobei dieser zunächst ansteigt (vgl. Abb. 164). Im Vergleich hierzu sinkt die Bruchdehnung mit jedem Verarbeitungsschritt deutlich ab (vgl. Abb. 165).

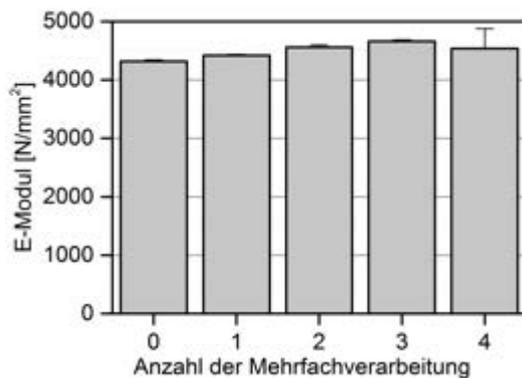


Abb. 163: E-Modul der Proben bei Mehrfachverarbeitung (ARBOBLEND®3016V)

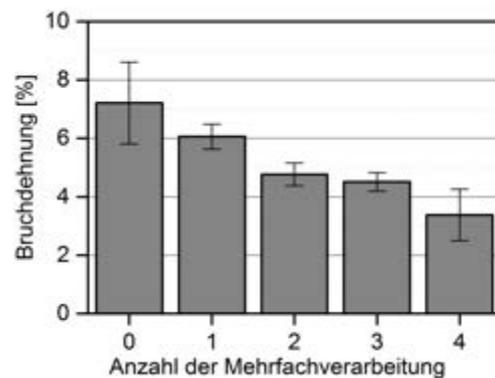


Abb. 164: Bruchdehnung der Proben bei Mehrfachverarbeitung (ARBOBLEND®3016V)

Eine Analyse der Proben mit unterschiedlicher Anzahl an Verarbeitungsschritten mit Hilfe der DSC mit einem Fokus auf die Kristallisationspeaktemperatur führt zu der Annahme, dass die Mehrfachverarbeitung auf die Blendbestandteile des Materials unterschiedlichen Einfluss hinsichtlich vermutlicher Abbau, bzw. Vernetzungsreaktionen der Polymerketten zeigen.

In der Anwendung im Fassadenbereich ist auch das Brandverhalten der Werkstoffe ein wesentliches Einsatzkriterium, so dass orientierende Untersuchungen zum Brandverhalten mit Hilfe genormter Prüfverfahren, wie z. B. dem Limited Oxygen Index (LOI) oder UL 94, durchgeführt wurden. Die Ergebnisse für die LOI-Prüfung sind in Abb. 165 aufgezeigt. Hierbei sind vor allem Unterschiede im Vergleich der unterschiedlichen Werkstoffe zu erkennen, ein Einfluss der Extrusionsrichtung zeigt lediglich einen geringen Einfluss auf den LOI-Wert. Weiterhin wurde eine Charakterisierung der Werkstoffe ARBOBLEND®3016V, 3765V, 3896V und 3830 nach UL-94 nach DIN EN 60695 durchgeführt, bei dem alle Werkstoffe mittels HB klassifiziert wurden. Abb. 166 zeigt den Brandverlauf innerhalb der UL-94 Prüfung am Material ARBOBLEND®3896V.

Da ein direkter Übertrag der Ergebnisse auf die benötigte Prüfung (Baustoffklasse B2) nicht möglich ist, wurde durch einen Projektpartner exemplarisch eine entsprechende Prüfung an dem Material ARBOBLEND®3896V durchgeführt (vgl. Kapitel 1.6).

Weiterhin erfolgte eine Modifizierung der bereits bestehenden Verarbeitungseinrichtungen mit dem Fokus auf einem Extrusionswerkzeug zur Herstellung von plattenförmigen Probekörpern in der Größenordnung des Fassadenladens sowie einer zugehörigen Abzugs- und Kalibriervorrichtung, s. Abb. 167. Die Anlage ermöglichte die Herstellung von Probekörpern im Extrusionsprozess zur Analyse der Werkstoffeigenschaften sowie verarbeitungsrelevanten Einflussfaktoren mit einem direkten Übertrag auf die Fassadenladen-Profile.

Aus den extrudierten plattenförmigen Probekörpern konnten Zugstäbe präpariert und hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften charakterisiert werden, vgl. Abb. 15 und Abb. 16. Der deutliche Einfluss der Extrusionsrichtung bei den faserverstärkten Materialien ist auf eine ausgeprägte Faserorientierung zurückzuführen, die mittels REM-Aufnahmen charakterisiert wurde (vgl. Abb. 17 und Abb. 18). Abb. 168 und Abb. 169 zeigen exemplarisch die Bruchbilder für das Material ARBOBLEND®3016V ohne Faserverstärkung. Gut zu erkennen ist der schichtartige Aufbau, der für dieses Material charakteristisch ist, sowie die Integration von plättchenförmigen Füllstoffpartikeln. Aufgrund einer ähnlichen optischen Strukturausbildung, die von der Extrusionsrichtung optisch unabhängig erscheint, liegen die mechanischen Eigenschaften in beiden Raumrichtungen in vergleichbarer Größenordnung vor.

Aufgrund des geplanten Außeneinsatzes über einen langen Zeitraum wurden ebenfalls Untersuchungen in Bezug auf die Hydrolysebeständigkeit als auch zum Zeitstandverhalten bei Biegebelastung durchgeführt (vgl., Abb. 14 und Abb. 19 bis 25), die bereits ausführlich in

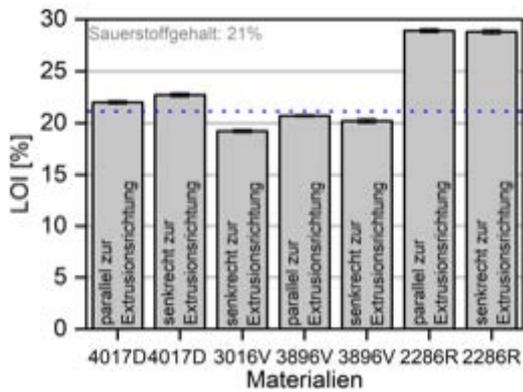


Abb. 165: Limited Oxygen Index (LOI) in Abhängigkeit der Werkstoffe und Verarbeitungsbedingungen

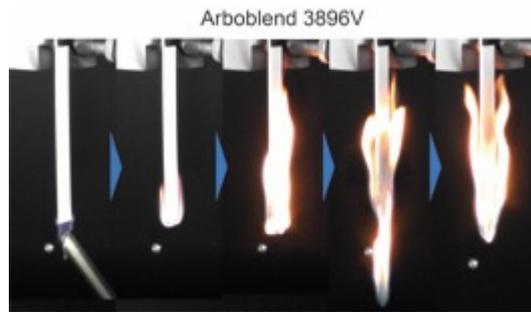


Abb. 166: Verlauf der UL-94-Prüfung (ARBOBLEND®3896V)



Abb. 167: Extrusionsanlage inkl. Werkzeug, Kalbrierung und Abzug zur Herstellung der plattenförmigen Probekörper

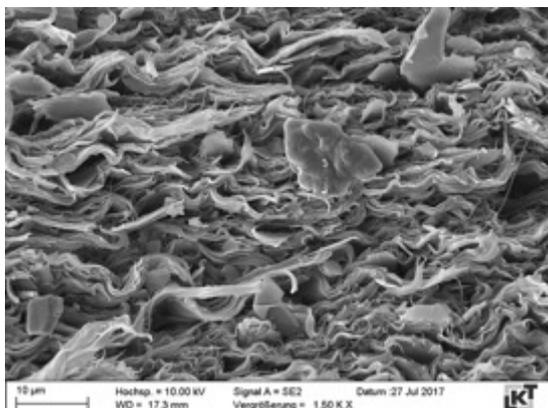


Abb. 168: REM-Analyse der Bruchfläche (Prüfung senkrecht zur Extrusionsrichtung) (ARBOBLEND®3016V)

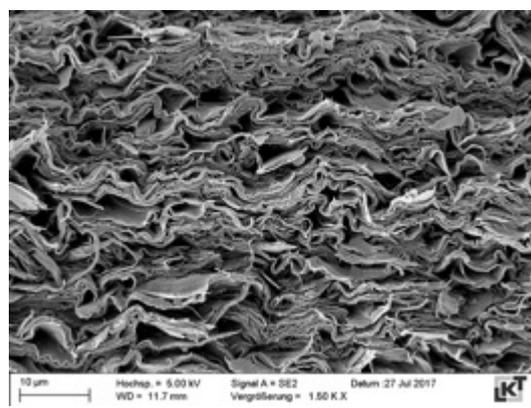


Abb. 169: REM-Analyse der Bruchfläche (Prüfung parallel zur Extrusionsrichtung) (ARBOBLEND®3016V)

Kapitel 1.3 diskutiert worden sind. Die Zeitstandversuche wurden neben den bereits diskutierten Versuchen bei der anwendungsspezifischen Belastung von 0,5 N/mm² an den favorisierten Materialien ARBOBLEND®3896V und ARBOBLEND®4017D auch bei erhöhter Last bis zu 2 N/mm² durchgeführt (Belastungszeit: 1000 h, Einlagerungstemperatur: 80 °C).

Eine Erhöhung der Last führt zu einer Erhöhung der entsprechenden Probendurchbiegung, wobei die wesentliche Verformung auch für die höheren Lasten innerhalb der ersten 48 h erfolgt. Die verbleibende plastische Verformung nach Entlastung ist ebenfalls zeit- und lastabhängig und beträgt in dieser Versuchsanordnung für das Material ARBOBLEND®3896V ca. 60 – 70 % und für das ARBOBLEND®4017D 20 – 40 %.

Zusammenfassend wurde eine breite Analyse der unterschiedlichen kommerziell verfügbaren Materialien, als auch der im Vorhaben entwickelten Werkstoffe ermittelt. Die Analysemethoden wurden soweit möglich an die spezifischen Anforderungskriterien des Fassadenladens angepasst. Somit stehen zwei gut zu verarbeitende Materialtypen zur Verfügung. Nichtsdestotrotz muss eine weitere Anpassung an das geforderte Eigenschaftsprofil in einem Folgevorhaben erfolgen.

AP 3 – Untersuchung, Bewertung und Auswahl Realisierungskonzept

Der LKT hat beratend bei der Bewertung und Auswahl der Lösungsstrategien unter Berücksichtigung werkstoff- und verarbeitungsspezifischer Aspekte unterstützt. Hierzu zählt die Berücksichtigung der Werkstoffuntersuchungen sowie von Verarbeitungsversuchen zur Einschätzung der Extrudierbarkeit und somit eine Abschätzung des Verarbeitungsverhaltens und daraus resultierenden möglichen Geometrien (vgl. AP2). In diesem Rahmen wurde auch eine begleitende Recherche durchgeführt (vgl. AP1).

AP 4 – Entwicklung und prototypische Realisierung eines modularen Baukastens für den Fassadenladen

Der LKT hat beratend bei der detaillierten Auslegung und Fertigung der Fassadenladen-Funktionsmodelle unter anderem durch zur Verfügung Stellung der Ergebnisse der durchgeführten Charakterisierungen (vgl. AP2) unterstützt. Insbesondere die Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen konnten bei der Auslegung der Profile und der Länge der Einzelteile für das Baukastensystem einfließen. Ebenfalls konnten Erkenntnisse aus den am Lehrstuhl durchgeführten Extrusionsversuchen von plattenförmigen Profilen erste Hinweise zur Eignung der untersuchten Materialien zur Extrusion der Fassadenladen-Profile geben.

AP 5 – Untersuchung zum Leistungsprofil und zu Kennwerten der Funktionsmodelle und ihrer Komponenten

Neben der Werkstoffanalyse wurden am LKT ebenfalls die Fassadenladen-Profile charakterisiert (vgl. Kapitel 1.6). Hierzu wurden vor allem die Ergebnisse aus AP2 aufbereitet und auf die Fassadenladen-Profile übertragen. So konnte auch am Profil die langsame Kristallisationsgeschwindigkeit und damit durch Tempern induzierte Nachkristallisation mit Hilfe von DSC-Messungen identifiziert werden (vgl. Abb. 33, Seite 26). Somit konnten im Extrusionsprozess auftretende Fehlstellen durch eine Temperierung innerhalb der Extrusionslinie ausgeglichen werden. Eine mögliche Nachkristallisation bei erneuter Temperung kann allerdings nicht vermieden werden.

An den Profilen konnte ebenfalls ein Übertrag der an den Probekörpern identifizierten Faserorientierung identifiziert werden (vgl. Abb. 35, Seite 27), so dass ein Übertrag der Werkstoffkennwerte auf die Fassadenladen-Profile möglich ist. Auch eine homogene Füllstoffverteilung über den Profilquerschnitt kann gewährleistet werden (vgl. Abb. 34, Seite 27).

Im Rahmen des Teilvorhabens wurden zunächst Informationen zum eingesetzten Material bzw. dessen Verarbeitungsverhalten gesammelt. Dazu wurden verschiedene Materialrezept-

turen von Tecnaro zur Verfügung gestellt und auf einer Serienanlage bei Joma-Polytec bemustert. Auf Grundlage der erhaltenen materialspezifischen Eigenschaften des ausgewählten Materials und auf Basis der Konturvorschläge von THN-AR wurden die Profilgeometrien gemeinsam erarbeitet und festgelegt.

Auf dieser Grundlage konstruierte die Joma-Polytec GmbH zunächst ein Extrusionswerkzeug sowie die dazugehörige Kalibriereinheit welche im hauseigenen Werkzeugbau gefertigt wurden. Im Zuge der Optimierung des Werkzeuges bzw. der ersten Fertigung von Profilen zeigten sich die im vorangegangenen Bericht dargelegten Formabweichungen bedingt durch unterschiedliches Abkühlverhalten der Schmelze über den Profilquerschnitt. Daraufhin wurde nach Lösungsansätzen gesucht und schließlich eine Vorrichtung zur Inline-Wärmebehandlung der Profile erstellt.

Im weiteren Projektfortgang wurde auch die zweite Profilgeometrie festgelegt und dementsprechend ein Werkzeug erstellt.

Mithilfe der beiden Extrusionswerkzeuge konnte so das Ziel erreicht werden um Profile in ausreichender Zahl zur Flächenbelegung von Funktionsmodellen herzustellen.

AP 6 – Auswertung der Daten und Dokumentation

Die im Rahmen des Vorhabens generierten Erkenntnisse wurden vollständig ausgewertet und dokumentiert. Die ermittelten Ergebnisse über die biogenen Werkstoffe und den Einfluss der Verarbeitung auf das Eigenschaftsprofil bilden eine breite Datenbasis zur Abschätzung des Einsatzpotentials der Werkstoffe im Fassadenladen als auch in alternativen Anwendungen. Insbesondere die Anpassung der Hydrolysebeständigkeit der PLA-basierten Materialien zeigt großes Potential. Nichtsdestotrotz ist eine Weiterentwicklung des Materials für einen Einsatz in Außenanwendungen notwendig.

A.3 Teilvorhaben 3: Bauphysikalische Bewertung (Fh-IBP) Förderkennzeichen: 22013615

A3.1 Gesamtziel des Vorhabens

Im Rahmen des Projekts wurde ein Fassadenladen aus biogenen Werkstoffen entwickelt, der dem Schutz und der Regulierung von Gebäudeöffnungen dient. Im Rahmen des Teilvorhabens 3 „bauphysikalische Bewertung“ werden gemeinsam mit den Projektpartnern die Anforderungen an den Fassadenladen erarbeitet und die anschließend entwickelten Funktionsmodelle lichttechnisch und energetisch untersucht. Die Prüfung erfolgte sowohl im Labor als auch in situ an Prüfständen auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer IBP in Holzkirchen.

A3.2 Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspakete (AP)	Bearbeitung
AP 1 - Entwicklung von Lösungsstrategien	Teilnahme an den Sitzungen (23.02.2017 / 06.07.2017 / 14.09.2016 / 30.11.2016 / 15.02.2017 / 11.05.2017 / 13.07.2017 / 08.11.2017 / 07.02.2018 / 15.05.2018)
AP 2 - Materialentwicklung	erledigt
AP3 - Untersuchung, Bewertung und Auswahl Realisierungskonzept	Erstellung einer Anforderungsmatrix und Abstimmung der zulassungsspezifischen Anforderungen mit dem Institut für Fenstertechnik e.V. Rosenheim zur (16.10.2017) Zusammenstellung der Anforderungen gemäß DIN EN 13659

AP 4 - Entwicklung und prototypische Realisierung eines modularen Baukastens für den Fassadenladen	Planung der Funktionsmodelle und deren Einbau in die Prüfstände Erstellung der Messkonzepte Kalibrierung und Einbau der Sensorik
AP 5 - Untersuchung zum Leistungsprofil und zu Kennwerten der Funktionsmodelle und ihrer Komponenten	Durchführung der Messungen der Funktionsmodelle an den Prüfständen (Goniophotometer, kalorimetrischer Fassaden- und Dachprüfstand und Versuchseinrichtung für energetische und raumklimatische Untersuchungen VERU) unter verschiedenen Einstrahlrichtungen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Lichttransmissionsgrade ▪ Strahlungstransmissionsgrade ▪ g-Werte ▪ Lamellentemperaturen
AP 6 - Auswertung der Daten und Dokumentation	Auswertung und Dokumentation der Messdaten, sowie Einordnung der ermittelten Kennwerte

Meilenstein (M)	Erreichungsstand
M 1 – Lösungsstrategien	vollständig erreicht Bewertete Strategie mit ausgewählten Werkstoffen, die eine Umsetzung der Projektziele und einen marktgerechten Ansatz aufzeigt
M 2 – Realisierungskonzept	vollständig erreicht Prototypischer Fassadenladen als Baukastensystem, dessen Komponenten auf ihre grundsätzliche Brauchbarkeit und Leistungsfähigkeit hin getestet wurden.
M 3 – Funktionsmodelle	vollständig erreicht Kenndaten und umfassende Untersuchungsergebnisse zum Fassadenladen und seiner modularen Einzelkomponenten
M 4 – Abschluss	vollständig erreicht Zusammenfassender Bericht über die Entwicklung und getestete Leistungsfähigkeit eines prototypischen Fassadenladens als Vorstufe für ein marktgerechtes Produkt der nahen Zukunft

A3.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Rahmen des Forschungsprojekts Teilvorhaben 3 „bauphysikalische Bewertung“ wurden die entwickelten Funktionsmodelle des Fassadenladens vor allem lichttechnisch und energetisch untersucht.

In einem ersten Schritt wurden im DAkKS-akkreditierten Prüflaboratorium „Feuchte, Mörtel, Strahlung, Emissionen“ Reflexion und Transmission an Materialproben gemessen. Dabei wurden die folgenden lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen bestimmt:

- Lichtreflexions- und -transmissionsgrad
- direkter Strahlungsreflexions- und -transmissionsgrad
- direkter Strahlungsabsorptionsgrad
- Emissionsgrad

Ergänzend zu den Labormessungen an Materialproben soll die Leistungsfähigkeit und Einsetzbarkeit des gesamten Fassadenladens (in annähernder Originalgröße) an weiteren Prüfständen getestet werden. Der Fassadenladen setzt sich aus drei verschiedenen Bereichen

zusammen: Brüstung, Sichtbereich und Oberlicht. Die drei verschiedenen Anordnungen werden jeweils als Funktionsmodelle hergestellt und untersucht. Die Kennwerte für ein gesamtes Fassadenelement, bestehend aus unterschiedlichen Bereichen des Fassadenladens, können somit je nach Zusammensetzung flächenanteilig bestimmt werden.

Die Kennwerte werden an zwei Prüfständen, einem Goniophotometer und am kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand, ermittelt.

Prüfstand	ermittelte Kennwerte	Probekörper
Goniophotometer	Messung der Lichttransmission $\tau_{v,ger-h}$ (gerichtet-hemisphärisch) des Fassadenladens unter diversen Einstrahlwinkeln Berechnung der Lichttransmission $\tau_{v,dif-h}$ (diffus-hemisphärisch) des Fassadenladens	Probe Brüstung Probe Sichtbereich Probe Oberlicht
kalorimetrischer Fassaden- und Dachprüfstand	Messung des Gesamtenergiedurchlassgrades g_{tot} von Verglasung mit Fassadenladen Messung der Lichttransmission τ_v und der direkten Strahlungstransmission τ_e von Verglasung mit Fassadenladen	Funktionsmodell Brüstung + Verglasung Funktionsmodell Sichtbereich + Verglasung Funktionsmodell Oberlicht + Verglasung

Messung am Goniophotometer

Das Goniophotometer ermöglicht es, die Lichttransmission und Lichtreflexion von Fassadenkomponenten und Systemen richtungsaufgelöst zu messen. Für den Fassadenladen wird die Lichttransmission für die 3 Bereiche (Brüstung, Sichtbereich, Oberlicht) unter verschiedenen Höhenwinkeln gemessen. Wie zu erwarten und gewünscht, sind die Transmissionsgrade beim Sicht- und Oberlichtbereich vom Höhenwinkel der Einstrahlung abhängig. Mit dem ermittelten Lichttransmissionsgrad kann nach DIN EN 14501 die Tageslichtnutzung klassifiziert werden. Die Tageslichtnutzung wird bestimmt durch die Fähigkeit der Sonnenschutzeinrichtung, die Zeitdauer zu verkürzen, während der künstliches Licht erforderlich ist und die Fähigkeit der Sonnenschutzeinrichtung, das verfügbare Tageslicht zu optimieren.

Messung am kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand

Die energierelevanten bauteilspezifischen Kenndaten der drei Funktionsmodelle (Brüstung, Sichtbereich und Oberlicht) werden in situ am kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand des IBP in Holzkirchen in Kombination mit einer Verglasung unter realen Wetterbedingungen gemessen. Bei diesem Prüfstand handelt es sich im Wesentlichen um ein sehr großes Kalorimeter, das entweder in einer starren Position betrieben oder heliostatisch ausgerichtet werden, um einen permanenten senkrechten Sonneneinstrahlungswinkel oder, unter einem Vorhaltewinkel betrieben, einen definierten Einstrahlungswinkel der Sonne zu gewährleisten. Für die Messung des Fassadenladens befindet sich eine Zweifachverglasung in der Prüföffnung vor die nacheinander die einzelnen Funktionsmodelle installiert werden. Dabei werden für die einzelnen Funktionsmodelle die Gesamtenergiedurchlassgrade g_{tot} unter verschiedenen Einstrahlwinkeln gemessen. Außerdem wird die Lichttransmission sowie die Transmission der Gesamtstrahlung für senkrechte Einstrahlung über die Höhe des Prüflings gemessen.

Ermittlung der Kennwerte

Am Goniophotometer wurde nur der Fassadenladen ohne Verglasung gemessen, während am kalorimetrischen Dach- und Fassadenprüfstands der Fassadenladen inkl. der eingebauten Verglasung gemessen wurde. Die Ergebnisse aus beiden Prüfständen werden mit Hilfe des Rechenverfahrens nach DIN EN 13363 Teil 2 bzw. DIN EN ISO 52022-3 ausgewertet.

Um die Ergebnisse einzuordnen, werden sie mit den Standardwerten nach DIN V 18599-2 verglichen. Kennwerte von Jalousien werden in der Regel für die Cut-Off-Stellung (keine direkte Sonneneinstrahlung in den Raum) angegeben. Vergleicht man den g_{tot} -Wert des Sichtbereichs sowie des Brüstungsbereichs inkl. der Verglasung unter einem Höhenwinkel von

30°, entspricht dieser dem Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} einer weißen Außenjalousie (45° geneigt, Cut-Off-Stellung). Für den Oberlichtbereich liegt der Gesamtenergiedurchlassgrad für eine senkrechte Einstrahlung im Bereich eines dreiviertel geschlossenen Rollladens.

FabioW
Anhang

Die ausführliche Beschreibung der Messungen am Goniophotometer und am kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand sowie die Ergebnisse sind im Sachbericht (Kapitel 4) dargestellt.

Lamellentemperaturen

Nach DIN EN 13659 (2015-07) Anhang A sind für Abschlüsse aus Kunststoff Temperatureinflüsse von Bedeutung und können schon im Entwicklungsstadium berücksichtigt werden, indem die linearen Ausdehnungskoeffizienten sowie die Elastizitätsmodule der Werkstoffe auch für erhöhte Temperaturen beachtet werden. Die Norm differenziert diese nach der Farbe des Behangs. Zur Bestimmung der tatsächlichen Lamellentemperaturen unter den vorherrschenden klimatischen Randbedingungen am Versuchsstandort in Holzkirchen werden 12 Temperatursensoren an den Lamellen angebracht und von August 2017 bis Juni 2018 gemessen. Dazu wurde das Funktionsmodell Brüstungsbereich nach seiner Vermessung am kalorimetrischen Fassaden- und Dachprüfstand vor der verglasten Südfassade an einem Testgebäude (Versuchseinrichtung für energetische und raumklimatische Untersuchungen VERU) angebracht.

Die ausführliche Beschreibung der Messungen der Lamellentemperaturen und die Ergebnisse sind im Sachbericht (Kapitel 4.4) dargestellt.

A4 Teilvorhaben 4: Materialentwicklung (TECNARO) **Förderkennzeichen: 22013815**

A4.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Im Rahmen des Teilvorhabens wurden geeignete biogene Werkstoffe untersucht. Die Materialentwicklung war ein kontinuierlicher iterativer Entwicklungsprozess, der die anderen Arbeiten entsprechend begleitete.

Es wurden zunächst die momentan am Markt verfügbaren Biopolymerklassen recherchiert und hinsichtlich Ihrer Eignung als Fassadenladenrohstoff geprüft. Der Fassadenladen ist in der Anwendung zahlreichen Belastungen ausgesetzt, die das notwendige Eigenschaftsprofil der eingesetzten Materialien definieren. Im Rahmen des Vorhabens soll die Konstruktion der Einzelelemente an die Eigenschaften des Materials angepasst werden, so dass eine feste Definition von Materialkennwerten nicht angestrebt wurde. Nichtsdestotrotz sind essentielle Materialkennwerte identifiziert worden (Tab. 1, Seite 9f.). So ist z. B. für Sonnenschutzsysteme und Fassadenelemente sowie eine Temperaturbeständigkeit in der Anwendung bis 80 °C essentiell. Zusätzlich soll eine Anlehnung in definierten Positionen an die DIN EN 13659 „Abschlüsse außen und Außenjalousien – Leistungs- und Sicherheitsanforderungen“ erfolgen. Für die eingesetzten Werkstoffe in Außenabschlüssen schließt dies vor allem die Vicat Erweichungstemperatur, den E-Modul bei Biegung als auch natürliche bzw. künstliche Alterung ein.

A4.2 Bearbeitete Arbeitspakete

Die TECNARO GmbH war beteiligt an den Arbeitspaketen

3.1 Entwicklung von Lösungsstrategien

3.2 Materialentwicklung

3.3 Untersuchungen, Bewertungen und Auswahl einer oder mehrerer Lösungsstrategien

3.4 Entwicklung und prototypische Realisierung eines modularen Baukastens für den Fassadenladen

A4.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Rahmen der Erarbeitung des Lastenheftes und der Lösungsstrategien erfolgte von TECNARO die Bereitstellung von Datenblättern und Mustern zu unterschiedlichen Werkstoffen. TECNARO entwickelte mehrere geeignete biogene Werkstoffe und stellte diese zur Weiterverarbeitung bereit. In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde ein extrudierfähiger Compoundwerkstoff für die Funktionsmodelle ausgewählt.

Unter Berücksichtigung grundsätzlicher Extrudierbarkeit und Verfügbarkeit der Materialien wurden die potentiell in Frage kommenden biogenen Werkstoffe recherchiert (Tab. 2, Seite 11), wobei die angegebenen Nachteile durch eine Werkstoffmodifizierung (Compoundierung) kompensiert werden müssten.

Rezeptur	Compound	Vor- und Nachteile	Verarbeitbarkeit in Extrusion	Bemerkung
ARBOBLEND® 3016V	PLA-basiert Farbe: beige	+ Stabile Schmelze - unregelmäßiger Ausstoß - Kriechen des Materials bei hoher Temperatur - Hydrolysebeständigkeit bei hoher Temperatur	bedingt	Sehr sensibel auf Prozessschwankungen
ARBOBLEND® 3584V	PLA-basiert Farbe: hell/ weiß	- unregelmäßiger Ausstoß	nein	Verarbeitung nicht möglich
ARBOBLEND® 3765V	PLA-basiert GF-verstärkt Farbe: beige	+ (Form)-stabile Schmelz + Innenkonturen werden gut gebildet - Enges Verarbeitungsfenster	ja	Ähnliche Grundrezeptur, so dass es auch in der Verarbeitung keine Unterschiede gibt. Dies kann sich aber auch im Kriechen und der Hydrolysebeständigkeit bei hoher Temperatur negativ bemerkbar machen und ist weiterhin zu prüfen.
ARBOBLEND® 3986V	PLA-basiert GF-verstärkt Farbe: hell/ weiß		ja	
ARBOBLEND® 3987V	PLA-basiert GF-verstärkt Farbe: dunkelbeige		ja	
ARBOBLEND® 3766V	PLA-basiert GF-verstärkt Farbe: hell/ weiß	+ Höhere Temperaturbeständigkeit - Prozess sehr anfällig gegenüber Restfeuchtigkeit im Material; geringe Viskosität dieser Rezeptur	nein	

Tab. 45: Bewertung der bisher entwickelten Materialrezepturen nach aktuellem Stand der Charakterisierungen

TECNARO unterstützte bei der Bewertung und Auswahl einer Lösungsstrategie unter Berücksichtigung werkstoff- und verarbeitungsspezifischer Aspekte. TECNARO stellte ferner das Material für die Funktionsmodelle bereit.

A5 Teilvorhaben 5: Prototyp (Joma-Polytec)
Förderkennzeichen: 22013915
FabioW
Anhang

Arbeitspakete (AP)	Bearbeitungsstand
AP 1 - Entwicklung von Lösungsstrategien	<p>Teilnahme an Projektsitzungen</p> <p>Diskussion zur Profilgestaltung und Werkzeugauslegung beider im Projekt vorgesehenen Werkzeuge</p> <p>Diskussion zu Materialanforderung im Hinblick auf den Verarbeitungsprozess</p> <p>Optimierungskonzepte für in der Fertigung auftretende Schwierigkeiten</p> <p>Entwicklung und Konstruktion einer Inline-Vorrichtung zur Wärmenachbehandlung der Profile</p>
AP 2 - Materialentwicklung	<p>Tests v.a. im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit/Extrudierbarkeit an verschiedenen Materialtypen und Rezepturen an bestehenden Werkzeugen durchgeführt.</p> <p>Erhalt von verarbeitungstechnischer Informationen/Erfahrungen bzgl. der Werkzeugauslegung des Prototypenwerkzeuges.</p>
AP 3 - Untersuchung, Bewertung und Auswahl Realisierungskonzept	<p>Bewertung und Anpassung von möglichen Profilgeometrien im Hinblick auf die Realisierbarkeit zum Bau der Extrusionswerkzeuge.</p> <p>Materialauswahl für die Prototypenphase aufgrund der gesammelten, verarbeitungstechnischen Erfahrungen</p> <p>Bewertung und Anpassung möglicher Peripherieinstallationen in der Fertigung</p>
AP 4 – Entwicklung und prototypische Realisierung eines modularen Baukastens für den Fassadenladen	<p>Beratung bzgl. der Auslegung der Fassadenladen-Funktionsmodelle, v.a. aus ver- und bearbeitungstechnischer Sicht</p> <p>Fertigung der zum Bau von Funktionsmodellen / Anschauungsläden nötigen Profile der Flächenbelegung</p>
AP 5 – Untersuchung zum Leistungsprofil und zu Kennwerten der Funktionsmodelle und ihrer Komponenten	<p>Durchführen von Tests bzgl. des Kristallisationsverhaltens des Extrusionsprofils</p> <p>Durchführen der orientierenden Brandprüfung zur Einschätzung der Brandklasse für Bauprodukte des Fassadenladens</p> <p>Bereitstellung von Profilen an Projektbeteiligte für weitergehende Untersuchungen</p>
AP 6 - Auswertung der Daten und Dokumentation	<p>Ergebnisse der Materialbemusterungen, der Werkzeugauslegung und -konstruktion, sowie der Produktionsdaten der Profilmontage wurden ausgewertet und dokumentiert</p>

Meilenstein (M)	Erreichungsstand
M 1 - Lösungsstrategie	Vollständig erreicht Konstruktionszeichnungen für Extrusionsprofile wurden ausgearbeitet. Konstruktion einer Vorrichtung zur nachgeschalteten Angleichung des Kristallisationsgrades der Profile
M 2 - Realisierungskonzept	Vollständig erreicht Prototypen-Werkzeug wurde konstruiert und gebaut, Musterprofile wurden ausgeliefert
M 3 - Prototyp	weitestgehend erreicht Fertigung von extrudierten FabioW-Profilen für die Flächenbelegung des Fassadenladens. Bereitstellung der Profile an die Projektpartner zur Herstellung von Funktionsmodelle. Fertigung von Rechteck-Hohlprofilen aus einem bestehenden Werkzeug. Bereitstellung dieser Profile zum Bau eines Prototypenrahmens zur Veranschaulichung der Rahmenwirkung

FabioW
Anhang

A5.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Materialbemusterung

Im Zuge der Materialbemusterung stellte Tecnaro verschiedene Comounds, teilweise mit unterschiedlichen Basispolymeren zur Verfügung, welche dann bei Joma-Polytec auf Serienanlagen verarbeitungstechnischen Tests untersucht wurden. Das PET-basierte Material zeigte eine nicht hinreichende Schmelzefestigkeit, d.h. ist für das Verfahren der freien Extrusion, schematisch dargestellt in Abb. 170 nicht geeignet, da der am Werkzeug (blau) austretende Schmelzestrang nicht bis zum Abzug (lila) geführt werden kann, sondern vorher abreißt. Diese unzureichende Festigkeit zeigt sich durch ein sehr dünnflüssiges Austreten der Schmelze am Werkzeug (Abb. 171, rechts). Durch Absenken der Prozesstemperatur wurde versucht, die Viskosität der Schmelze zu erhöhen, was dazu führte, dass das Material nicht mehr ausreichend aufgeschmolzen wurde (Abb. 171, rechts). Der Grat zwischen „unzureichend aufgeschmolzen“ und „zu dünnflüssig“ ist sehr gering, d.h. hier bieten die verfahrenstechnisch zur Verfügung stehenden Stellschrauben keine ausreichende Möglichkeit zur prozesssicheren Anpassung. Dieses Material wurde daher als ungeeignet eingestuft.

Die zweite, in größerem Umfang bemusterte Polymerfamilie der Polylactide (PLA) brachte schließlich das der ersten Projektphase zugrunde liegende Material „Arboblend 3896V“ hervor. Aus den Versuchen der Materialbemusterung konnten bereits materialspezifische Eigenschaften v.a. im Hinblick auf Aufschmelzverhalten, Schmelzeschub, und Abkühl- bzw. Schrumpfverhalten ermittelt werden, welche für die spätere Auslegung der Extrusionsdüsen von Belang sind.

Diskussion zur Geometrie

Zur Festlegung der Geometrie der FabioW-Profile wurden fertigungsbedingte Rahmenbedingungen in die Diskussionsrunden eingebracht. Das Verfahren der freien Extrusion bietet zwar viel Spielraum, was die Ausgestaltung von Profilgeometrien anbelangt, doch gibt es auch gewisse Einschränkungen, welche bei der Geometrie-Auswahl berücksichtigt werden müssen. Diese sind beispielsweise in der fehlenden Möglichkeit, Innenflächen von Hohlkammern zu kalibrieren, also in definierter Form zu halten, zu finden. Hier können zwar, in Abhängigkeit des eingesetzten Materials verschiedene innere Oberflächenqualitäten generiert

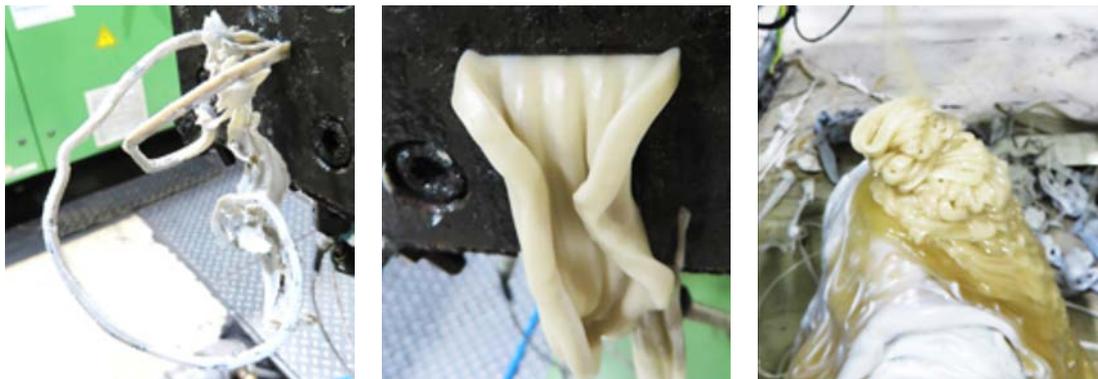


Abb. 170: dünnflüssige, nicht ausreichend formstabile Bio-PET-Schmelze

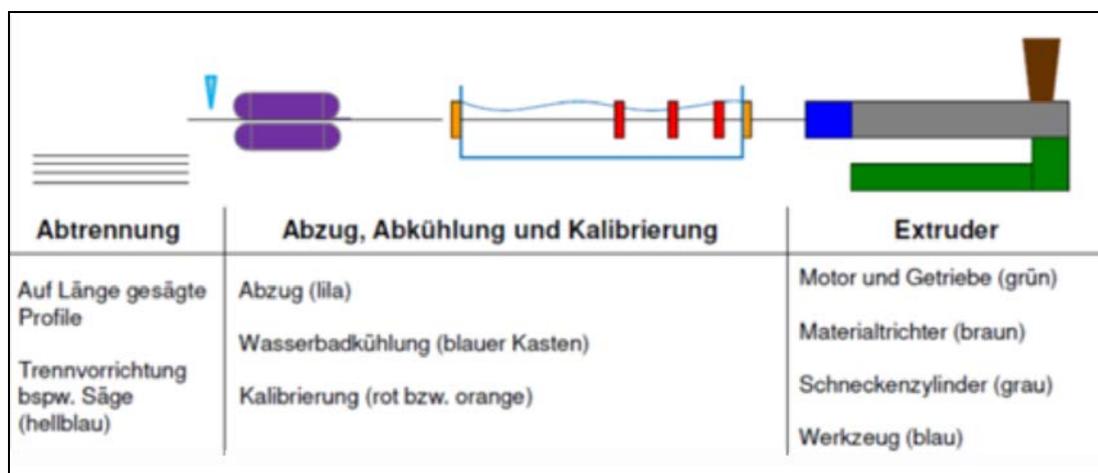


Abb. 171: schematische Darstellung einer Extrusionslinie

werden (Abb. 172), doch kann diese aufgrund der fehlenden (inneren) Kalibrierung nicht garantiert werden. Dies muss entsprechend in der Auslegung und Verwendung der Profile berücksichtigt werden. Darüber hinaus sind den Wandstärken bzw. Wandstärkenverteilung des Profils gewisse Grenzen gesetzt.

Konstruktion Werkzeug R.1.2.3

Nach Berücksichtigung der verfahrenstechnisch bedingten Rahmenbedingungen wurde von THN-AR eine Kontur zur Profilausgestaltung vorgeschlagen. Anhand dieser Vorgaben wurde eine aus mehreren Scheiben bestehende Extrusionsdüse (Abb. 173) konstruiert. Das Werkzeug hat die Aufgabe, die Kunststoffschmelze vom kreisrunden Querschnitt des Extruders in die Form des zu extrudierenden Profils zu überführen. Hierbei muss das Fließverhalten der Schmelze berücksichtigt werden, um die Fließkanäle entsprechend der späteren Sollkontur geeignet zu dimensionieren. Des Weiteren wurde eine dreistufige Kalibereinheit (Abb. 174) konstruiert. Die Kalibrierung dient im Extrusionsprozess als „Negativform“ des herzustellenden Profils. In dieser Negativform, welche das Profil kontinuierlich durchläuft ist es nötig, dem Profil ausreichend Wärme zu entziehen, um die plastisch noch formbare Masse in ein stabiles Profil zu überführen. Die beim Abkühlen auftretenden Schrumpfungen müssen bereits an der Düse miteinkalkuliert werden, d.h. die Düse weicht maßlich meist vom Soll ab, da durch den Abkühlvorgang in der Kalibrierung noch geringe Verformungen der Vorprofils ablaufen.

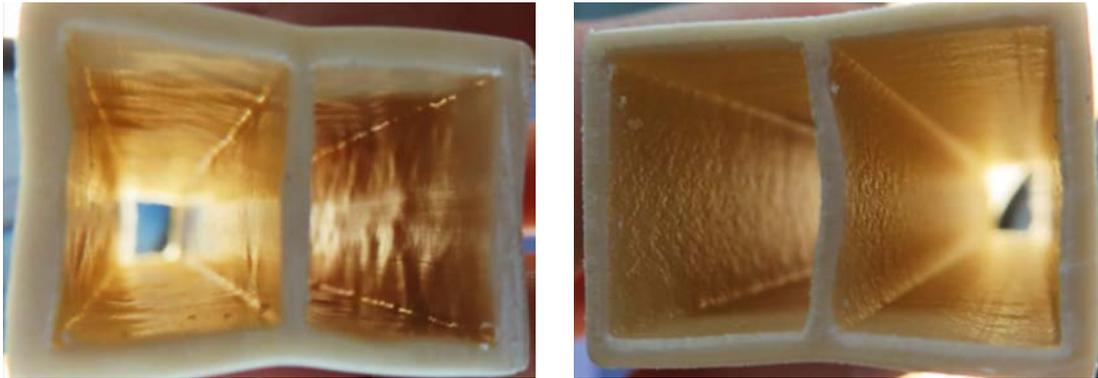


Abb. 172: Nicht-kalibrierte innere Oberflächen.
Links unverstärktes PLA mit ungleichmäßigem Schmelzeschub am Werkzeug,
rechts Glasfaserverstärktes PLA mit optimierter Düse

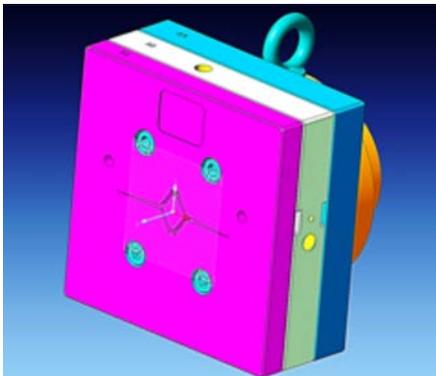


Abb. 173: Extrusionsdüse des
FabioW-Profiles „R.1.2.3“

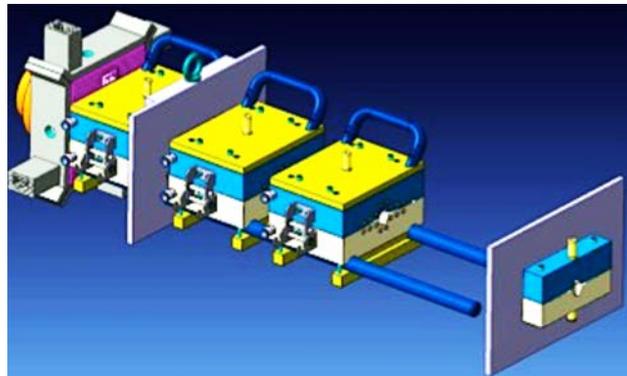


Abb. 174: Extrusionsdüse mit dreistufiger Kaliberein-
heit und Absaugzscheibe

Problematik Wellenbildung

Die Ursache der im vorangegangenen Bericht bereits diskutierten „Wellenbildung“ an den Profilsitzen konnte ausgemacht werden. Die Hintergründe hierzu sollen nun nochmals kurz dargelegt werden. Abb. 176 zeigt dabei die Tatsache auf, dass Innenkammern wie bereits erwähnt nicht kalibriert und somit auch nur in einem geringeren Maß (nur von außen) gekühlt werden können. Dadurch ergibt sich zwangsläufig eine geringere Abkühlgeschwindigkeit der „Raute“ im Vergleich zu den Flügelspitzen. Durch die damit einhergehende höhere Kristallisierung der Strukturen im Rautenbereich liegt in eben diesem ein höheres Schrumpfpotential vor (Abb. 177). Die Längenunterschiede zwischen Profilkern und Flügelspitzen zeigt sich in einer ausweichenden Wellenbewegung der Flügel.

Die Problematik der Wellenbildung konnte durch die Integration einer eigens hierfür erstellten „Tempervorrichtung“ in der Fertigungslinie größtenteils abgestellt werden. Diese Vorrichtung wurde universell einsetzbar konstruiert, d.h. auch für das zweite FabioW-Profil kann diese Vorrichtung eingesetzt werden.

Konstruktion des zweiten Werkzeugs

Auf Grundlage der mit dem ersten Profil erhaltenen Ergebnisse und Eindrücke wurde die Kontur des zweiten Profils definiert. Bei der Auslegung und Erstellung des zweiten Werkzeuges bzw. der Kalibrierung konnte bereits einiges an Optimierung aus den Erfahrungen des Ersten einfließen. Das zweite Werkzeug konnte somit in einen Zustand gebracht werden, welcher eine gutlaufende, wenig störanfällige Dauerproduktion ermöglicht.

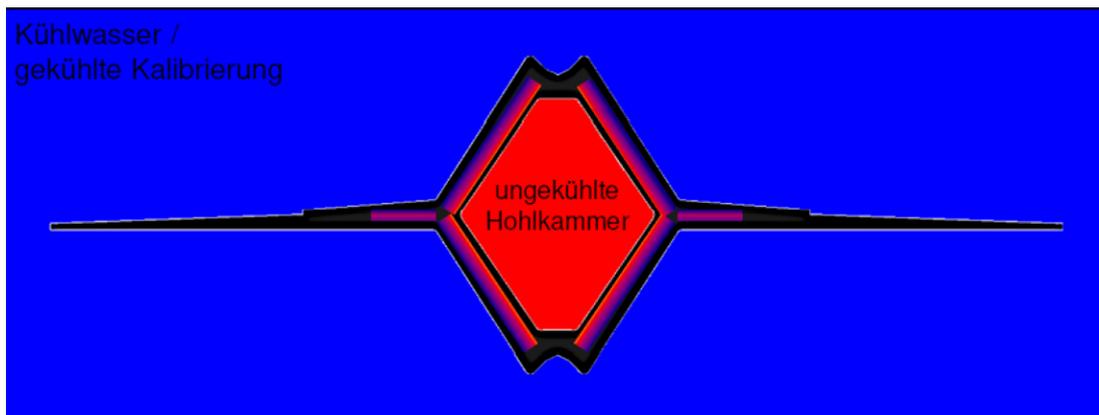


Abb. 175: Stauwärme im inneren der Hohlkammer während der Fertigung

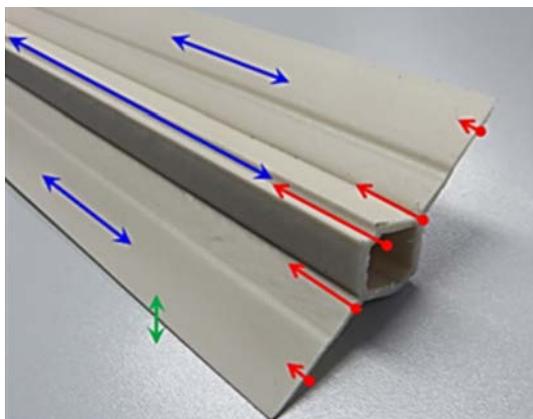


Abb. 176: Abkühlungsbedingte Schwindung während der Fertigung über den Profilquerschnitt.