

Ralf Bäumer, Sebastian Seidelmann

ULTRASLIM

**Entwicklung ultraschlanker,
energieeffizienter Fassaden- und
Fenstersysteme mit faserver-
stärkten Kunststoffprofilen (FVK) in
Kombination mit Vakuumisolierglas
(VIG) für optimalen Wärmeschutz**

F 2922

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9514-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

FORSCHUNGSVORHABEN

ENTWICKLUNG ULTRASCHLANKER, ENERGIEEFFIZIENTER
FASSADEN- UND FENSTERSYSTEME MIT FASERVERSTÄRKTEN
KUNSTSTOFFPROFILEN (FVK) IN KOMBINATION MIT
VAKUUMISOLIERGLAS (VIG) FÜR OPTIMALEN WÄRMESCHUTZ

ULTRASLIM

Abschlussbericht

Faserinstitut Bremen e.V.
FH Dortmund, FB Architektur

Dipl.-Ing. Ralf Bäumer
Dipl.-Ing. (Architektur) Sebastian Seidelmann

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

(Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-11.35 / II 3-F20-10-1-062)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung	3
1.1	Fenstertechnik	4
2	Rahmenentwicklung	10
2.1	Profilgeometrie.....	10
2.2	FEM Analyse der Profilgeometrien.....	17
2.2.1	Beschreibung des Modells	17
2.2.2	Lastfall 1 - Hauptlast: Eigengewicht der Glasscheibe	19
2.2.3	Lastfall 2 - Zusatzlast: Windlast auf Glasscheibe.....	21
2.2.4	Lastfall 3: Überlagerung der Hauptlast und der Zusatzlast	25
2.3	Verglasung.....	27
2.4	Öffnungsarten.....	28
2.5	Klebeverbindungen.....	30
2.5.1	Allgemeines	30
2.5.2	Scheibe auf Rahmen (Glas auf GFK).....	32
2.5.3	Rahmen (GFK auf GFK).....	34
2.5.4	Scharniere (Stahl auf GFK)	34
2.6	Folierung.....	37
2.6.1	Allgemeines	37
2.6.2	Dekorfolien 3M DI-NOC.....	38
2.6.3	Umsetzung.....	38
3	Fertigung von Probekörpern.....	40
3.1	Verwendete Materialien.....	40
3.2	Herstellung und Untersuchung von Prüfkörper	41
3.3	Ergebnisse.....	44

4	Brandschutz	45
4.1	Anforderungen des baulichen Brandschutzes.....	45
4.1.1	Gebäude geringer Höhe	45
4.1.2	Höhere Gebäude	45
4.1.3	Rettungswege.....	45
4.1.4	Brandschutzverglasungen	45
4.2	Technische Umsetzbarkeit	46
4.2.1	Grundsätzliches	46
4.2.2	Brandverhalten des Grundmaterials.....	46
4.2.3	Brandschutz über Eingriff in die Kunststoffmatrix.....	46
4.2.4	Brandschutz über Beschichtung.....	47
4.2.5	Brandschutz über Folierung	47
4.2.6	Brandschutzvlies.....	48
4.2.7	Fazit	48
4.3	Eigene Untersuchungen	49
4.3.1	Verwendete Materialien	50
4.3.2	Herstellung und Untersuchung von Prüfkörpern	51
4.3.3	Ergebnisse.....	52
5	Herstellung der Fensterrahmenprofile.....	54
5.1	Versuchsdurchführung	57
5.2	Analyse Fertigungsqualität	60
5.3	Herstellung von Profilen mit geänderter Geometrie	65
5.4	Mechanische Kennwerte der Profile und Abgleich mit Simulation	65
6	Bau eines Demonstrators.....	69
6.1	Zielsetzung	69
6.2	Bau des Messedisplay.....	70
6.2.1	Bau des Konzept-Demonstrators	71
6.2.2	Messeauftritt	75
7	Zusammenfassung.....	79
8	Literatur	80
8.1	Einsatz von Faserverbund-Kunststoffen im Bauwesen.....	80
8.2	Fügetechnik Kleben	81
8.3	Brandschutz in Kunststoffen.....	82
8.4	Nachhaltigkeit von Faserverbund-Kunststoffen.....	82
8.5	Profilherstellung durch Pultrusion.....	83
9	Anhang	84

1 Einleitung und Zielsetzung

Das Forschungsvorhaben befasst sich mit der Entwicklung eines ultraschlanken, energieeffizienten Fassaden- und Fenstersystems. Ziel ist es, ein Systemprodukt aus einer Vakuumisolierverglasung mit einer geeigneten Rahmenkonstruktion aus Faserverbundkunststoffen zu konzipieren, das die höchsten Anforderungen an die Fenstertechnik erfüllt. Dieses Produkt soll modular mit einfachen Demontier- und Austauschereigenschaften ausgestattet werden. Dies sind wesentliche Voraussetzungen für eine Markteinführung, ebenso wie der Einsatz im Bestand und die Nachhaltigkeit des Fenstersystems.

Neben speziellen Anforderungen aus diesen Bereichen stehen die Funktionalität, die Nachhaltigkeit, die Ästhetik und nicht zuletzt die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund.

1) Funktionalität

Das System muss Grundkriterien, wie Standsicherheit, statisch-konstruktive Anbindungsmöglichkeiten und bauphysikalisch herausragende Eigenschaften, wie geringe Wärmeleitung, besitzen. Auch der Brand- und Schallschutz sowie die dauerhafte Dichtheit aller Komponenten ist sicherzustellen.

2) Nachhaltigkeit

Das zu entwickelnde System soll sich durch eine hohe Lebensdauer und seine modulare Bauweise mit einfacher Demontier- und Austauschbarkeit auszeichnen. Es muss im Hinblick auf die Wiederverwertbarkeit der Profile das sortenreine Recycling ermöglichen, um eine positive Ökobilanz zu erzielen. Anlage 1 (Einglasverglasung in Deutschland)

3) Ästhetik

Systeme, die auch mit ihrem Aussehen höchste Ansprüche erfüllen, erfahren die größtmögliche Akzeptanz. Daher wird bei ihrer Entwicklung darauf geachtet, Gestaltung, Funktion, Programm und Ökologie zu vereinen und bei Sanierung denkmalgeschützter Gebäude auch das originale Erscheinungsbild trotz effizientem Wärmeschutz wiederzugeben.

4) Wirtschaftlichkeit

Die Profile für das System sollen für eine kostengünstige automatisierte Produktion ausgelegt und durch die Vorteile von FVK im Bereich der Tragfähigkeit konkurrenzfähig zu ihren Wettbewerbern im jeweiligen Anwendungsbereich sein. Durch das wesentlich leichtere System gegenüber den Passivhaus-Fenstern mit der Dreifachverglasung können auch die Tragkonstruktionen und Befestigungen smarter geplant werden.

5) Verfahrenstechnik

Im Bereich der Verfahrenstechnik ermöglicht das am Faserinstitut Bremen (FIBRE) eingesetzte Pultrusionsverfahren die kostengünstige Herstellung von Faserverbundkunststoff (FVK) -Profilen. Durch den hohen Automatisierungsgrad und die hohe Produktionsgeschwindigkeit sind die Profile wesentlich günstiger als herkömmlich hergestellte Faserverbundkomponenten. Die Anwendung von Verbindungselementen aus FVK und neuartige Klebstoffe sollen eine einfache flexible, schnelle und demontierbare Verbindung von FVK-Bauteilen ermöglichen.

1.1 Fenstertechnik

Im Zuge der geplanten Verschärfung der EnEV besteht im Bereich der Fassaden- und Fenstertechnik Entwicklungsbedarf bei der Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften von Rahmenprofilen und Verglasung. Die FVK-Profile mit optimierten Geometrien und günstigem U-Wert stellen eine hervorragende Problemlösung dar. Die Verglasung als Fassadenfläche ist nämlich die größte Schwachstelle bei der Wärmedämmung eines Gebäudes. Einen neuen Ansatz liefert das Vakuumisoliertglas (VIG): durch die Ausschaltung der Gaswärmeleitung im Zwischenraum kommt eine höhere Effizienz zum Tragen. Im Ergebnis des Forschungsvorhabens sollen neuartige Konzepte für den Einsatz von FVK-Profilen in Kombination mit VIG im Bauwesen aufgezeigt werden. Die Einzelergebnisse sollen exemplarisch in Form eines Demonstrators umgesetzt und damit die Adaption des Fenstersystems aufgezeigt werden. Dies bewirkt eine schnelle marktreife Umsetzung zur Erfüllung der Anforderungen der aktuellen EnEV,

Die Entwicklung eines ultraschlanken, energieeffizienten optimierten Fassaden- und Fenstersystems wird einen wichtigen Beitrag im Hinblick auf die Zukunftsfähigkeit des Bauwesens darstellen.

Im Bereich der Fenstertechnik besteht Entwicklungsbedarf bei der Reduktion von Profilabmessungen zur Vergrößerung der transparenten Bereiche und der Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften von Randprofilen (*Abbildung 1*). Diese Probleme sollen durch den Einsatz von optimierten Geometrien der FVK-Profile gelöst werden.

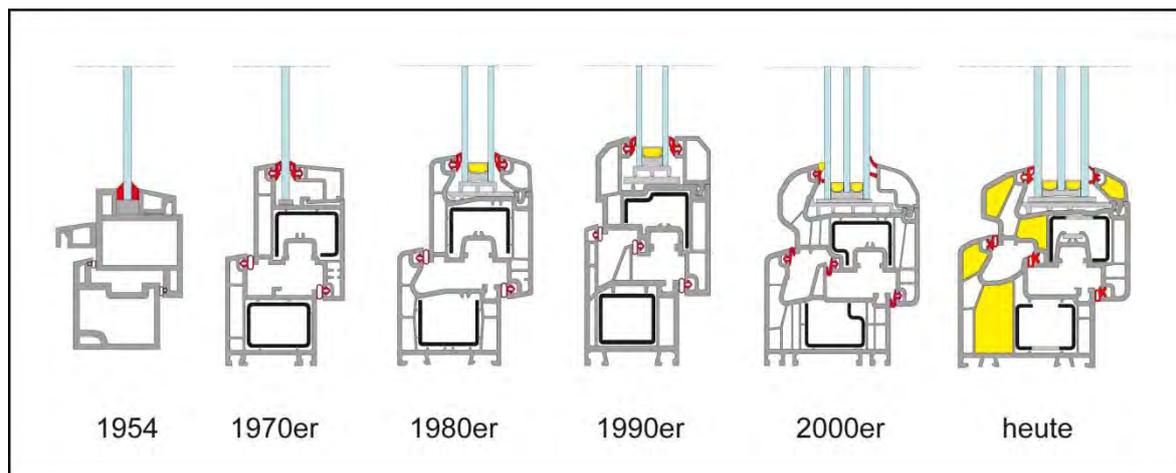


Abbildung 1: Entwicklung der Fensterrahmenstrukturen

Das GFK-Fenster besteht aus glasfaserverstärktem Kunststoff als Rahmenmaterial, welches an einer Verglasung kraftschlüssig verklebt wird. Der Rahmen wird nicht wie in den traditionellen Fensterkonstruktionen als tragendes Teil betrachtet, sondern hier trägt die Glasscheibe zu einer Versteifung des Fensterflügels bei. Dies erlaubt eine Platzierung der Verglasung im Vordergrund. Aus gestalterischem Gesichtspunkt wird der Rahmen quasi versteckt, was auch ein energetischer Vorteil gegenüber anderen Fensterprofilen darstellt. Dadurch wird das Rahmenmaterial auf Grund seiner hohen Festigkeit erheblich reduziert (*Abbildung 2*). GFK besitzt optimale Werkstoffeigenschaften für einen Fensterrahmen: geringe Wärmeleitfähigkeit, hohe

Festigkeit, hohe Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse, einfache Bearbeitbarkeit und eine gute Verträglichkeit mit Glas auf Grund seiner fast identischen Wärmeausdehnung. Diese Eigenschaft lässt Glas und GFK gut miteinander verkleben.



Abbildung 2: Gegenüberstellung Fensterrahmen Thermoplast (links) GFK (rechts)

Im Verlauf dieses Forschungsvorhabens wurde aus den Erkenntnissen der Profilanalyse ein Fenstersystem mit GFK-Profilen entwickelt. Dabei spielte der Blend- und Flügelrahmen, die Fensterlaibung, Verglasungsart, Einbau- und Bedienbarkeit eine große Rolle. Besonders für den Markt der energetischen Sanierung von historischen Gebäuden sind Fenster aus GFK Profilen noch nicht gründlich genug erforscht und die Potenziale auf diesem Gebiet sowie für den Neubau noch nicht erschlossen. Nach den theoretischen Untersuchungen verschiedener Varianten wurde ein optimiertes Fensterprofil im Pultrusionsverfahren mit einem neu entwickelten Werkzeug als Prototyp hergestellt.

Die Anforderungen des Vorhabens ergaben sich aus potenziellen Bedürfnissen der Energieeinsparung und des nachhaltigen Bauens von Bauherren, Kommunen und Nutzern, aber auch aus den technischen Regeln der Fenstertechnik und berücksichtigt zukünftige Entwicklungen der Gebäudehüllen und Fassadentechnik. Der herkömmliche Fensterrahmen wurde in diesem Projekt nicht neu erfunden sondern weiterentwickelt, mehrere Eigenschaften gegenüber der Ausgangslage wurden verglichen, in Frage gestellt, und es ist zu einem Optimierungsprozess gekommen, der wie alle Entwicklungsprozesse noch weiter offen ist. Durch diese Optimierung des Fensterrahmens wird auch mit Blick auf bestimmte Eigenschaften versucht, andere nicht negativ zu beeinflussen.

Funktionalität der Öffnung

Öffnungen machen einen Innenraum erst gebrauchsfähig. Licht, Luft und Kontakt zur Außenwelt sind für den Nutzer Bedürfnisse, die durch Öffnungen bedient werden. Während die grundlegenden Aufgaben des Fensters über Jahrhunderte praktisch gleich geblieben sind, haben sich die Anforderungen an Wärme-, Schall- und Brandschutz sowie an die Luftdichtigkeit des Bauteilanschlusses maßgeblich

verändert. Das Eigenschafts- bzw. Leistungsprofil des Fensters ist abhängig vom Standort des Gebäudes, der Orientierung zur Himmelsrichtung und auch der Gebäudehöhe, die durch die vorherrschende Windbeanspruchung Einfluss nimmt. Durch die Anforderungen des Wärmeschutzes hat sich das Fenster aber auch in eine andere Richtung entwickelt, das Gewicht durch die Doppelverglasung und Rahmen hat enorm zugenommen und der Rahmenanteil gegenüber der transparenten Fläche wurde immer größer. Dadurch mussten auch die Bau- und Fassadenkonstruktionen verstärkt werden.

Energieeinsparung und Wärmeschutz

Besonders das Rahmenmaterial eines Fensters definiert auch seine Eigenschaften und sein Verhalten. Der Fensterrahmen ist zuständig für die meisten Schutzfunktionen, die ein Fenster zu leisten hat. Der Rahmenanteil mit seinen Dichtungen war und ist der Schwerpunkt bei der Entwicklung eines Fensters, aber vor allem auch seine Schwachstelle. In der geschichtlichen Entwicklung des Fensters im 20-sten Jahrhundert wurden auf Grund der immer strenger gefassten Wärme-, Schall- und Brandschutztechnischen Anforderungen die Fensterrahmen immer breiter und schwerer, als Nebeneffekt wurde der Glasanteil auch kleiner und im Endeffekt die gesamte Fensteröffnung kleinmaßstäblicher. Die Reduzierung des Rahmenanteils und damit auch des Gewichtes durch ein modernes, leichtes Material wie faserverstärkte Kunststoffe FVK wird gerade in der Gebäudesanierung und im Denkmalschutz gefordert. Diese Forderung scheint auf den ersten Blick plausibel und selbstverständlich. Wie bei allen anderen Bauteilen einer Gebäudehülle hängen wärmeschutztechnische Eigenschaften maßgeblich von zwei Größen ab: zum einen vom Material und zum anderen von den Abmessungen des Bauteils, nicht zuletzt auch von der Ästhetik der Architektur. Eine Änderung von Material und Abmessung hat unmittelbare Konsequenzen auf die wärmetechnische Leistung des jeweiligen Bauteils. Auch bestimmen die Art und Weise der Verglasung mit ihrem U-Wert und die Dichtungssysteme die Entwicklung des Rahmens.

Glasfaserverstärkte Kunststoffprofile

Das GFK-Fenster besteht aus glasfaserverstärktem Kunststoff als Rahmenmaterial, welches an einer Verglasung kraftschlüssig verklebt wird. Der Rahmen wird nicht wie in den traditionellen Fensterkonstruktionen als tragendes Teil betrachtet, sondern hier übernimmt die Glasscheibe zusammen mit dem Rahmen die Statik des Fensterflügels. Dies erlaubt eine Platzierung der Verglasung auch im Vordergrund. Aus gestalterischen Gründen kann der Rahmen quasi versteckt werden, was auch einen energetischen Vorteil gegenüber anderen Fenstersystemen darstellt. Dadurch wird das Rahmenmaterial auf Grund seiner hohen Festigkeit erheblich reduziert. GFK besitzt optimale Werkstoffeigenschaften für einen Fensterrahmen: geringe Wärmeleitfähigkeit, hohe Festigkeit, hohe Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse, einfache Bearbeitbarkeit und eine gute Verträglichkeit mit Glas auf Grund seiner fast identischen Wärmeausdehnung. Auf Grund dieser Eigenschaften lassen sich Glas und GFK-Profile gut miteinander verkleben. Die Nachteile des Materials wie z. B. die UV-Beständigkeit und der notwendige Brandschutz können über Beschichtungen oder Folien gelöst werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird eine Optimierung des GFK-Fensters als Fenstersystem angestrebt, wo alle Teile des Fensters gemeinsam als eine Einheit und nicht als Einzelteile betrachtet werden und

trotzdem im System so flexibel sind, dass möglichst alle Einbausituationen erfüllt werden.

Verklebung

Seit 30 Jahren werden Glasscheiben zur Verstärkung der Karosserie in der Automobilindustrie schon verwendet. Hochfeste Klebstoffe bei der Verklebung von großen Windschutzscheiben, z. B. bei Bussen, LKW und Zügen, ermöglichten den Einsatz von dünneren und leichteren Metallrahmenbauteilen. Verklebung bei der Fensterverglasung auf dem europäischen Markt ist seltener zu finden; so werden immer noch Fensterflügel aus PVC und Holzfenster mit Verklottungen ausgesteift, was zu hohen Spitzenbelastungen führt. Die hochfeste Glasverklebung aus der Automobilindustrie wird in Kombination mit den Erfahrungen aus dem Fassadenbau (Structural Glazing) die Gestaltung, Konzeption und Leistung sowie die Herstellung von Fenstersystemen nachhaltig verändern. Bei Fenster und Türen mit Öffnungsfunktion werden Eckverbindungen und Scharniere durch hohe Kräfte stark beansprucht. Bei strukturell verklebten Fenstern werden die Kräfte fast gleichförmig um die Klebelinie verteilt. Die Verklebung von Glas und Fensterrahmen bringt nur Vorteile in Hinsicht von Stabilität und Statik und als Nebeneffekt ein verbessertes Aussehen durch schmalere Profile der gesamten Fensterkonstruktion mit sich. Andere energetische und mechanische Vorteile werden auch durch die Verklebung gewonnen wie z.B. Energieeinsparung durch Verbesserung des U-Werts, da die Metallprofile in PVC- od. GFK-Fenster wegfallen können. Energiegewinnung auch durch schlankere Profile (GFK), die einen größeren Verglasungsbereich erlauben. Die Klebtechnik spielt für die Innovationen der Fenstertechnik eine grundsätzliche Rolle und ist somit ein wichtiger Baustein in dem Systemfenster gemeinsam mit Rahmenmaterial, Dichtungen, Beschläge und Isolierglas. Bei der Verklebung von Profilmaterialien kommen für diese Technik unterschiedliche Ein- oder Zweikomponenten Kleber zum Einsatz. Die Fertigung und Montage der Flügelelemente kann man zwischen der Überschlagsverklebung am Glasanschlag außen, unterhalb der Dichtung und der Falzgrundverklebung im Zwischenraum zwischen Scheibe und Flügelfalz erreichen. Die Kleberapplikation wird in der Regel im Werk mit Hilfe von teil- oder vollautomatisierten, horizontalen oder vertikalen CNC-Anlagen gefertigt. Je nach Applikationsverfahren, Falzgrund- oder Überschlagverklebung kann man unterschiedliche Techniken einsetzen, weshalb eine enge Zusammenarbeit der Materialhersteller mit den Systempartnern für Automatisierungstechnik und Applikationstechnik schon bei den frühen Projektierungsphasen eingeplant ist. Da die Fensterverklebung eine relativ junge Technologie ist, stehen auf dem Markt wenige Regelwerke bzw. Standards zur Verfügung. Für PVC-Fenster gibt es Richtlinien von der RAL Gütegemeinschaft, aber speziell für GFK-Fenster sind solche Richtlinien noch nicht vorhanden.

Vakuum-Isolierglas (VIG)

Hierbei handelt es sich um eine High-Tech-Scheibe mit einem U-Wert von ca. 0,4 W/m²K für Geschäfts- und Wohngebäude. Einen neuen Ansatz liefert das VIG: durch die Ausschaltung der Gaswärmeleitung im Scheibenzwischenraum (SZR) kommt eine qualitative Verbesserung der Effizienz zum Tragen. So können im Zweischeibenaufbau bei 10mm Gesamtstärke ein U von 0,5 W/m²K erreicht werden. Herkömmliche Vakuumverglasungen erreichen im Zweischeibenaufbau nur Dämmwerte von bestenfalls U = 1,0 W/m²K (Qingdao Hengda Industry Co., China) bzw. U = 1,3 W/m²K (Nippon Sheet Glass, Japan). Dies liegt an den dabei

verwendeten Herstellungsverfahren, bei denen hohe Temperaturen auftreten. Diese schließen den Einsatz hochwertiger low- ϵ -Schichten (Softcoatings) aus. Die letzte VIG-Entwicklung aus China von der Firma Beijing Synergy Vakuum Glazing Technology CO. bringt eine kostengünstige VIG-Verglasung auf den Markt, für die ein U-Wert von 0,5 W/m²K) angegeben wird. Bei der Entwicklung dieser Glasscheibe stößt man auch auf elementare Probleme: Bei dem Vakuumprozess werden durch den Luftdruck beide Scheiben mit dem Vakuum dazwischen zusammengepresst, so dass Abstandhalter, Randabdichtung und die Vakuum-Erzeugung neu entwickelt wurden. Das erfordert neue Technologien, die wiederum neue Fertigungsmethoden verlangen. Die Glasindustrie tut sich schwer gegenüber solcher Herausforderung. Zum heutigen Stand der Technik bilden Verglasungen immer noch die wärmetechnische Schwachstelle von Gebäuden, bei den konventionellen Doppelverglasungen erreichen bestenfalls Dämmwerte von $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Hochdämmende, passivhaustaugliche Verglasungen erreichen Dämmwerte von $U = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dies lässt sich nur mit aufwändigen Dreischiebenaufbauten realisieren. Wir halten das VIG für die konsequenteste und effiziente Alternative für das Fenster des 21. Jahrhunderts, deshalb wird in den vorgelegten Fensterkonzepten eine VIG-Verglasung eingesetzt.

Nachhaltigkeit im Bauwesen

Kunststoff als Baumaterial ist nicht neu. Kunststoffe sind längst Bestandteile unserer Gebäude. Sie werden hauptsächlich als „verdeckte Konstruktionsstoffe“ und als Bauhilfsstoffe eingesetzt oder dienen als Dekor- oder Verkleidungsmaterial. Der Baustoff des 21. Jahrhunderts wird der Kunststoff sein. Kunststoff ist eines der ökologischsten Werkstoffe der Zukunft und auch nachhaltig. Ein Möbel oder eine Konstruktion aus Kunststoff verbraucht bei seiner Herstellung etwa ein Tausendstel jener Energie, die für die Herstellung eines Stahlmöbels oder eines Messesystems aus Stahl aufgewendet werden muss. Obwohl zurzeit noch Erdöl zur Herstellung von Kunststoffen eingesetzt wird, ist dieses nicht verloren. Kunststoffe lassen sich ohne weiteres bis zu 100 % recyceln und haben dann immer noch den gleichen Brennwert wie jenes Öl, das zu ihrer Erzeugung eingesetzt wird. Wir können uns nicht mehr erlauben, Erdöl einfach zu verbrennen. Zukünftig wird es auch Kunststoffe aus Bioölen, Stärken oder anderen nachwachsenden Rohstoffen oder auch Abfallstoffen wie Chitin (Abfallprodukt von Krustentieren) geben. Unser vorgeschlagenes Profilsystem soll robust, langlebig, leicht, flexibel aber stabil, kratzfest und feuerbeständig sowie pflegeleicht und zu 100% recycelbar sein.

Fenstertechnik

In dem vorgelegten Forschungsprojekt PROFAKU-Fenstertechnik wurde in erster Linie die Geometrie und Ausbildung des Falzbereichs des Rahmens sowie die Dichtungsanordnung entwickelt, um eine Reduzierung der Abmessungen des Blend- und Flügelrahmens zu favorisieren. Statisch gesehen ist dieses Ziel erreichbar, nur die wärmetechnischen Anforderungen an das neue GFK-Fenster sind nicht eine alleinige Leistung des Rahmenmaterials GFK, auch die eingebaute Verglasung und deren Verbindung, sowie die Dichtungen spielen eine entscheidende Rolle. Statische Untersuchungen des Systems (Rahmen u. Glas) durch FEM-Analyse sind im Arbeitskapitel Problemerkennung dargestellt. Weitere Aspekte wie Isothermenverlauf, Dichtigkeit, Schall und Brandschutz werden untersucht.

Das innovationsträchtige Potenzial des GFK-Profils im Hochbau ist z. Z. immer noch ungenutzt, ist aber nach wie vor eines der attraktivsten Baumaterialien der Gegenwart und Zukunft. Faserverstärkter Kunststoff im Bauwesen ist heute nur eine Übergangstechnologie, bzw. es handelt sich um ein Substitutionsmaterial. Seine materialgerechten Tragwerks- und Konstruktionsformen sind zum Teil noch unbekannt, sein Einsatz am Bau erfolgt bisher nur als Nachahungsmaterial. Es werden Tragwerks- und Konstruktionsformen von bekannten und etablierten Materialtechnologien wie in Stahl- oder Betonbauweise kopiert und weiterverwendet. Bei dem Forschungsprojekt ist das Ziel, die GFK-Profile in einer zeitgemäßen Weise in Kombination mit einem neuartigen Isolierglas VIG durch Verklebung zu entwickeln. Die Erkenntnisse zeigen, dass eine Anwendbarkeit der Konzepte möglich ist. Es bleibt aufgrund der vielfältigen technischen Anforderungen sowie der konstruktiven Zusammenhänge noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten, da sowohl die Fenster-technik als auch das Material GFK eine enge Zusammenarbeit von Architekt, Ingenieur, Bauphysiker, Glas- und Fensterhersteller erfordern. Auch die Fensterhersteller müssen bereit sein, in Produktion und Umsetzung des neuen Konzepts zu investieren und eine Produktionslinie im System mit weiterzuentwickeln. Nachdem erste Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens auf der Initiative Zukunft BAU vorgestellt wurden, konnte ein reges Interesse der Fensterbranche verzeichnet werden. In einem Anschluss-Forschungsvorhaben sollen die in diesem Bericht aufgezeigten Einschränkungen und Probleme der einzelnen Systemkomponenten weiter erforscht und gelöst werden.

2 Rahmenentwicklung

2.1 Profilgeometrie

Ausgehend von den Ergebnissen des vorangegangenen Forschungsprojektes PROFAKU wurde die in diesem Projekt zuletzt entstandene Profilgeometrie als Ausgangsdesign verwendet. Dieses Basisprofil in Version 1.0 wurde zunächst um die nötige Möglichkeit des Öffnens ergänzt.

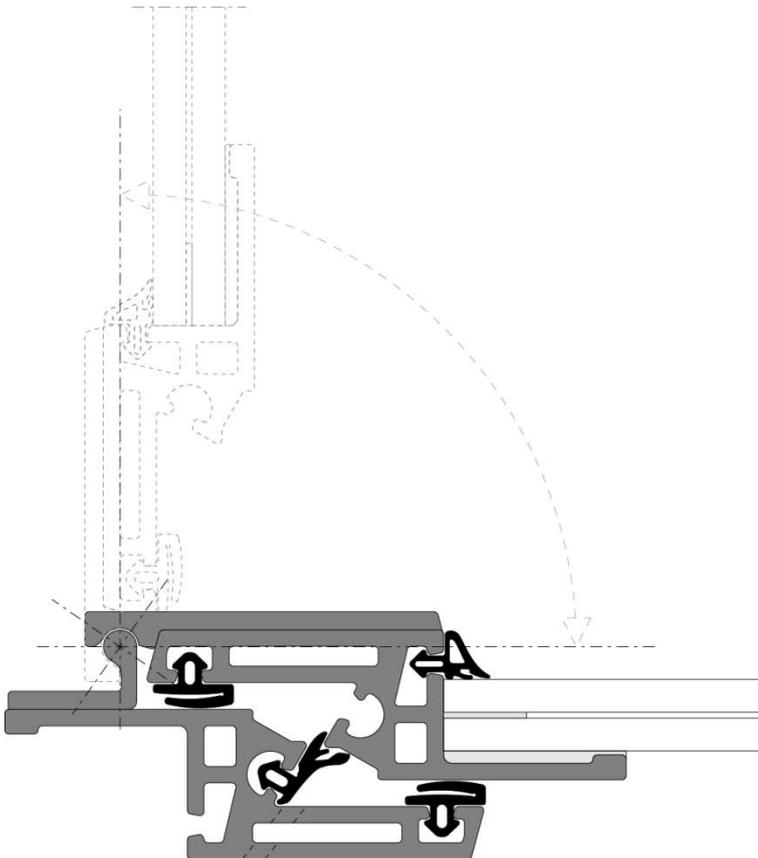


Abbildung 3: Profilgeometrie 1.0

Der Fokus der Betrachtung lag zunächst auf der nach außen öffnenden Klappöffnung, einer Öffnungsart, die zunehmend in Form von Senk-Klapp-Fenstern Verbreitung findet. Die auf dem Markt verwendeten Systeme setzen hier allerdings auf Scharniere, die in die Profile geschraubt werden. Diese Art der Befestigung wurde in diesem Forschungsvorhaben aus statischen Gründen ausgeschlossen. Wenn die Profile durch Bohrungen oder Schrauben perforiert und dadurch die Fasern unterbrochen würden, würde auf der gesamten Länge des Bauteils die Struktur durch diesen Punkt geschwächt.

Die ausgewählte Art der Scharnier-Befestigung und auch die Materialwahl orientierten sich eher in Richtung der aus anderen Industriezweigen bekannten Schnapp- und Klickverbindungen im gleichen Material wie der Rahmen, also Kunststoff bzw. GFK. Dies bringt den Vorteil, dass eine Beeinflussung der

bauphysikalischen Eigenschaften durch metallische Komponenten ausgeschlossen werden kann.

Die Profilgeometrien 1 - 3.2.2 zeigen die zunächst untersuchten Varianten. Die Bauteile die das Öffnen des Fensters ermöglichen, also die Scharniere, sind als Zusatzprofile zum eigentlichen Fenstersystem gedacht. Die Profile werden durch Verklebung an Blend- und Flügelrahmen befestigt. Die Verbindung der beiden Flügel wurde so konzipiert, dass im Montage-Fall ein fertiges Fenster ohne Verglasung auf der Baustelle eintrifft, montiert wird und die Verglasung abschließend eingebracht wird - ein in der Fensterbranche etablierter Vorgang, der keinen Anlass zur Überarbeitung bot.

Im Vergleich zu den Profilgeometrien, die direkt dem Projekt PROFAKU entstammen (Geometrie 1.0) wurden die Wandstärken der Geometrien 2.0 und 3.2.2 vergrößert. Diese Anpassung der Wandstärken erfolgte aus Gründen der besseren Produzierbarkeit mittels Pultrusion und auch einer Optimierung der Geometrie im Hinblick auf Lastaufnahmen.

Die Geometrie 3.2.2 hat sich als weniger geeignet zur weiteren Entwicklung mit Blick auf andere Öffnungsarten gezeigt. Hierzu wurde die grundsätzliche Ausformulierung der Geometrie zunächst in Frage gestellt und stark vereinfacht (siehe *Abbildung 4*).

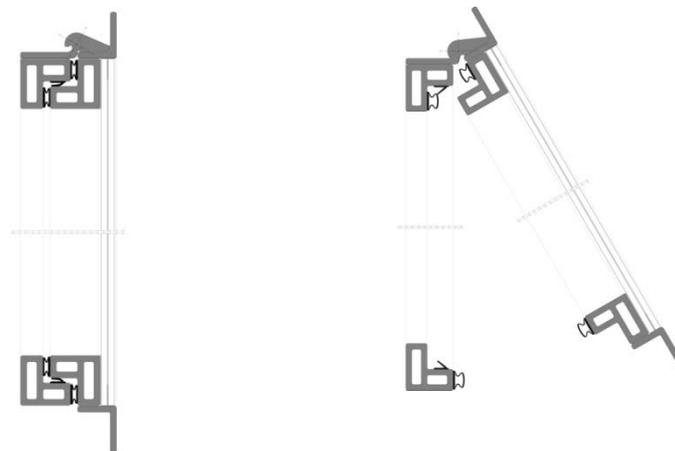


Abbildung 4: Profilgeometrie 3.2.4

Ebenfalls ist die Dichtung von einer in der Herstellung von Kunststofffenstern üblichen eingeklemmten Dichtung hin zu einer aufgeklebten Dichtung verändert worden, was die Geometrie um ein Vielfaches vereinfacht hat.

Die Öffnungsart des Klappens wurde hier zunächst als Basis-Öffnungs-Art fokussiert. Ebenfalls wurde das Thema der Offenhaltung / Lagesicherung des in geöffnetem Zustand befindlichen Flügelrahmens berücksichtigt.

Zu diesem Zweck wurden sogenannte Ausstellzylinder, die auf Basis von hydraulischem Druck in einem geschlossenen System ein bestimmtes Gewicht tragen können, ausgewählt. Somit kann das Fenster in beliebigen Winkeln offen gehalten werden. Die Art des Beschlages wurde rein konzeptionell von der Geometrie 3.1 übernommen. Die Befestigung der Scharniere am Profil sollte ebenfalls durch

Verklebung der beiden GFK-Profile erfolgen. Die Entwicklungsschritte der Geometrie basieren auf Auseinandersetzung mit der statischen Belastbarkeit und dem bauphysikalischen Verhalten des Systems.

Die parallel zunehmenden Erkenntnisse zur Technologie des Klebens von faserverstärkten Kunststoffen bestärkten die Entscheidung, auf dem Markt zugelassene Beschlagsysteme zu verwenden, um weitere Öffnungsarten zu untersuchen.

Die Öffnungsart des Parallel-Ausstellfensters wurde als eine Alternative zum Klappfenster in die Untersuchungen einbezogen. Das mittelfristige Ziel, einen Prototypen auf der BAU 2013 vorzustellen, wurde zum Anlass und zur Bestärkung der Entscheidung genommen, dieses Öffnungsprinzip für den Prototypen zu verwenden.

Die Ergebnisse der Recherche über Beschlagsysteme wurden Grundlage für die Auswahl und schlussendlich auch Bestellung der Beschläge. Die Beschlagsysteme finden in gängigen Fensterprofilen in der sogenannten „Euro-Nut“ Platz. Diese umlaufende Nut im Profil wurde unter Berücksichtigung der Scheren-Abmessung in die Geometrie eingearbeitet.

Das nun vorliegende sehr kompakte Profil, nach wie vor Blend- und Flügelrahmen aus gleicher Geometrie bestehend, wurde zur FEM-Berechnung und zur Prüfung bzgl. fertigungstechnischer Toleranzen freigegeben.

Aus Gründen der erhöhten Stabilität und der besseren Pultrudierbarkeit wurde die Geometrie nochmals leicht verändert. Vor allem wurden im Zuge dieser Optimierung die Wandstärken, Radien und Ausformulierung der Hohlräume korrigiert und verändert.

Im Rahmen der Entwicklung der Geometrien 3.2.5 wurde auch das Thema des Verschlusses untersucht. Dies wurde jedoch zunächst im Hinblick auf die Zwischenpräsentation des Prototypen auf der BAU-Messe nicht weiter verfolgt. Konzeptionelle Ansätze hierfür finden sich in der Geometrie 3.2.5.

Die Geometrie 3.2.7 war von Ihren statischen Eigenschaften sowie denen der Pultrudierbarkeit her ausreichend geeignet für eine Verwendung als Prototypen-Geometrie für den Messe-Auftritt. Im Nachgang der Messe entstanden, basierend auf weiteren Erkenntnissen aus Pultrusion, FEM-Berechnung und Folierungsversuchen sowie der Zulassungssituation der VIG-Verglasung, Varianten der Geometrie 3.2.8.

Zunächst wurden die Radien der Geometrie korrigiert, um einen besseren Werkzeugdurchgang zu ermöglichen. Die bereits erfolgten Überlegungen bzgl. Verschluss und Griff führten zu der Untersuchung, bestimmte Bereiche der Geometrie durch außen aufgelegte Matten aus Glasfaser zu verstärken. Diese Verstärkung führt zur Möglichkeit, diese Bereiche durch Bohrungen zu perforieren ohne große Einbußen in der Belastbarkeit befürchten zu müssen. Diese Bohrungen sind erforderlich, um eine offensichtlich notwendige Verbindung des Griffes mit dem Scharnier zu ermöglichen.

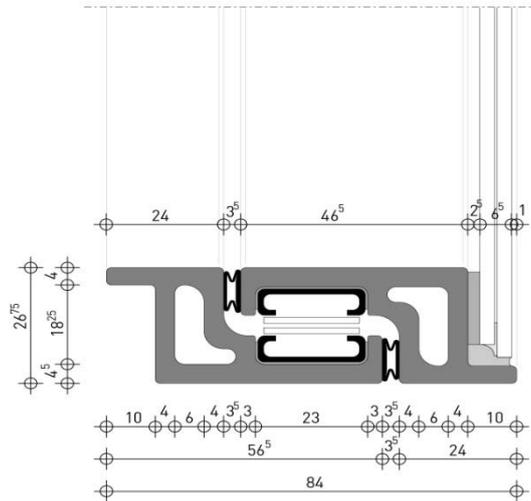
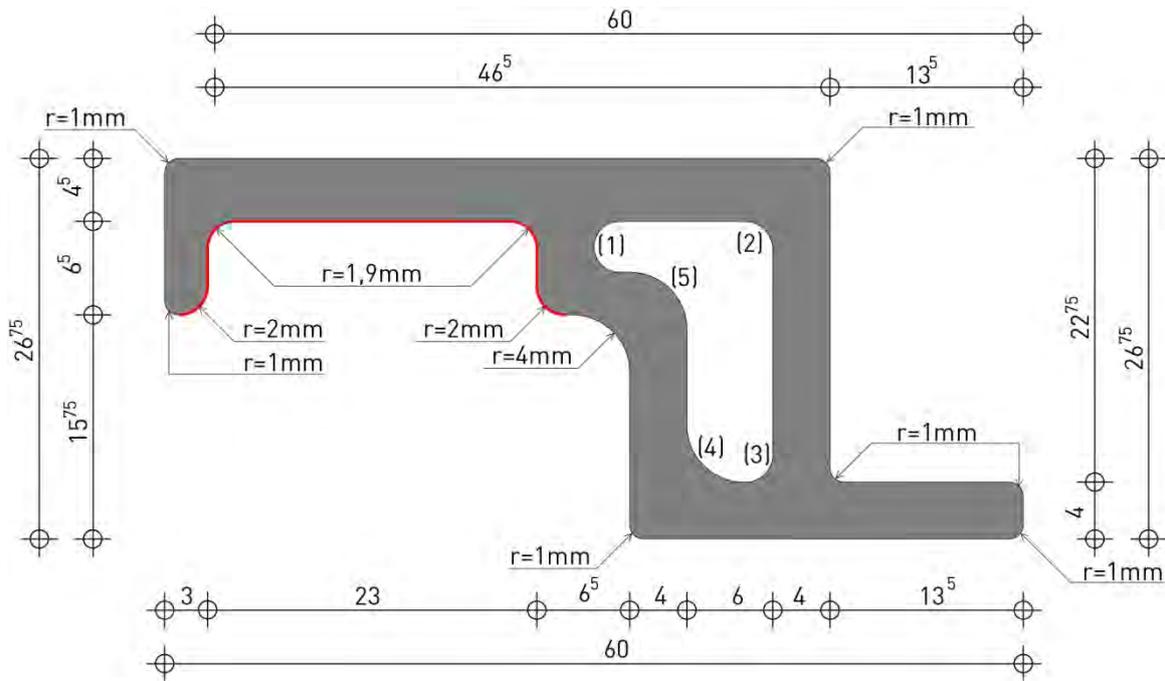


Abbildung 5: Profilgeometrie 3.2.8

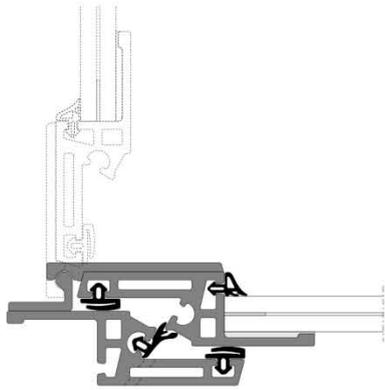
Ebenfalls wurde der für die Glasauflage vorgesehene Steg für die Aufnahme von Dreifach-Verglasung verlängert. Dies erschien notwendig, da sich die VIG-Verglasung noch nicht auf dem Stand einer Zulassung für den deutschen Bausektor befand. Hier wurde die Möglichkeit in Erwägung gezogen, das hocheffiziente ULTRASLIM-Profil auch zur Verwendung mit Dreifach-Verglasung umzugestalten. Dies hätte den Vorteil, dass dieses System für die bereits etablierte Dreifach-Verglasung ebenso gut geeignet wäre wie für das zukunftssträchtige VIG. Die Geometrien 3.2.8 & 3.2.9 als Nachfolger der Prototypen-Geometrie wurden im Rahmen der statischen Analyse untersucht.



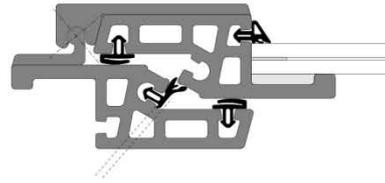
Kernradien:
 (1): r=1,8mm, (2): r=2mm, (3): r=1,8mm, (4): r=4mm, (5): r=4mm
 — Lage Matte

Abbildung 6: Profilgeometrie 3.2.9

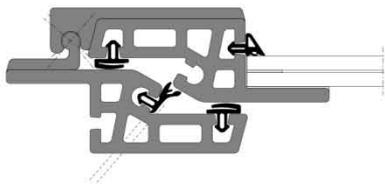
Die Ergebnisse hierzu finden sich, wie auch die der anderen untersuchten Profile, im Kapitel der FEM-Berechnung. Es folgt eine tabellarische Kurzübersicht der Profilentwicklung im Forschungsvorhaben ULTRASLIM.



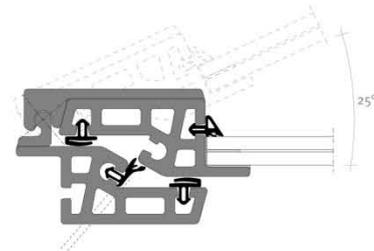
Profilgeometrie 0.1



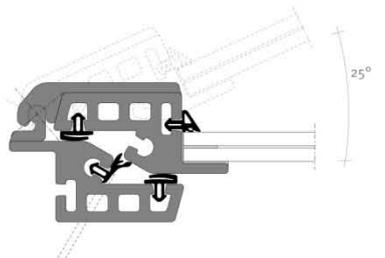
Profilgeometrie 1.0



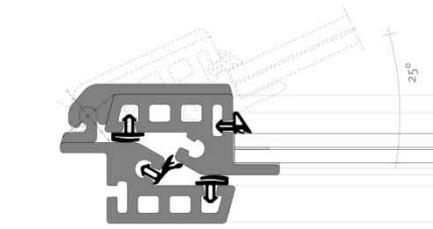
Profilgeometrie 2.0



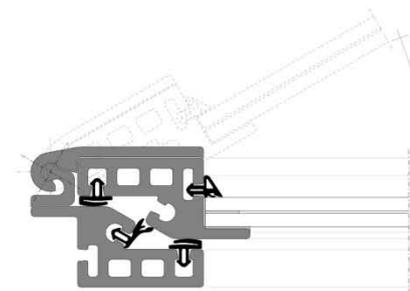
Profilgeometrie 3.0



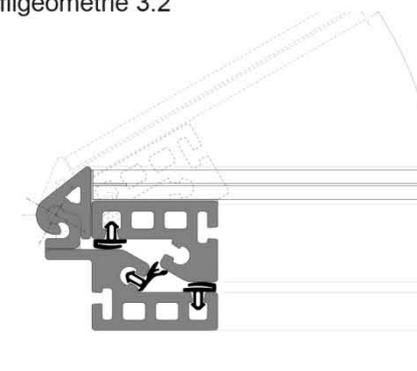
Profilgeometrie 3.1



Profilgeometrie 3.2



Profilgeometrie 3.2.1



Profilgeometrie 3.2.2

2.2 FEM Analyse der Profilgeometrien

Mit den aus dem vorhergehenden Kapitel formulierten Vorgaben wurde im ersten Projektjahr ein Pultrusionswerkzeug angefertigt und Profile damit hergestellt. Diese Profile wurden für ein Demonstrationsbauteil verwendet und auf der Bau 2013 der Öffentlichkeit vorgestellt (*siehe auch Kapitel 6.2.2*). Aus den Erfahrungen mit dem Demonstrator ergaben sich Hinweise für eine Änderung und Anpassung der Profilgeometrie. In *Abbildung 7* sind das ursprünglich gefertigte und das geänderte Profil gegenübergestellt. Die weiße Linie stellt die ursprüngliche Geometrie, die orange gefärbte Linie die weiter entwickelte Geometrie dar. Beide Profilgeometrien wurde im Faserinstitut Bremen gefertigt.

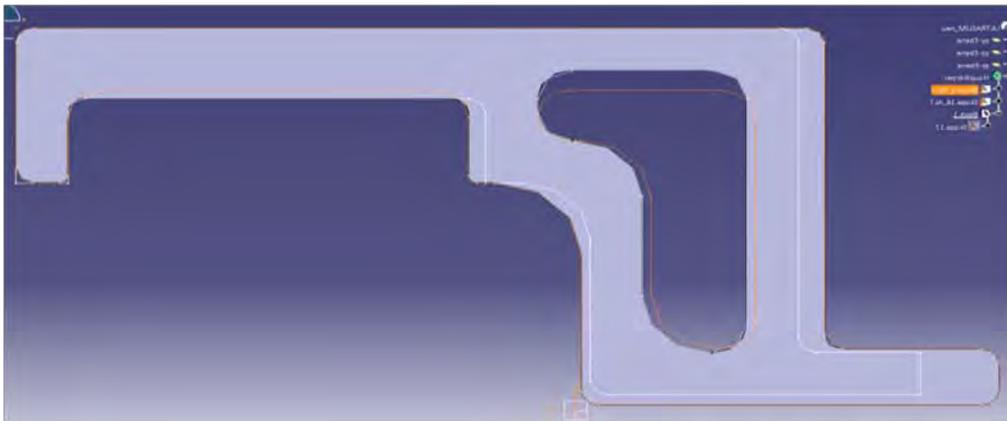


Abbildung 7: Gegenüberstellung der alten und neuen Profilgeometrie

Die beiden entwickelten Profilgeometrien wurden mittels einer FE Analyse hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit überprüft. Es wurden folgende Lastfälle für die Dimensionierung untersucht:

- Belastung des Fensterrahmens durch Eigengewicht der Glasscheibe
- Belastung durch eine Windlast
- Überlagerung des Lastfalls 1 und 2

2.2.1 Beschreibung des Modells

Ein Fensterprofilabschnitt der Länge 70 mm wird als Finites Elemente Modell abgebildet. Die Lagerung des Modells erfolgt im Abschnitt der Metallinserts ('feste Einspannung') (*Abbildung 8*).

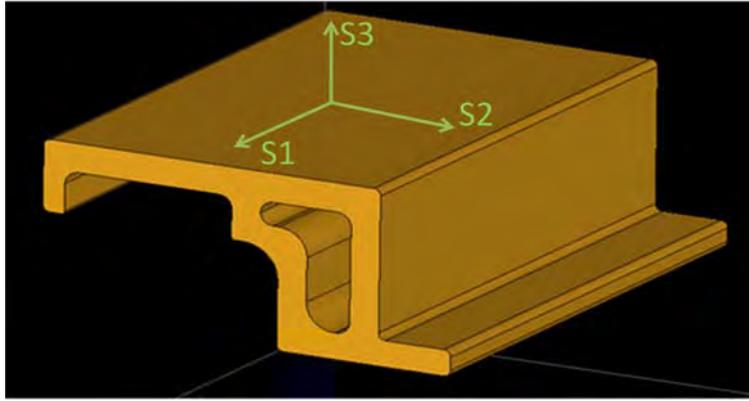


Abbildung 8: Fensterrahmenprofil

Dieses Modell weist 33.810 Volumenelemente auf. Die mittlere Kantenlänge beträgt 1mm (Abbildung 9).

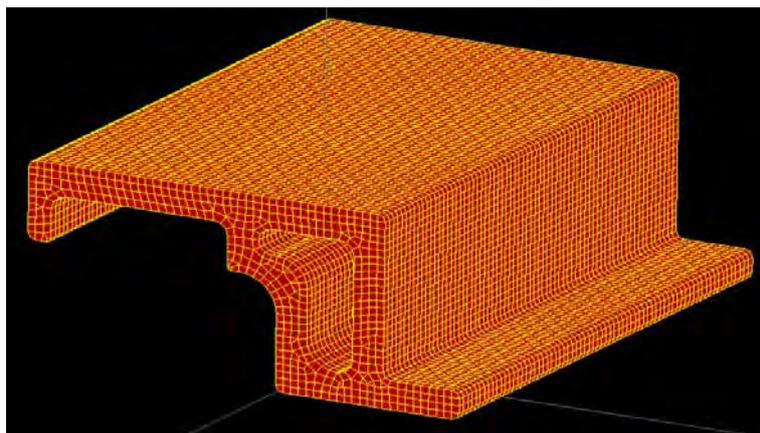


Abbildung 9: Diskretisierung des Volumenmodells

Die in der Simulation berücksichtigten Materialeigenschaften für das pultrudierte Rahmenmaterial sind der *Tabelle 1* zu entnehmen. Die Langzeitwerte für die Steifigkeit und Festigkeit wurden mit entsprechenden Verschwächungsbeiwerten (z.B. Alterung) der Literatur entnommen und müssen hinsichtlich der erreichbaren Fertigungsqualität (Faservolumengehalt, Faserondulationen, Eigenspannungen etc.) verifiziert werden. Es wurden bewusst konservative niedrige Werte angenommen, um eventuelle Einflüsse durch Matrixadditive für verbesserte Brandschutzeigenschaften zu berücksichtigen.

Tabelle 1: Kennwerte für pultrudiertes GFK Profil

Name	GFK_pul			
Material	Elastic			
Type	Orthotropic			
Young modulus	23e3	8.5e3	8.5e3	N/mm ²
Poisson ratio	0.23	0.35	0.23	ratio
Mass density	2e3			kg/m ³
<input type="checkbox"/> Thermal expans. coeff.	0	0	0	1/deg.K
Shear Modulus	3e3	3e3	3e3	N/mm ²
<input checked="" type="checkbox"/> Tensile Strength	75	10	10	N/mm ²
<input checked="" type="checkbox"/> Compressive Strength	75	30	30	N/mm ²
<input checked="" type="checkbox"/> Shear Strength	8	8	8	N/mm ²

2.2.2 Lastfall 1 - Hauptlast: Eigengewicht der Glasscheibe

Das Masse der Glasscheibe wird mit 27 kg angesetzt. Sie wird von der unteren Fensterrahmenseite auf einer Länge von 1.126 mm aufgenommen (Streckenlast 0.235 N/ mm). Bezogen auf die Modelllänge von 70 mm beträgt der auf das Modell entfallende Anteil abgerundet 16 N. Dieser Anteil des Glaseigengewichts wird im Schwerpunkt des unteren Profilrands (Tragbereich) als Einzellast angesetzt. (Diese Vorgehensweise wird allein aus Sicherheitsgründen gewählt - sie führt grundsätzlich zu einer höheren Beanspruchung des Tragbereichs als der Ansatz der errechneten Streckenlast, s. *Abbildung 10*).

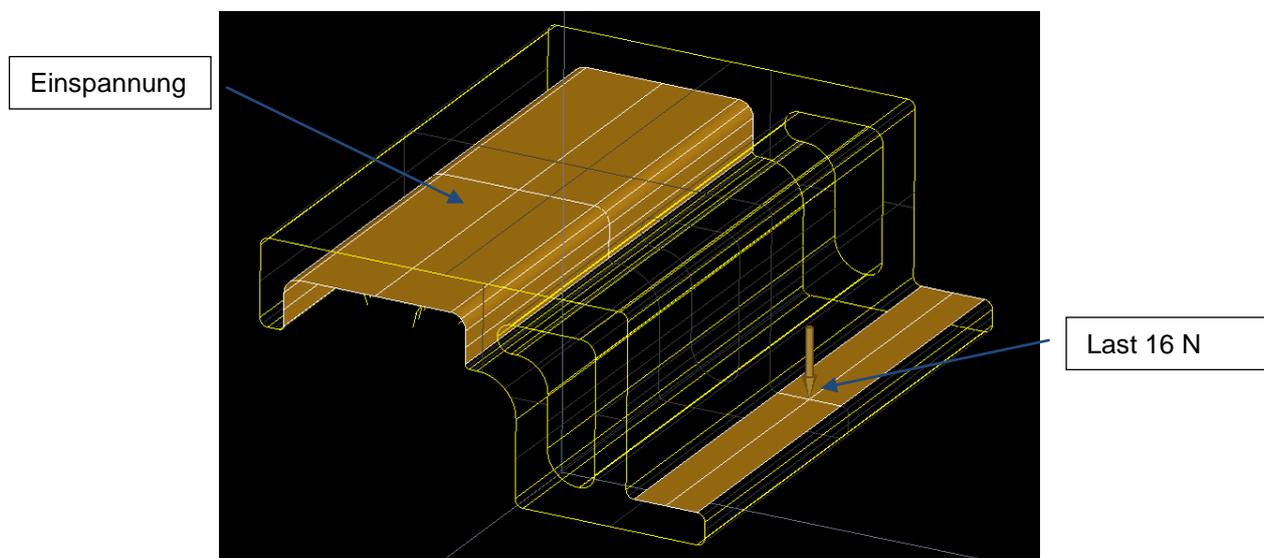
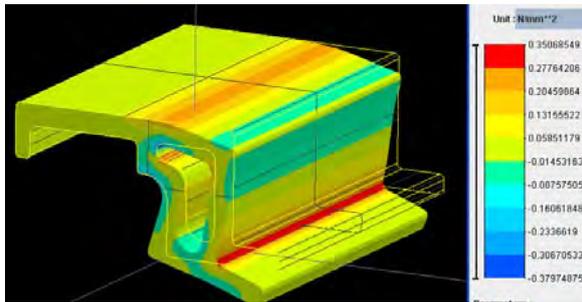


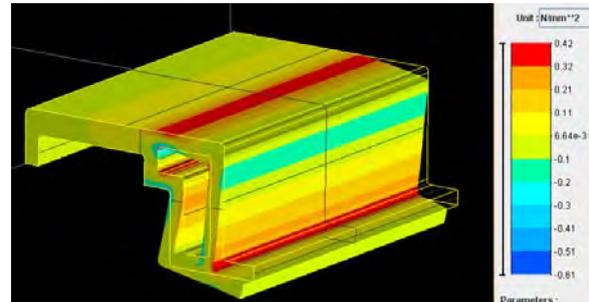
Abbildung 10: Lasteinleitung in das Profil

Die Ergebnisse für den 1. Lastfall können in den nachfolgenden Abbildung 11 bis Abbildung 14 abgelesen werden. Die sich ergebenden Spannungen sind farblich

dargestellt. Das Koordinatensystem ist der *Abbildung 8* zu entnehmen. Zur besseren Vergleichbarkeit ist das in 2012 gefertigte Fensterprofil jeweils rechts, das Fensterprofil 2013 jeweils links dargestellt.

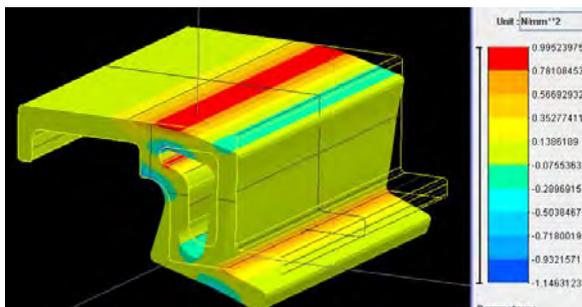


Profil 2013: max 0,35MPa

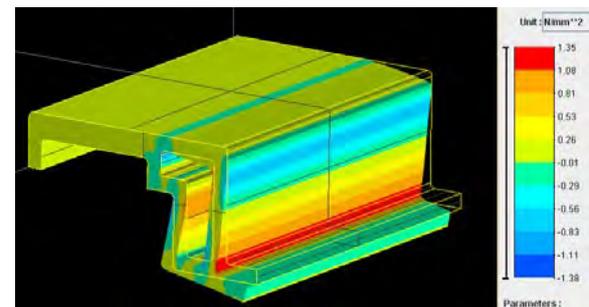


Profil 2012: max 0,42 MPa

Abbildung 11: Normalspannung in Faserrichtung (S1), Längsrichtung des FE- Modells, Lastfall 1

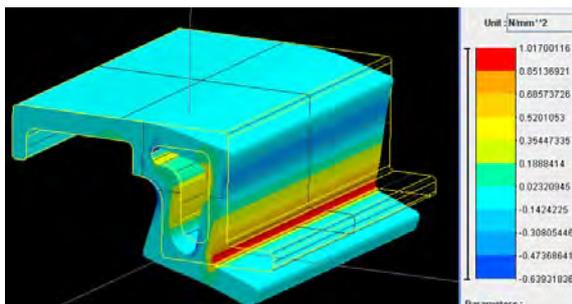


Profil 2013: max 0,99 MPa

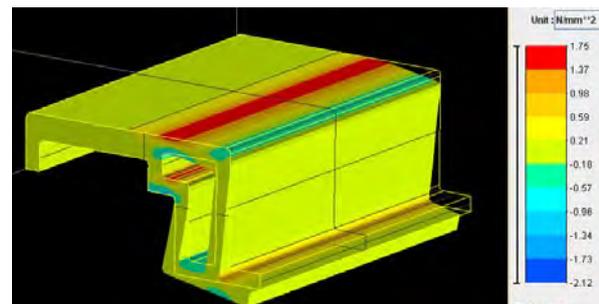


Profil 2012: max 1,39 MPa

Abbildung 12: Normalspannung senkrecht zur Faserrichtung (S2), Lastfall 1

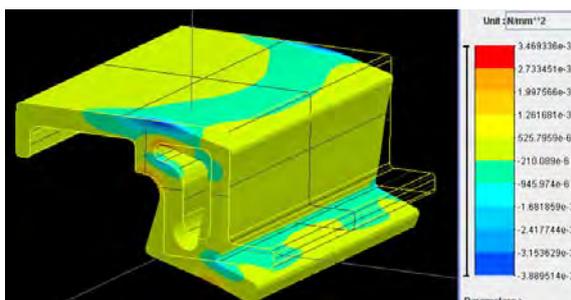


Profil 2013: max -1.0MPa

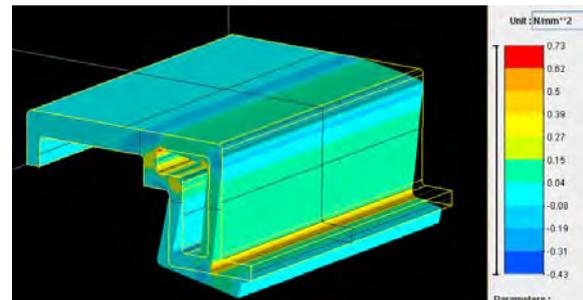


Profil 2012: -2,12 MPa

Abbildung 13 Normalspannung senkrecht zur S1/S2 – Ebene (out of plane) (S3), Lastfall 1



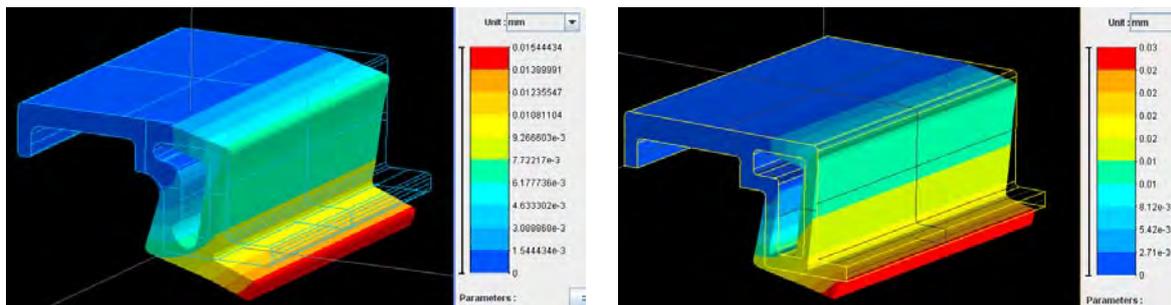
Profil 2013: max 0.003 MPa



Profil 2012: max 0,73 MPa

Abbildung 14: Schubspannung (S13), Lastfall 1

Durch den Lastfall 1 ergibt sich für das überarbeitete Profil eine Deformation (Absenkung) des Fensterrahmens von 0,015 mm (links) gegenüber der Deformation von 0,3 mm des ersten Profils (rechts) (*Abbildung 15*).



Profil 2013: 0,015 mm

Profil 2012: 0,03 mm

Abbildung 15: Maximale Profildeformationen Lastfall 1

Zusammenfassend entsteht für beide Profile durch die Belastung infolge des Eigengewichts der Glasscheibe kein kritischer Belastungszustand. Die Funktion des Fensters ist insofern ungefährdet.

2.2.3 Lastfall 2 - Zusatzlast: Windlast auf Glasscheibe

Zur Berechnung des Belastungszustandes durch Windlasten wurde folgendes Vorgehen gewählt. In einem Gesamtmodell wurde das komplette Fenster modelliert; Schalenelemente repräsentieren die Glasscheibe, Balkenelemente den Fensterrahmen.

Die Lagerung Glasfläche/ Fensterrahmen wurde als 'feste Einspannung' angesetzt. Diese Lagerungsart wird wiederum allein aus Sicherheitsgründen gewählt, weil sie zur größtmöglichen Belastung der Fensterrahmen bzw. zu den größtmöglichen Schnittlasten Glasscheibe/ Fensterrahmen führt.

Auf dieses Ersatzmodell, genau: die Glasscheibe, wurde eine Flächenlast aufgebracht, welche sich aus den von FH Dortmund übermittelten Daten ergibt. Es wurde hierbei der Extremfall für ein Fenster in einer Gebäudehöhe von 100 m über Gelände herangezogen (*Tabelle 2*).

Tabelle 2: Windlasten bei einer Gebäudehöhe über Gelände, über 100 m

Windgeschwindigkeit	45,6 m/s
Staudruck	1,3 kN/m ²
Aerodynamischer Druckbeiwert	cp = 1,2
Winddruck Baukörper allgemein	1,56 kN/m ²

An der unteren Rahmenseite treten die max. Normalkraft und das max. Moment in der Seitenmitte auf. Der Verlauf der Schnittlasten (*Abbildungen 12 und 13*) wird zunächst jeweils ermittelt und anschließend für die Nachrechnung des detaillierten Profilmodells verwendet.

Das detaillierte Profilmodell soll den Mittenabschnitt der Rahmenseite repräsentieren; demzufolge sind die Größtwerte der Schnittlasten nach Betrag und Richtung - Normalkraft 65 N und Moment 11 Nm - an den beiden Enden/ Stirnseiten des Modells anzutragen und entsprechend in der Rechnung zu berücksichtigen.

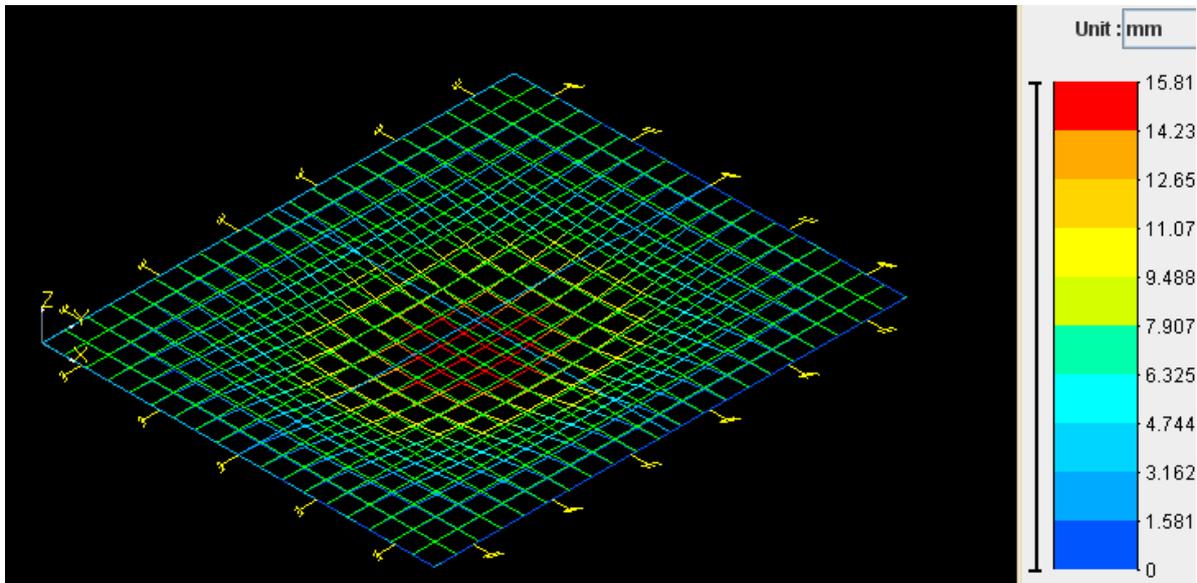


Abbildung 16: Durchbiegung des Fensters, max. 15.8mm

Die *Abbildung 17* und *Abbildung 18* stellen die Ergebnisse der Analyse des Gesamtmodells dar.

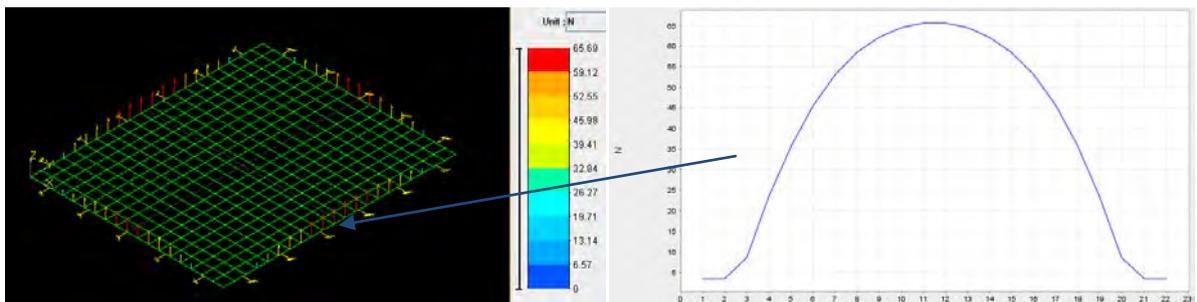


Abbildung 17: Darstellung der Normalkräfte in der Einspannung, Normalkraftverlauf der unteren Rahmenseite, Extremwert mittig mit 65N

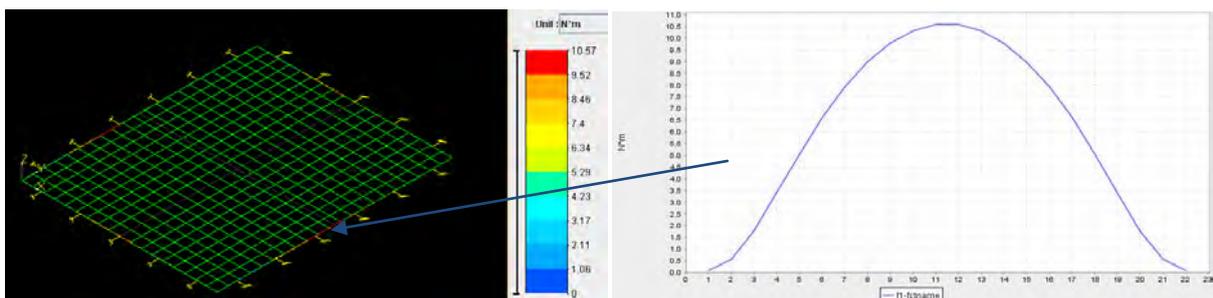


Abbildung 18: Darstellung der Momente in der Einspannung, Momentenverlauf der unteren Rahmenseite, Extremwert mittig mit 11Nm

Aus dieser Analyse wurden die besagten Schnittlasten extrahiert und zur Berechnung des Lastfalls 2 auf den Stirnseiten des detaillierten Profilmodells aufgeprägt (Abbildung 19).

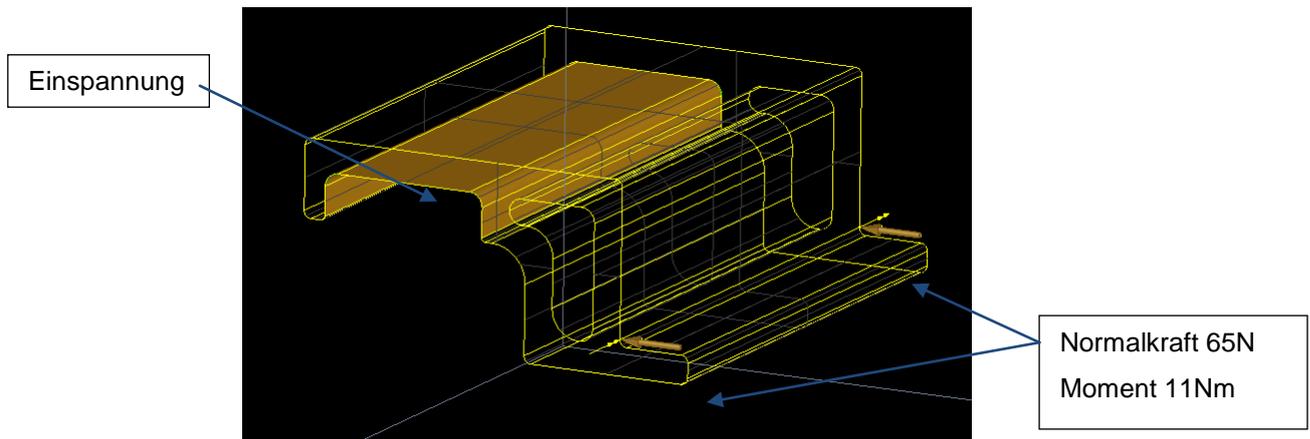
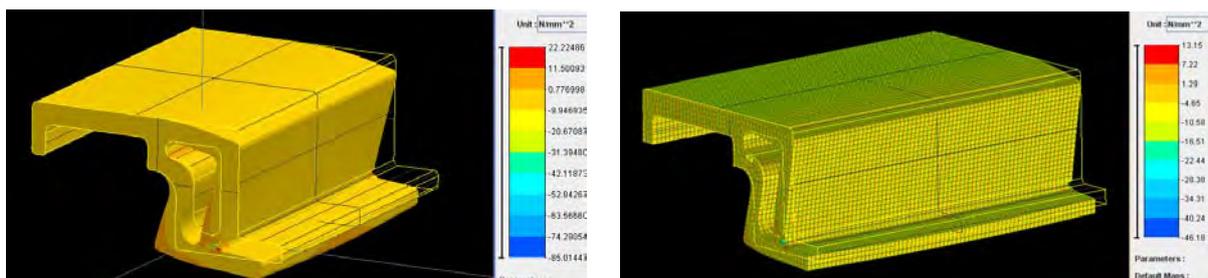


Abbildung 19: Schnittlasten für Lastfall 2

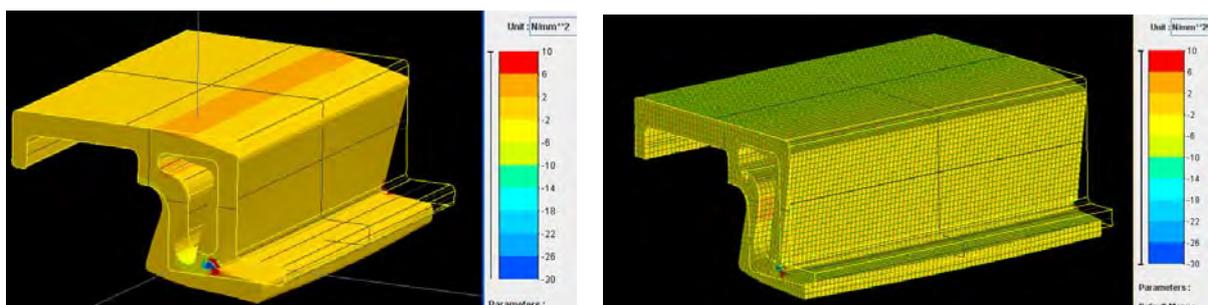
Diese Lasten führen zu folgender Beanspruchung des Fensterrahmens auf halber Länge der unteren Seite (Abbildung 20 bis Abbildung 23). Zur besseren Vergleichbarkeit sind auch hier das in 2012 gefertigte Fensterprofil jeweils rechts, das Fensterprofil 2013 jeweils links dargestellt.



Profil 2013: -74 zu 11,5 MPa

Profil 2012: -46 MPa zu 13,5 MPa

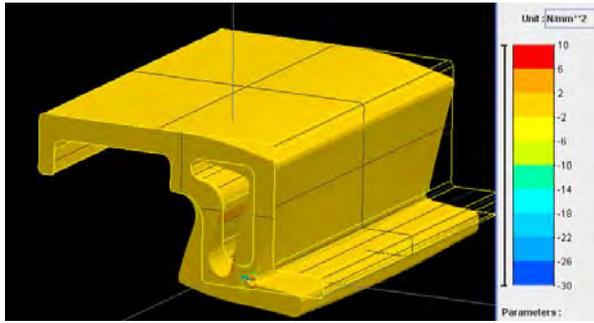
Abbildung 20: Normalspannung in Faserrichtung, Lastfall 2



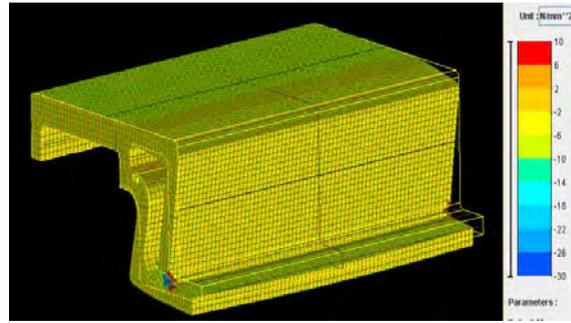
Profil 2013: -30 MPa zu 10 MPa

Profil 2012: -30 MPa zu 10 MPa

Abbildung 21: Normalspannung quer zur Faser, Lastfall 2

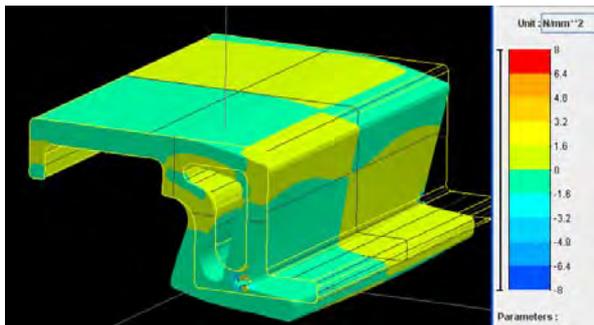


Profil 2013: -26 MPa zu 10 MPa

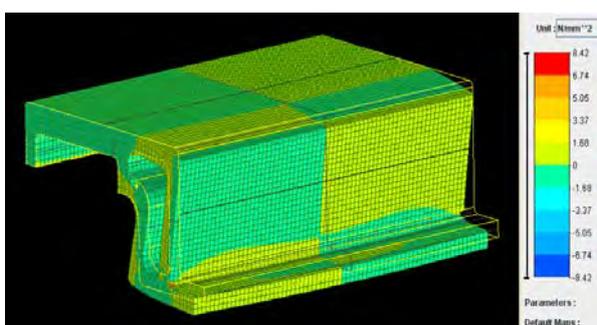


Profil 2012: -30 MPa zu 10 MPa

Abbildung 22: Spannung out of plane (S3), Lastfall 2

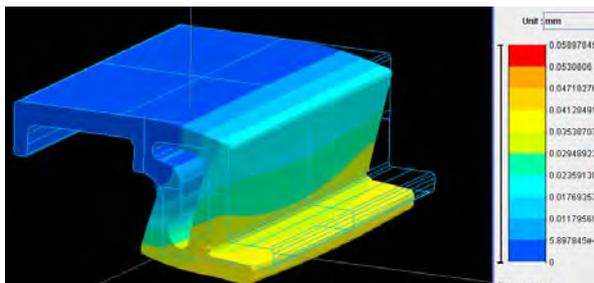


Profil 2013: -7 MPa zu 6,4 MPa

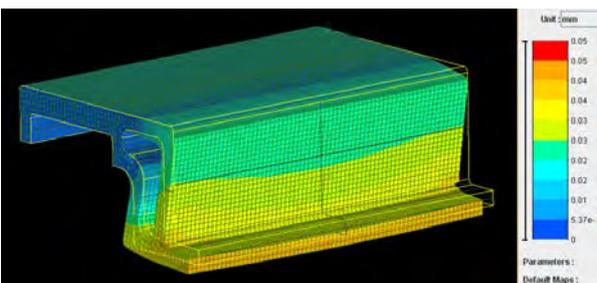


Profil 2012: -6 MPa zu 6 MPa

Abbildung 23: Normalspannung Schub (S13), Lastfall 2



Profil 2013: 0,04 mm



Profil 2012: 0,05 mm

Abbildung 24: Maximale Deformationen, Lastfall 2

Zusammenfassend entsteht durch die auf die Glasscheibe rechnerisch angesetzte Windlast ebenfalls kein kritischer Belastungszustand für beide Profile, welcher zu einer Gefährdung der Funktion des Fensters führt.

2.2.4 Lastfall 3: Überlagerung der Hauptlast und der Zusatzlast

Die Lasten durch Eigengewicht der Glasscheibe und Windlast wurden für diesen Fall überlagert. Die dadurch im Profil hervorgerufenen Normalspannungen, Schubspannungen sowie die Verformungen sind der *Abbildung 25 bis Abbildung 29* zu entnehmen.

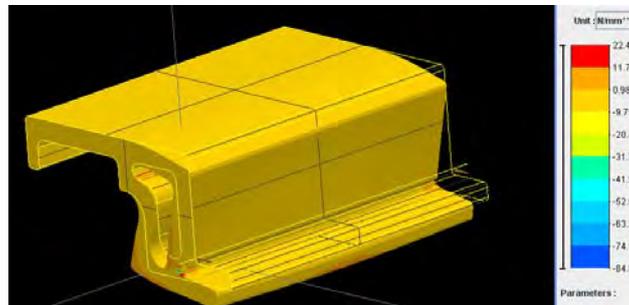


Abbildung 25: Normalspannung in Faserrichtung (S1) -35MPa +22,4MPa, Lastfall 3

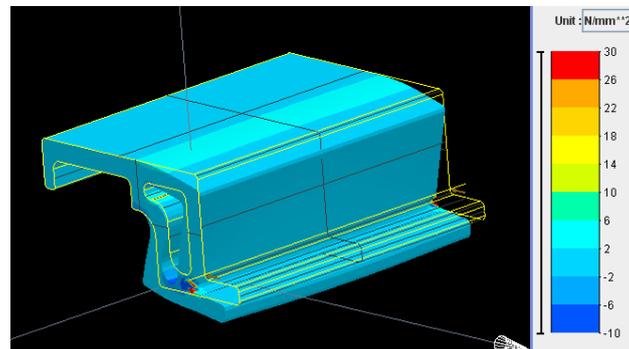


Abbildung 26: Normalspannung quer zur Faserrichtung (S2) -10MPa +30MPa, Lastfall 3

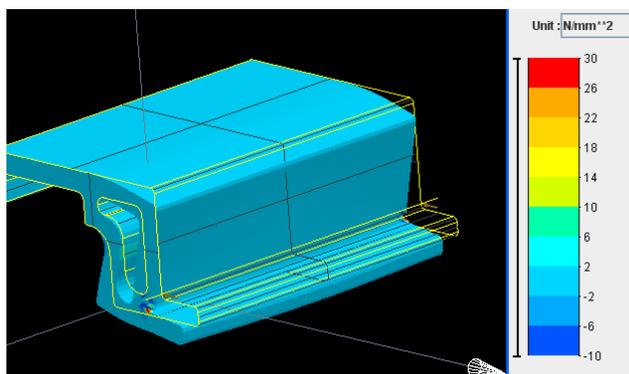


Abbildung 27: Spannung out of plane (S3) -10MPa +30MPa, Lastfall 3

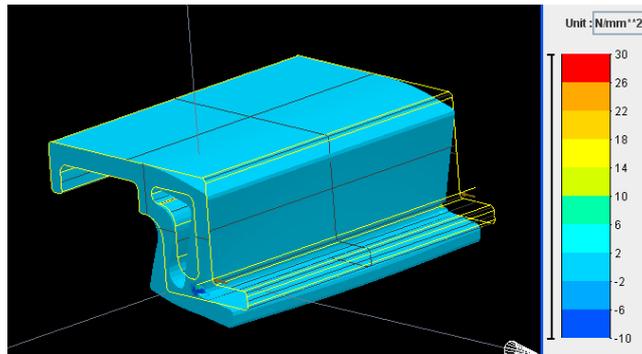


Abbildung 28: Schubspannung (S12) -10MPa +6MPa, Lastfall 3

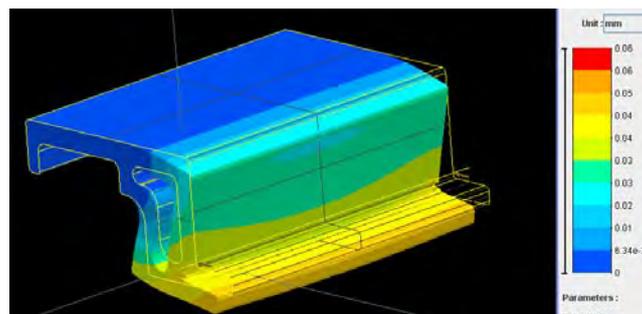


Abbildung 29: Maximale Profildeformation Lastfall 3: 0,06 mm (qualitativ, überhöht dargestellt)

Durch die Überlagerung von Gewicht- und Windlast entstehen keine kritischen Belastungszustände im Profil. Die mechanische Funktionalität des Fensterrahmens ist somit gegeben.

2.3 Verglasung

Bei der im ULTRASLIM-Fenstersystem eingesetzten Vakuumisolierglas-Scheibe handelt es sich um das Produkt Spacia der Firma Pilkington. Im Jahr 2011 gewann diese Verglasung mit einem damals angegebenen U-Wert von $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ den World Architecture News Award. Dieser U-Wert entspricht dem eines 2-fach Wärmeschutzfensters, dies aber bei einer Systemstärke von 6,5 mm verglichen mit typischerweise 24 mm bei 2-fach Wärmeschutzfenstern. 2013 zertifizierte das IFT Rosenheim der Spacia-Verglasung dann einen U-Wert von $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dies ist nicht in einer technischen Verbesserung der Scheibe begründet, sondern in der exakteren Messung sowie den Bestimmungsverfahren der deutschen im Gegensatz zur japanischen Norm.

Die Spacia-Verglasung wird in Japan seit mehr als 10 Jahren erfolgreich eingesetzt und besteht aus zwei ca. 3 mm starken Glasscheiben mit einem nur 0,2 mm breiten evakuierten Scheibenzwischenraum (siehe *Abbildung 30*). Um ein Verbiegen der Scheiben unter dem äußeren Luftdruck zu verhindern, sind kleine Stahlkugeln (Microspacers) in einem Raster von 2 cm gesetzt. Diese Abstandshalter sind jedoch nur aus der Nähe oder vor einem weißen Hintergrund deutlich wahrnehmbar.

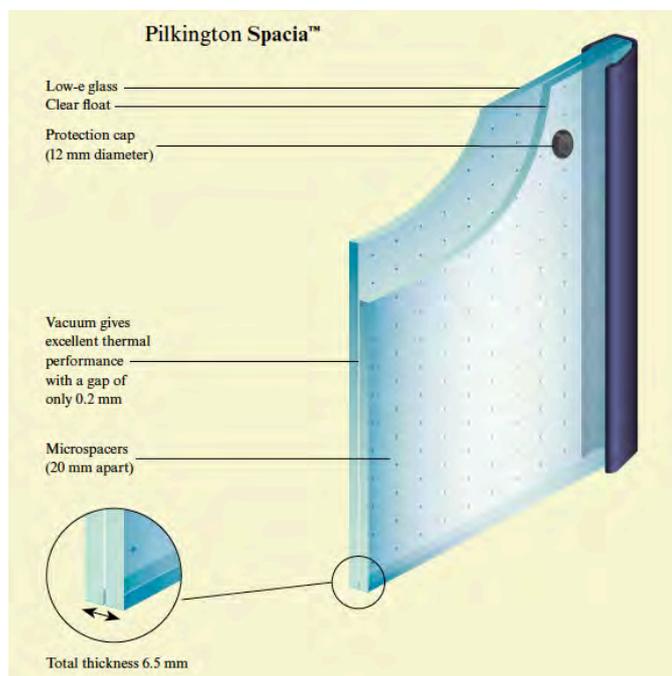


Abbildung 30: Aufbau der Spacia-Verglasung (Quelle: Pilkington)

Die Firma Pilkington stellt zukünftige Verbesserungen dieses Wertes in Aussicht, der für eine derartig dünne Verglasung zwar schon ausgezeichnet ist, aber noch nicht an 3-fach Wärmeschutzverglasungen im Passivhausstandard heranreicht. Das ULTRASLIM-Fenstersystem sollte daher so ausgelegt sein, dass es Scheiben variabler Stärke - und damit auch zukünftige Weiterentwicklungen - aufnehmen kann. So kann bei bereits eingebauten ULTRASLIM-Fenstern unter Beibehaltung des Rahmens später einfach und ohne aufwändige Baumaßnahmen eine bessere VIG-Scheibe eingesetzt werden.

2.4 Öffnungsarten

Die zu untersuchenden Öffnungsarten wurden nach Recherche und Analyse der vorhandenen, bekannten und etablierten Systemen auf zunächst zwei wesentliche Typen eingegrenzt.

Diese beiden Öffnungsarten, das Senk-Klapp-Fenster und das Parallel-Ausstellfenster (siehe *Abbildung 31*), wurden dann näher auf ihre speziellen Anforderungen, Vor- und Nachteile hin untersucht. Die Analyse ergab, dass sich jede der beiden Öffnungsarten für einen bestimmten großen Bereich der Anwendung im Bausektor eignet.

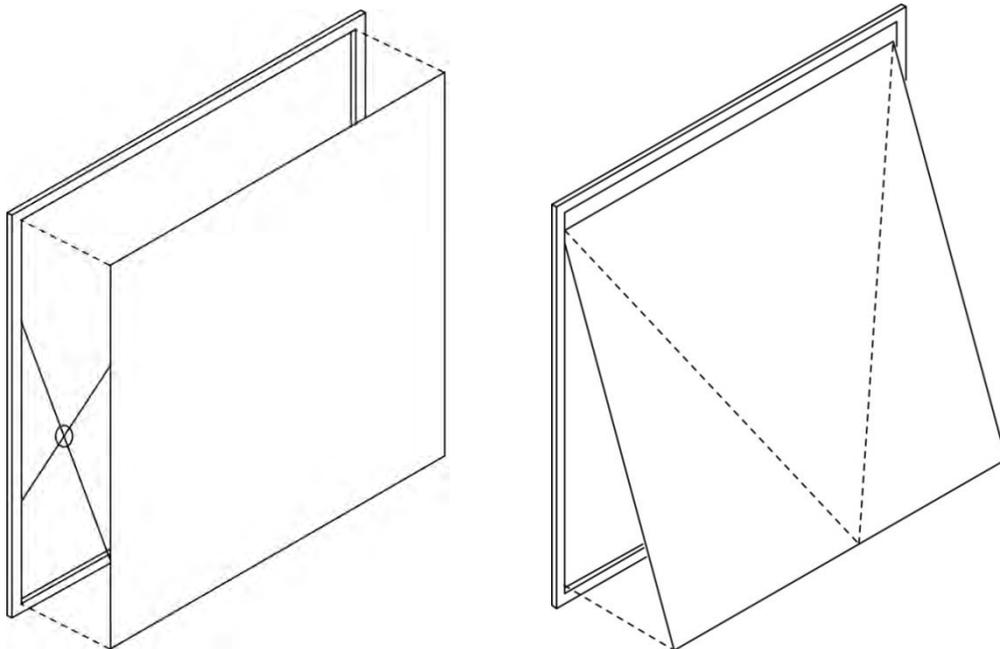


Abbildung 31: Senk-Klapp-Fenster und Parallel-Ausstell-Fenster Schemazeichnung



Abbildung 32: Senk-Klapp-Mechanik

Das Senk-Klapp-Fenster und dessen Weiterentwicklung, das Senk-Klapp-Wendefenster, sind geeignet für den Einsatz im Wohnungsbau. Durch den nach außen öffnenden Flügel kann eine Lüftung trotz Witterung erfolgen. Die Öffnungsrichtung sorgt gleichzeitig für eine Sogwirkung, welche die Belüftung des Raumes unterstützt und effektiver macht.

Das Senk-Klapp-Wende-Fenster ermöglicht sogar zusätzlich ein unkritisches Reinigen des Flügelrahmens und der außen liegenden Glasscheibe von innen. Die Wende-Funktion ist ebenfalls im Schadens- oder Reparaturfall von großem Vorteil für den Endverbraucher.

Die Parallel-Ausstell-Fenster (siehe *Abbildung 33*) sind geeignet für den Bereich der gewerblich genutzten Immobilien. Hier werden die Anforderungen an die Möglichkeit der manuellen Raumlüftung ebenfalls, wenn nicht sogar noch besser, erfüllt. Der parallel zur Fassade ausgestellte Flügel ermöglicht einen starken „Kamineffekt“ (Venturi-Effekt), der die Raumluft aus dem Raum saugt und so einen sehr effektiven Luftaustausch ermöglicht. Ebenfalls ist speziell diese Öffnungsart motorisch angetrieben bereits auf dem Markt vorhanden und kann, unter der Voraussetzung der Anpassung an Größe und Erscheinungsbild der Motorisierung, in das System integriert werden, so dass selbst in hochautomatisierten Gebäuden mit Zwangslüftung diese Öffnungsart verbreitet ist und das neue System dies auch sein könnte.



Abbildung 33: Parallel-Ausstell-Mechanik der Firma Cotswold



Abbildung 34: Visualisierung zweier Einbausituationen

Für den Messe-Prototyp ist schlussendlich der Parallel-Ausstell-Beschlag ausgewählt worden. Dieser bot zum Zeitpunkt der Entscheidung einige Vorteile gegenüber dem Senk-Klapp-Beschlag, die der Funktionalität des Prototyps und dem Fortschritt der Geometrie-Entwicklung geschuldet sind. So ist ein Parallel-Ausstellfenster auch ohne „Offenhaltung“, Griff und Verschluss als konzeptionelles System, ersichtlich und seine Funktionsweise erschließt sich dem Betrachter sofort. Ebenfalls hat die schnellere Verfügbarkeit und bessere Dokumentation seitens der Hersteller des Beschlages zum Entschluss geführt, diesen für die Messe zu verwenden.

Die konzeptionelle Einfachheit einer Ausstell-Schere entspricht auch dem konzeptionellen Anspruch des Ultraslim-Systems, Reduktion auf die notwendigen Komponenten verbunden mit hocheffizienter Ausnutzung von Material und Geometrie bei schlichter und unaufdringlicher Gestaltung.

2.5 Klebeverbindungen

2.5.1 Allgemeines

Im ULTRASLIM-Fenstersystem kommt in hohem Maße auch die Füge-technik Kleben zur Verwendung. Kleben ist für moderne Leichtbauweisen im Allgemeinen und Verbindungen von GFK-Bauteilen im Speziellen ein hervorragend geeignetes Fügeverfahren. Dies liegt in den spezifischen Vorteilen dieser Füge-technik begründet, und zwar insbesondere:

1. Durch Kleben können verschiedenste Materialien, etwa auch Glas und Kunststoff miteinander verbunden werden.
2. Kleben ist ein zerstörungsfreies Fügeverfahren, bei dem die zu verbindenden Materialien nicht geschwächt werden. Insbesondere bei unidirektional verstärktem GFK würde etwa eine Bohrung die Faserstruktur schwächen und damit die Festigkeit des Bauelements herabsetzen.
3. Kleben ermöglicht als stoffschlüssiges Fügeverfahren die Verbindung über große Flächen. Da so die Kräfte nicht punktförmig sondern flächig abgeführt werden, werden Spannungsspitzen vermieden.
4. Kleben ermöglicht auch das Verbinden sehr dünner Werkstoffe bis hin zu Folien.
5. Durch die Wahl geeigneter Klebprodukte ist Fügen und Abdichten in einem Arbeitsgang möglich (siehe z.B. PKW-Frontscheibe).

Den zahlreichen Vorteilen des Klebens stehen einige Nachteile dieser Fügemethode gegenüber, denen durch vorgreifende planerische Maßnahmen begegnet werden muss. Nachfolgend seien einige der wichtigsten genannt:

1. Anspruchsvolle Umsetzung
Das vielleicht größte Problemfeld des Klebens betrifft die Diskrepanz zwischen dem unter kontrollierten Laborbedingungen von geschultem Fachpersonal durchgeführt möglichen und den unter „Realbedingungen“ umsetzbaren Klebeverbindungen. Klebstoffhersteller wie 3M arbeiten an der Entwicklung von Klebstoffen, die auch unter Baustellenbedingungen zuverlässig einsetzbar sind.
2. Problematik der Wiederlösbarkeit
Viele Klebeverbindungen, insbesondere solche mit Zwei- oder Mehrkomponentenklebern, sind nicht zerstörungsfrei lösbar. Hier muss bei der Auslegung eines Bauteils bereits die Demontierbarkeit berücksichtigt werden.
3. Anfälligkeit gegenüber Umwelteinflüssen
Als teilweise hochfunktionalisierte organisch-chemische Verbindungen sind Klebschichten Umwelteinflüssen und Alterung unterworfen. Es ist daher unbedingt erforderlich, einen für die jeweilige Anwendung hinreichend stabilen bzw. durch Additive stabilisierten Klebstoff einzusetzen.
4. Umweltfreundlichkeit der Klebstoffe
Klebstoffe sind hocheffiziente chemische Produkte, die mit minimalem Materialaufwand großen Nutzen erzielen. Strukturelle Klebeverbindungen auch zur Verbindung größerer Bauteile oft nur wenige Quadratzentimeter groß mit optimalen Schichtdicken von einigen Zehntel Millimetern. Der Anteil an Klebstoffen ist somit verglichen mit anderen Materialien sehr klein. Dennoch ist die chemische Industrie aufgerufen, Klebstoffe zu produzieren, die später nicht zu Sondermüll werden.

2.5.2 Scheibe auf Rahmen (Glas auf GFK)

Die sichtbarste Klebung ist die Rundum-Verklebung von Rahmen und VIG-Scheibe. Durch diese Verklebung, vergleichbar etwa mit der Frontscheibe moderner PKW, ertüchtigen sich Rahmen und Scheibe gegenseitig, und das Gesamtsystem kann bei gleicher Steifigkeit schlanker ausgeführt werden. Das Prinzip ist nicht nur aus dem Kraftfahrzeugbau bekannt, sondern wird in der Architektur unter der Bezeichnung „Structural Glazing“ praktiziert.



Abbildung 35: Beispiel einer Structural-Glazing-Fassade (Quelle: 3M)

Bei „Structural Glazing (SG)“ oder „Structural Sealant Glazing (SSG)“ Fassaden handelt es sich um geklebte Ganzglasfassaden. Diese weisen eine - mit Ausnahme der schmalen Silikonfugen zwischen den Scheiben - vollständig glatte Oberfläche auf, da die Glasscheiben nur durch Klebungen an der Fassadenkonstruktion gehalten werden und keine zusätzlichen Halterungen vorhanden sind. Durch die umlaufende Verklebung werden etwa Windsogkräfte in die Fassadenkonstruktion abgeführt. Materialstärke (0,5 - 3,0 mm) und Flexibilität der VHB-Klebebänder ermöglichen es, Werkstoffe mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten spannungsfrei zu verbinden, wie zum Beispiel Glas und Stahl. Das elastische VHB-Klebeband gleicht die Ausdehnungsunterschiede aus, während diese bei einer starren Klebung zu Spannungen oder Brüchen führen würden.

Im deutschen Bauwesen schreibt die DIN 18008 „Glas im Bauwesen“ ab einer Einbauhöhe von 8,00 m über Geländeoberkante eine zusätzliche mechanische Absturzsicherung vor, die bei Versagen der Klebung ein Herausfallen der Scheibe verhindern soll. Mit dieser Regelung setzt sich das deutsche Bauwesen von den meisten europäischen Ländern und auch der USA ab. Auch das ULTRASLIM-Fenstersystem muss dementsprechend bei Einbau über 8,00 m Höhe eine zusätzliche mechanische Absturzsicherung erhalten.

Als Klebprodukt eignen sich die VHB-Klebebänder (VHB = very high bonding) der Firma 3M, die schon seit Jahren erfolgreich weltweit im Structural Glazing eingesetzt werden (siehe *Abbildung 36*).



Abbildung 36: 3M VHB-Klebeband

Diese doppelseitigen Hochleistungsklebebänder bestehen vollständig aus geschäumtem Acrylat-Klebstoff, haften unmittelbar und bilden dauerhaft starke Verbindungen. Die Produkte weisen eine hohe Beständigkeit gegen UV-Strahlung und Witterungseinflüsse auf. Der Acrylat-Klebstoff bietet auf fast allen Materialien und insbesondere auch auf GFK eine sehr gute Haftung. Auf der zu klebenden Glasoberfläche wird vorab ein Silan-Glasprimer aufgetragen, der verhindert, dass die Klebeverbindung langfristig von Feuchtigkeit unterwandert wird.



Abbildung 37: 3M VHB-Klebeband auf VIG montiert

2.5.3 Rahmen (GFK auf GFK)

An den Ecken müssen die aus Gehrung gesägten GFK-Profile strukturell verklebt werden. Ein besonders geeigneter Klebstoff hierfür ist 3M Scotch-Weld DP 490. Hierbei handelt es sich um einen zähelastischen Zweikomponenten-Konstruktionsklebstoff auf Epoxidbasis. Er härtet bei Raumtemperatur aus und wurde speziell für das Kleben von Metallen, Kunststoffen und Faserverbundwerkstoffen entwickelt. Durch die Zähelastizität und die hervorragende Zugscher- und Schälfestigkeit auf GFK ermöglicht dieser Klebstoff eine sichere Verbindung der Rahmenecken.

Wichtig ist auch die richtige Vorbehandlung der Oberfläche. Durch Entfetten der Klebefläche mit Isopropanol, Aufrauen mit Faservlies (3M Scotch-Brite CF-HP) und erneutes Abwischen mit Isopropanol entsteht eine fettfreie Oberfläche mit der optimalen Mikrorauigkeit. Untenstehende Abbildung zeigt einen Klebeversuch mit 3M Scotch-Weld DP 490, bei dem nur eine Klebefläche entsprechend vorbereitet wurde. Bei Abscheren des Testprofile kommt es zum adhäsiven Versagen, also zur vollständigen Ablösung der Klebschicht vom Füge teil. So kann die volle Festigkeit des Klebstoffs nicht genutzt werden.



Abbildung 37: Klebung mit nur einseitiger Oberflächenvorbereitung

Eine Alternative stellt 3M Scotch-Weld 7172 B/A dar, ein lösemittelfreier Hybridklebstoff auf Acrylat- und Epoxidbasis. Auch dieser Klebstoff zeichnet sich durch sehr gute Zugscher- und Schälfestigkeit auf Verbundwerkstoffen aus und kommt aufgrund seiner einfachen Verarbeitung besonders oft im Sportbootsbau zum Einsatz. Scotch-Weld 7172 B/A enthält kleine Glaskügelchen zur einfachen Kontrolle der optimalen Klebschichtdicke.

2.5.4 Scharniere (Stahl auf GFK)

Auch die Scharniere sollen zunächst auf die GFK-Rahmen geklebt werden, um Gewicht zu sparen und um das unidirektional verstärkte Material nicht mit Bohrungen oder Schraubungen zu beschädigen.

Für den Klebstoff gelten sehr ähnliche Anforderungen wie bei der Verklebung der Rahmenecken. In Vorversuchen stellte sich heraus, dass auch hier entweder 3M Scotch-Weld DP 490 oder 3M Scotch-Weld 7172 B/A eingesetzt werden können.

Bei sachgemäßer Vorbereitung der Klebeflächen und Verwendung geeigneter Klebstoffe erfolgt eine feste Verbindung mit beiden Füge teilmaterialien.

Untenstehende Abbildungen zeigen den Unterschied zwischen einem adhäsiven Versagen durch mangelhafte Bindung an die Metalloberfläche sowie zum anderen das kohäsive Versagen der Klebschicht. In letzterem Fall erfolgt ein Bruch der Klebschicht, die Festigkeit des Klebstoffs wird also optimal ausgenutzt.



Abbildung 38: Adhäsives Versagen der Klebung



Abbildung 39: Kohäsives Versagen der Klebung

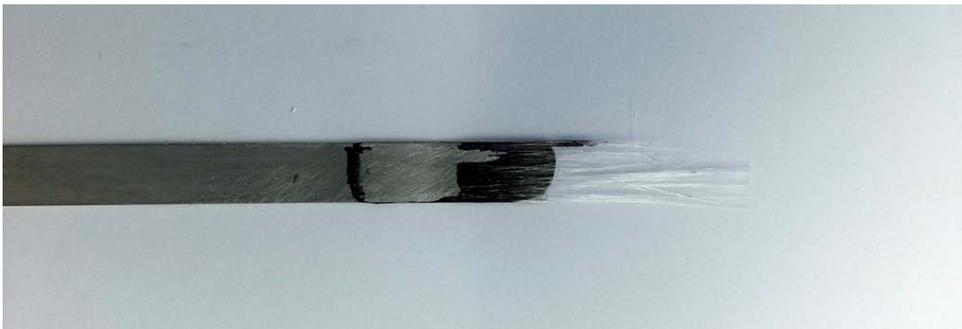


Abbildung 40: Kohäsives Versagen der Klebung mit Faserablösung

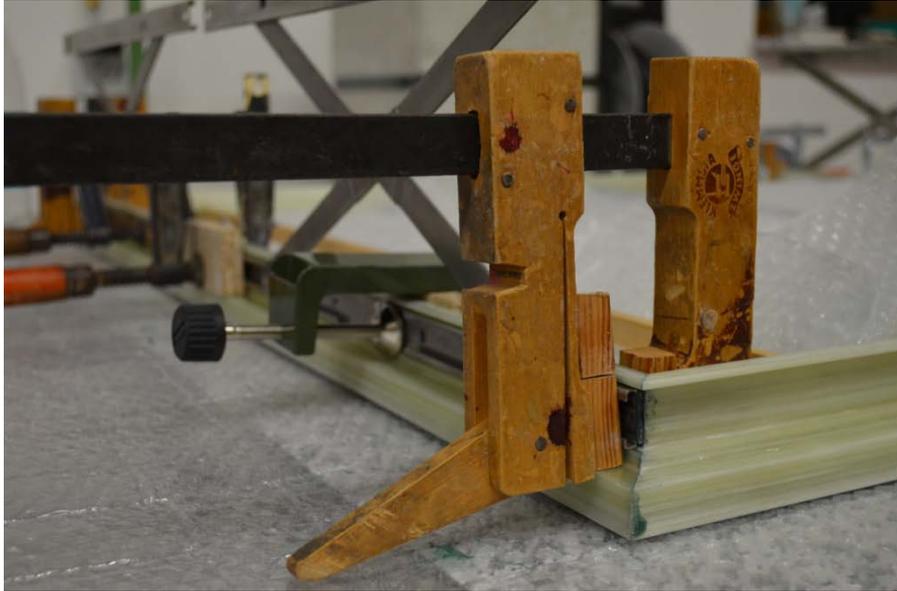


Abbildung 41: Lagesicherung der Verklebung von Scharnier und Rahmen während der Aushärtung

2.6 Folierung

2.6.1 Allgemeines

Es wurde frühzeitig entschieden, die pultrudierten Profile mit einer Folierung zu versehen. Dies lag hauptsächlich in der Gestaltungsfreiheit begründet, die moderne Designfolien bieten. Schon das pultrudierte GFK als Grundmaterial bietet eine interessante Ästhetik, die von seiner leichten Transluzenz und der sichtbaren Faseranordnung geprägt ist. Durch Beimischung von Farbpigmenten zur GFK-Matrix kann so, zusammen mit einer transparenten Schutzbeschichtung, ein dezentes und für das Material charakteristisches Erscheinungsbild erreicht werden. Ein Beispiel für diese Art von GFK-Optik in der Architektur ist der Hauptsitz der Firma Fiberline Composites in Middelfart, Dänemark (siehe *Abbildung 42*).



Abbildung 42: Teil einer GFK-Fassade (Quelle: Fiberline Composites)

Um aber mit dem neuen ULTRASLIM-Fenstersystem möglichst viele Architekten und Bauherren anzusprechen, ist eine größere Designvielfalt von Vorteil. Zudem handelt es sich bei GFK um ein relativ neues Material, das erst im Zuge des sich weiterentwickelnden Leichtbaus allmählich Einzug in die Architektur erfährt. Wo die Optik dieses Material noch keine Akzeptanz erfährt, kann durch das Folieren mit Dekorfolien nahezu jedes beliebige Aussehen eingestellt werden. So können auch bereits bestehende Fenstersysteme ausgetauscht und die energetischen Vorteile des ULTRASLIM-Fenstersystems genutzt werden ohne die Optik der alten Fensterrahmen, und damit das Erscheinungsbild der Fassade, radikal zu verändern. Insbesondere bei der Sanierung historischer Altbauten ist es essenziell wichtig, bestehende Rahmenoptiken, wie etwa Stahl und gängige Holzarten, gut nachbilden zu können.

Ein zweites Argument für die Folierung ist der Schutz des unbehandelten GFK-Materials, insbesondere des Flügelrahmens, vor UV-Strahlung und Witterungseinflüssen. GFK-Profile müssen gegen UV-Strahlung geschützt werden, entweder durch Zusatz von UV-Stabilisatoren zur Matrix vor der Pultrusion oder durch nachträgliches Versehen mit einer Schutzbeschichtung. Wenn die Designfolie gleichzeitig eine hohe UV-Beständigkeit aufweist, kann auf solche Maßnahmen weitgehend verzichtet werden.

2.6.2 Dekorfolien 3M DI-NOC

Die Folierung der ULTRASLIM-Profile erfolgte mit DI-NOC Dekorfolien der Firma 3M. Bei diesem Produkt handelt es sich um dünne Folien auf PVC (Polyvinylchlorid) oder PVF (Polyvinylfluorid). DI-NOC-Folien sind in mehreren hundert Designvarianten erhältlich. So wird eine maximale Designfreiheit erreicht, obwohl in der Pultrusion nur eine Art Profil gefertigt wird.

Insbesondere die Folien aus PVF sind für das Aufbringen auf Fassadenflächen ausgelegt und in hohem Maße witterungsbeständig. Die nur etwa 0,2 mm starken Folien sind bereits ab Werk mit einer rückseitigen Klebschicht versehen und können auf die meisten Materialien appliziert werden. Sie sind einfach 3D-formbar, so dass auch eine Folierung relativ komplex geformter Bauteile möglich ist. Allerdings werden durch die geringe Stärke der DI-NOC-Folie auch viele Unebenheiten der Oberfläche abgebildet, was bei der Gestaltung Berücksichtigung finden muss.

Aus der umfangreichen DI-NOC-Palette wurden exemplarisch drei Designs gewählt:

- FW-677 „Holz“
- PA-187 „grau metallic“ in der Optik pulverbeschichteter Metallrahmen
- PS-503 „weiß“ in der Optik von PVC-Rahmen

2.6.3 Umsetzung

Ein sicheres und dauerndes Anhaften der DI-NOC-Folien an eine Bauteiloberfläche ist gewährleistet, wenn deren Oberflächenenergie mindestens 38 mN/m (alte Einheit: Dyn) beträgt. Niederenergetische Werkstoffe wie etwa Polyethylen können nicht ohne weiteres foliert werden. Zunächst wurde also in einem Vorversuch mit einer 38 Dyn Testtinte nachgewiesen, dass diese Oberflächenenergie bei den pultrudierten GFK-Profilen erreicht wird.

Foliert wurden Profilstücke mit einer Länge von ca. 20 cm. Die Oberfläche der Profile wurde gereinigt, mit Isopropanol entfettet und auf den Klebeflächen mit 3M Primer 94, einem Haftvermittler für Acrylat-Klebstoffe, vorbehandelt. Die Folie wurde aufgebracht und mit einem Rakel blasenfrei gestrichen. Hierbei wurden die Stellen der Profile freigelassen, auf die später Dichtungen und Scheibe geklebt werden sollten.

Die Folierung verlief problemlos. Es konnte gezeigt werden, dass Designfolien einen gangbaren Weg zur ästhetischen Gestaltung des neuen Fenstersystems bieten.

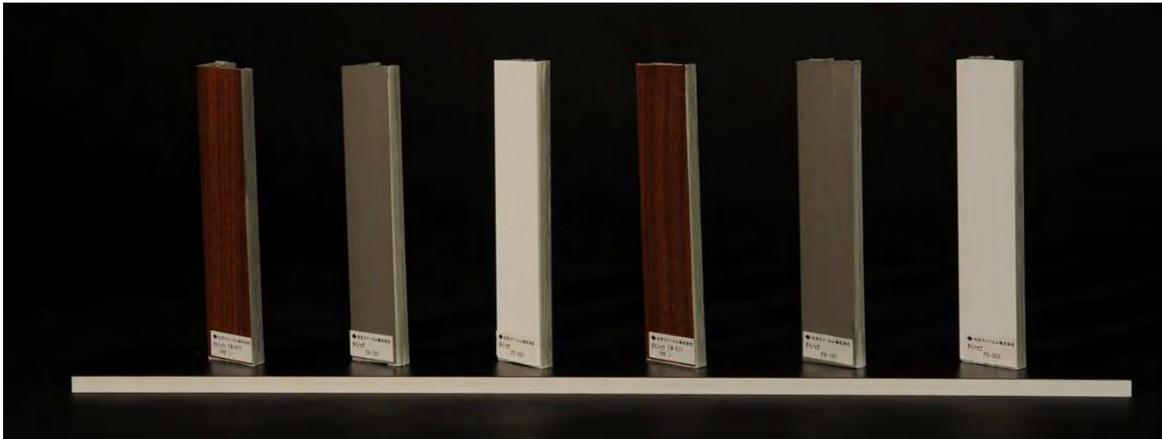


Abbildung 43: Folierte ULTRASLIM-Profilstücke



Abbildung 44: Folierte ULTRASLIM-Profilestück

3 Fertigung von Probekörpern

Die Analyse zum Tragverhalten der Fensterrahmenprofile bestand aus Untersuchungen der Festigkeit- und Steifigkeitseigenschaften unter Zug- und Biegebeanspruchungen. Die Fertigung und die mechanischen Untersuchungen der Profile wurden im Faserinstitut Bremen durchgeführt. Hier standen die erforderlichen technischen Gerätschaften in Form von einer Pultrusionsanlage sowie geeigneter Prüfmaschinen zur Verfügung.

Bei der im Technikum des FIBRE zur Verfügung stehende Pultrusionsanlage handelt es sich um eine Anlage der Firma Thomas Technik, Bremervörde. Die Anlage ist rechnergesteuert, die wesentlichen Parameter wie Abzugsgeschwindigkeit und Temperaturkennfelder können stufenlos eingestellt werden. Die verwendete Heizanlage ist eine vier Zonen Heizung. Die Heizzonen können separat angesteuert und geregelt werden. Eine gegenseitige Beeinflussung der Heizzonen ergibt sich durch den Wärmefluss innerhalb des Werkzeuges und des hindurch geleiteten Materials. Abhängigkeiten ergeben sich über den Wärmefluss der Werkzeughalterung und des Werkzeuges selbst. Im laufenden Betrieb wird die Temperaturführung durch die Verarbeitungsgeschwindigkeit beeinflusst, hier ist es die aus dem Profilquerschnitt resultierende Masse von Fasermaterial und Matrix sowie deren Wärmekapazität.

3.1 Verwendete Materialien

Als Fasermaterial wurden Glasfaserrovings der Fa. Owenscorning mit einer Feinheit von 2400 tex eingesetzt. Das verwendete Harzsystem ENVIREZ® 70302 von der Fa. Ashland wurde für die Anwendung in der Pultrusion optimiert. Die Kennwerte laut Herstellerangaben sind der *Tabelle 3* zu entnehmen.

Tabelle 3: Matrixeigenschaften ENVIREZ

Eigenschaft	Kennwert
Zugfestigkeit	73 MPa
Zugmodul	2500 MPa
Bruchdehnung	4 %
Formbeständigkeitstemperatur	90 °C

Als Polymerisationsinitiatoren kamen die organischen Peroxide Trigonox C, Perkadox16 und Perkadox CH50X der Fa. Akzo Nobel zum Einsatz. In einer Voruntersuchung mit einem DSC Plattenrheometer der Fa. TA Instruments wurde der Einfluss der Initiatoren auf die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Aushärtung bestimmt (*Abbildung 45*). Hieraus konnten Erkenntnisse über die Temperaturabhängigkeit, Viskosität, Topfzeit, optimale Aushärtetemperatur und Dauer abgeleitet werden. Mit dem Matrixsystem in Verbindung mit Perkadox 16 konnte eine wesentlich kürzere Aushärtezeit realisiert werden.

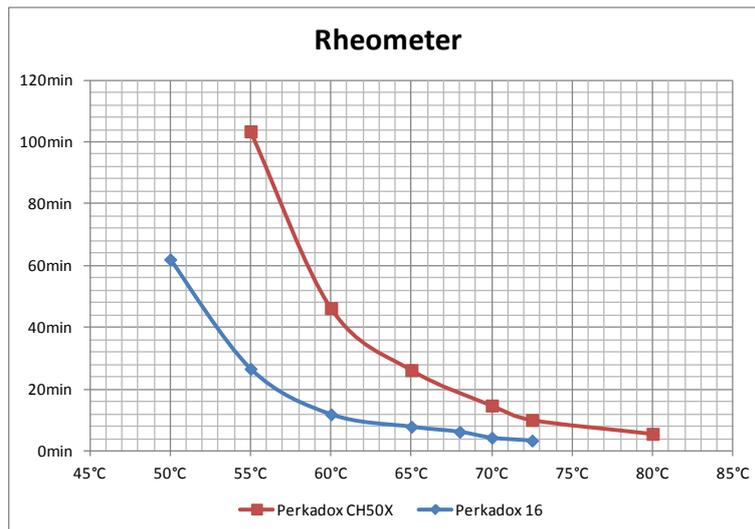


Abbildung 45: Einfluss des Härters auf die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Aushärtung

3.2 Herstellung und Untersuchung von Prüfkörper

Um die Verbundeigenschaften der verwendeten Glasfasern und der Matrix zu ermitteln, wurden Standardprüfkörper pultrudiert und diese mechanischen Prüfungen wie Zug-, Biege- und Schlagzähigkeitsuntersuchungen unterzogen. Für die Fertigung der Profile stand ein Werkzeug zur Verfügung mit dem rechteckige Probenkörper mit den Abmessungen 10 mm x 2 mm hergestellt werden konnten. Das Werkzeug ist mit einer Kühlzone ausgestattet die bei längeren Versuchsabläufen zu einer optimalen Ausnutzung der Topfzeit des verwendeten Matrixsystems führt.

Die Versuchsanordnung wurde in der Technikumsanlage des FIBRE aufgebaut und ausgerichtet (Abbildung 46). Um die Werkzeugkavität mit einem Faservolumengehalt von ca 70% zu beaufschlagen, wurden 15 Spulen des Fasermaterials umgespult und in die Versuchsanordnung eingebracht. Dazu wurden die Rovings durch die Harzwanne und das Werkzeug bis zu der Abzugsvorrichtung der Pultrusionsanlage hindurchgeführt. In dem Harzbad werden die Fasern einmal umgelenkt, um die Benetzung mit der Matrix zu verbessern (Abbildung 47). In allen Versuchen wurde der Versuchsaufbau unter einer Absaugvorrichtung eingehaust, um Styroldämpfe des ungesättigten Polyesterharzes wirkungsvoll absaugen zu können.



Abbildung 46: Übersicht Pultrusionseinheit zur Fertigung von Zugstäben



Abbildung 47: Rovingführung im Harzbad

Für die Versuche wurde die Heizzonen des Werkzeugs stufenweise bis zu einer maximalen Temperatur von 160 Grad Celsius in der letzten Stufe aufgeheizt. Die optimale Abzugsgeschwindigkeit wurde nach einigen Vorversuchen mit 35 cm/min eingestellt. Mit dieser Einstellung wurden die erforderlichen Mengen an Probematerial gefertigt (*Abbildung 48, Abbildung 49*).



*Abbildung 48: Fertiger Zugstab 10*2mm*



Abbildung 49: Gefertigte Probenmaterialien

Das Probematerial musste nun auf die für die unterschiedlichen Untersuchungen benötigten Längen zugeschnitten werden. Die Zugproben mussten zudem mit Aufleimern versehen werden, um Spannungskonzentrationen zu verringern und um damit Einspannbrüchen vorzubeugen (*Abbildung 50*).



Abbildung 50: Zugstäbe mit Aufleimern für die Zugprüfungen

3.3 Ergebnisse

Die so vorbereiteten Proben wurden anschließend im Normklima des Prüflaboratoriums des Faserinstituts klimatisiert und dann den eigentlichen Prüfungen zugeführt. Die Prüfmethoden sowie die zugrundeliegenden Normen sind der *Tabelle 4* zu entnehmen.

Tabelle 4: Angewendete Normen

- Klimatisierung der Proben gem. DIN EN ISO 14125
- Zugprüfungen gem. DIN EN ISO 527
- Biegeprüfungen gem. DIN EN ISO 291
- Schlagzähigkeit gem. DIN EN ISO 179

Die ermittelten Kennwerte der mechanischen Untersuchungen sind der *Tabelle 5* zu entnehmen. Die Kennwerte der Zugprüfungen (Zugfestigkeit und Modul) liegen oberhalb der Angaben aus Literatur und von Herstellern. Dies ist darin begründet, dass für die Probenmaterialien keine Vliesstoffe in der Oberfläche eingearbeitet wurden. Die Streuwerte bei den Schlagzähigkeitsuntersuchungen weichen mit einem Wert von ca. 57 % stark von den Werten aus den weiteren Versuchen ab.

Tabelle 5: Prüfergebnisse der mechanischen Untersuchungen

	Kennwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
Zugfestigkeit	1.453,75 MPa	61,05 MPa	4,2 %
Zugmodul	58.096,16 MPa	1.894,05 MPa	3,26 %
Biegefestigkeit	936,69 MPa	105,74 MPa	11,29 %
Biegemodul	50.537,89 MPa	868,53 MPa	1,72 %
Schlagzähigkeit	387,82 KJ/mm ²		56,76 %

4 Brandschutz

4.1 Anforderungen des baulichen Brandschutzes

4.1.1 Gebäude geringer Höhe

Die Landesbauordnungen stellen keine besonderen Anforderungen an Fenster, die in Gebäude der Klassen GK1-31 eingebaut werden. Das heißt, es gilt das in den Landesbauordnungen gesetzte generelle Verbot "leichtentflammbarer Baustoffe". Das Material der Fensterrahmen, zum Beispiel glasfaserverstärktes Polyesterharz, muss demnach mindestens die Anforderungen der alten Baustoffklasse B2 bzw. der neuen Klasse E -d2 erfüllen. Hierbei steht B2 für „normalentflammbar“ gemäß DIN 4102-1, E -d2 für „normalentflammbar, starkes Abtropfen“ gemäß DIN 13501-1.

Der Nachweis des Brandverhaltens E -d2 (oder besser) ist nach DIN EN ISO 11925-1 durch vertikales Einspannen der Probe und Beflammen mit einer direkt einwirkenden kleinen Flamme zu erbringen.

4.1.2 Höhere Gebäude

Beim Einbau in höhere Gebäude der Klassen GK4-5 wird das Fenster als nicht tragender Teil der Außenwand betrachtet. Hier wird vom „Fenster als Bauteil“ die Feuerwiderstandsklasse W30 gefordert. Das bedeutet, das Fenster darf bei der nach DIN 13501-1 vorgeschriebenen Brandprüfung innerhalb von 30 min nicht strukturell und statisch versagen.

Laut z.B. Bauordnung NRW sind „brennbare Fensterprofile und Dichtungsstoffe sowie brennbare Dämmstoffe in nicht brennbaren Profilen der Außenwandkonstruktion“ zulässig, denn an diese Bauteile werden keine besonderen Anforderungen gestellt.

4.1.3 Rettungswege

Die Landesbauordnungen regeln die Anforderungen an sogenannte „notwendige Flure“.² Es sind dies Flure, über die Rettungswege von Aufenthaltsräumen zu Treppenträumen notwendiger Treppen oder zu Ausgängen ins Freie führen.

Wände notwendiger Flure sind in Gebäuden geringer Höhe (siehe 4.1.1) in der Feuerwiderstandsklasse F30 auszuführen. In höheren Gebäuden gilt zusätzlich zur Widerstandsklasse F30, dass Wände in den wesentlichen Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen auszuführen sind (F 30-AB). Dies gilt übertragen auch für die dort verbauten Fenster.

4.1.4 Brandschutzverglasungen

Eine letzte Überlegung hinsichtlich der Brandschutzanforderungen wäre, ob der Rahmen des ULTRASLIM-Fenstersystems mit einer anderen Verglasung auch als

¹ Die Gebäudeklassen GK1-3 umfassen Gebäude, bei denen der Fußboden keines Geschosses mit Aufenthaltsräumen im Mittel mehr als 7 m über der Geländeoberfläche liegt.

² siehe z.B. BauONRW 2000 §38 „Notwendige Flure und Gänge“ Abs. 4

Brandschutzverglasung gemäß 4102-13 eingesetzt werden kann. Die DIN 4102-13 unterscheidet die zwei Feuerwiderstandsklasse F und G. F-Brandschutzverglasungen verlieren im Brandfall ihre Transparenz, so dass der Durchtritt von Wärmestrahlung blockiert wird. F-Verglasungen verhalten sich brandschutztechnisch wie raumabschließende Bauteile (nichttragende Wände) und müssen deshalb auch die entsprechenden Anforderungen nach DIN 4102-2 erfüllen. G-Brandschutzverglasungen bleiben im Brandfall transparent und mindern die Wärmestrahlung kaum ab.

Nach der Brandwiderstanddauer, also der Dauer der Beflammung ohne strukturelles Versagen des Bauteils, werden die Feuerwiderstandsklassen eingeteilt, etwa F30 für mindestens 30 min.

4.2 Technische Umsetzbarkeit

4.2.1 Grundsätzliches

Faserverstärkte Kunststoffe setzen sich generell zusammen aus einer Kunststoffmatrix und Verstärkungsfasern. Beim ULTRASLIM-Fensterrahmen werden zur Verstärkung ausschließlich nicht brennbare Glasfasern eingesetzt, so dass das Brandverhalten des Fensters im Wesentlichen durch die Kunststoffmatrix bestimmt ist. Bei den Aussagen über das Brandverhalten und Flammenschutzmodifikation von Kunststoffen handelt es sich um allgemeine Richtwerte, die im Einzelfall experimentell überprüft werden müssen. Faktoren wie der Fasergehalt, die Faserverteilung und die genaue Harzrezeptur erfordern immer eine Beurteilung und Tests im Einzelfall.

4.2.2 Brandverhalten des Grundmaterials

Bei den pultrudierten ULTRASLIM-Profilen kommt als Matrix aus Kostengründen zunächst ein ungesättigtes Polyesterharz (UP) zum Einsatz. Alternativen hierzu sind Epoxidharze (EP) und seit einigen Jahren auch vermehrt Polyurethane (PUR, z.B. Bayer Baydur PUL[®]). Das Grundmaterial, also das ausgehärtete Harz ohne Verstärkungsfasern und Zusatzstoffe, ist ohne weitere Maßnahmen leicht- oder normalentflammbar. Insbesondere UP-Harze brennen mit rußender Flamme, bedingt auch durch den hohen Gehalt an Styrol.

Im Verbundwerkstoff GFK ist die Entflammbarkeit durch das Einbringen großer Mengen nichtbrennbaren Materials (bis 80 Prozent Glasfaser in pultrudierten Profilen) in der Regel herabgesetzt. Das Glas dient in diesem Fall als inerte Füllstoff. Durch das Herabsetzen der Konzentration brennbaren Materials (Kunststoffmatrix) sind sowohl Entflammbarkeit als auch Rauchbildung reduziert. Glasfaserverstärkte Kunststoffe mit hohem Faseranteil sind daher in der Regel normalentflammbar.

4.2.3 Brandschutz über Eingriff in die Kunststoffmatrix

Industriell wird der Brandschutz von Kunststoffen meist über das Beimischen sogenannter Flammenschutzmittel (FSM) in die Matrix erreicht. Lange Zeit üblich waren chlor- oder bromhaltige FSM, die bei Ausbruch eines Feuers die Flammen durch Unterbinden der Reaktion des brennenden Materials mit dem Luftsauerstoff

unterbinden. Aus Gründen der Nachhaltigkeit sowie der Vermarktbarkeit des Fensters sollte auf halogenierte FSM jedoch unbedingt verzichtet werden.

Das zweite gängige FSM für UP-Harze ist Aluminiumtrihydroxid (ATH), das bei starkem Erhitzen Wasser freisetzt. Gleichzeitig nimmt es die Verbrennungswärme teilweise auf. ATH ist allerdings erst bei hohen Füllgraden effektiv, oft müssen mehr als 50 Gew.-% ATH zugesetzt werden, um das gewünschte Brandverhalten einzustellen. Eine Erhöhung des Anteils an Flammenschutzmittel in der Matrix geht jedoch einher mit einer Verringerung des Anteils bindender Matrixbestandteile. Da zunehmend weniger bindendes Harz zur Verfügung steht, muss zur Gewährleistung der strukturellen Integrität der Fasergehalt reduziert werden, was eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften zur Folge hat. Dieses Problem besteht prinzipiell bei additiven FSM, ist aber bei ATH aufgrund der benötigten Mengen besonders ausgeprägt.

Die nach heutigem Stand effektivsten FSM sind die sogenannten Intumeszenzmittel, auch bekannt als Dämmschichtbildner.³ Diese bilden bei Brandtemperaturen durch starkes Aufschäumen sofort eine wärmeisolierende nichtbrennbare Ascheschicht, die das darunterliegende Material vor weiterem Abbau schützt. Intumeszenzmittel sind schon bei geringeren Füllgraden effektiv, so dass die mechanischen Eigenschaften der Matrix weniger beeinträchtigt werden. Durch synergetische Kombination mit anderen FSM, etwa auch ATH, kann der benötigte Füllgrad noch weiter reduziert werden.

4.2.4 Brandschutz über Beschichtung

Auf dem Markt sind transparente Zweikomponenten-Lacke verfügbar, die im Brandfall als Intumeszenzschicht (schaumbildende Schicht) fungieren.⁴ Eine Beimischung von Farbpigmenten ist problemlos möglich, so dass dieser Weg zumindest eine gewisse gestalterische Freiheit bietet. Diese Lacke können bei Bedarf mit einer zusätzlichen Lackschicht zum Schutz vor Abrieb und Feuchtigkeit ausgerüstet werden. Somit bietet diese Option zwar nicht die gestalterische Freiheit der Folierung mit 3M Di-Noc, ermöglicht aber immerhin eine gewisse Variation.

Auch verfügbare Intumeszenz-FSM (siehe 2.3) können in Form eine Gelcoats als Beschichtung eingesetzt werden.

4.2.5 Brandschutz über Folierung

Hierbei ist zu beachten, inwiefern eine Folierung mit Brandschutzfolie mit der späteren Bearbeitung der Rahmenprofile kompatibel ist. Noch zu klebende Teile des Rahmens dürfen nicht mit Folie abgedeckt sein, da sonst keine stoffschlüssige und sichere Verbindung mehr realisierbar ist. Auch die in Zusammenarbeit mit 3M Deutschland untersuchte Designfolie Di-Noc[®] sollte nicht in zweiter Lage auf eine bereits vorhandene Folierung aufgebracht werden. Der so entstehende Folienverbund würde die Lebensdauer des Fensterrahmens herabsetzen.

Brandschutzfolien auf Basis nichtbrennbarer Materialien, wie etwa Aluminium oder Glas, sind in der Ausführung in der Regel zu starr, um die relativ feine Struktur der Profile passgenau abzudecken. Kunststofffolien, die mit Flammschutzmitteln

³ Siehe z.B. Exolit AP 740 der Clariant AG

⁴ Siehe z.B. die 2K-Brandschutzlack-Systeme der Aisco GmbH.

ausgerüstet sind, können in Ihrer Funktion ebenfalls durch eine darauf angebrachte Designfolie behindert werden.

4.2.6 Brandschutzvlies

Weiterhin ist es möglich, das Brandverhalten durch Einarbeiten von Brandschutzvliesen zu verbessern. Durch Einlegen von Graphitvliesen an der Oberfläche können z.B. bei UP-Harzen auch mit geringen Füllgraden hohe Brandschutzanforderungen erfüllt werden. Graphitfaser expandiert bei 160 °C um den Faktor 9 und bildet so eine Schutzschicht. Diese Expansion könnte durch das nachträgliche Aufbringen einer Designfolie behindert werden.

4.2.7 Fazit

Zunächst ist hier grundsätzlich zu unterscheiden zwischen den baurechtlichen Mindestanforderungen an den Brandschutz und dem technisch Machbaren. Erstere sind relativ leicht zu erfüllen, PUR-GF-Systeme etwa erfüllen sie ohne Zusätze von Flammschutzmitteln. Durch den hohen Massenanteil von Glasfasern (60-80%) ist die Brennbarkeit der pultrudierten Profile ohnehin geringer als die der reinen Kunststoffe. Das Pultrusionsharz Baydur PUL etwa erfüllt bei 80 Prozent Fasergehalt die Anforderungen der Baustoffklasse B2 bereits ohne weitere Maßnahmen.

Soll das System ULTRASLIM aber etwa in Fluchtwegen oder als Brandschutzverglasung eingesetzt werden, so muss die Qualifizierung für entsprechende Feuerwiderstandsklassen nachgewiesen werden. Eine Widerstandsklasse W30 oder mehr mit einem GFK-System zu erzielen ist eine Herausforderung. Es bestehen aber technische Möglichkeiten, den Brandschutz von GFK drastisch zu verbessern.

Der bestmögliche Flammschutz kann jedoch nur durch Zusatz größerer Mengen von Additiven zur Matrix erreicht werden, eventuell in Verbindung mit anderen Maßnahmen. Das Einstellen des Brandschutzes über Additive beinhaltet ein Abwägen, in welchem Ausmaß auf mechanische Festigkeit verzichtet werden kann um das Brandverhalten zu optimieren. Inwiefern die mechanischen Eigenschaften des Harzes und der fertigen Profile beeinflusst werden dürfen, ist aus den FEM-Berechnungen des Faserinstituts Bremen abzuleiten.

Sollte ein Verzicht auf mechanische Festigkeit der Profile nicht hinnehmbar sein, bleibt als Ausweg eine Beschichtung mit Intumeszenzlack. Aufgrund der eingeschränkten Designmöglichkeiten ist jedoch zunächst der Flammschutz über Additive zu untersuchen.

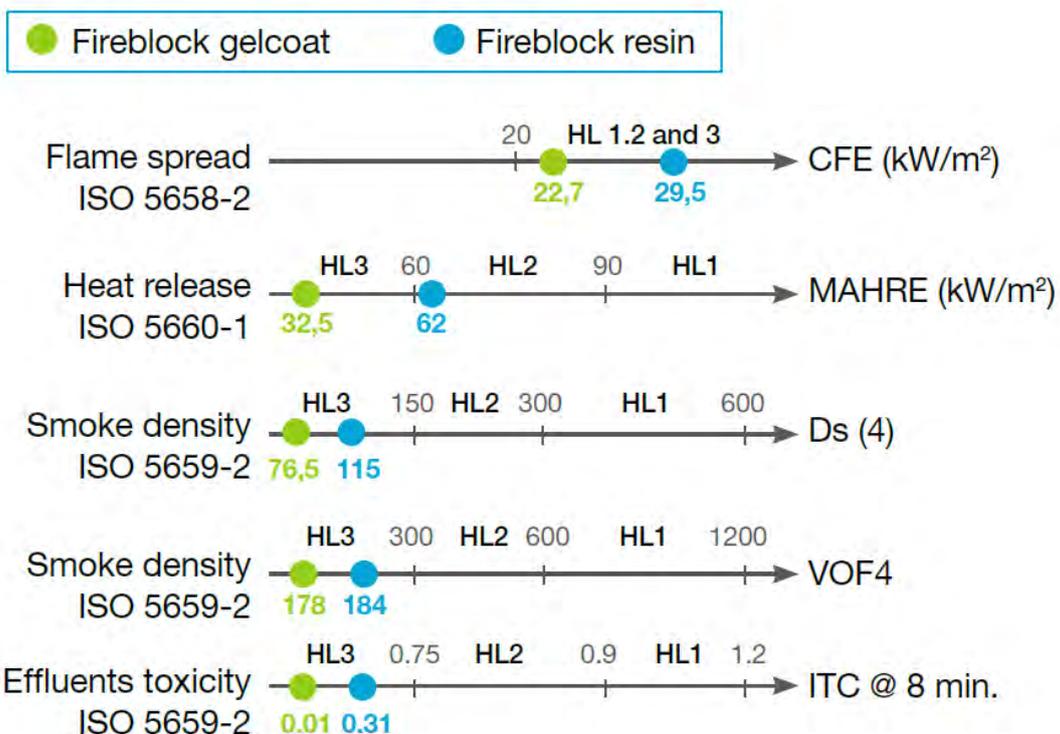
4.3 Eigene Untersuchungen

In eigenen Versuchsreihen wurden Brandschutzmaßnahmen an pultrudierten Profilen untersucht. Für die Untersuchungen wurde ein Brandschutz ausgewählt, der sich im Fahrzeugbau bereits bewährt hat. Als Matrix wurde das für Pultrusionszwecke geeignete FIREBLOCK NORSODYNE P 81091 TF von der Firma CCP COMPOSITES US LLC, Kansas City, gewählt. Es handelt sich um ein UP-Harz, das frei von Halogenen und CMR Substanzen (Antimontrioxid) ist. Es zeichnet sich durch eine geringere Dichte im Vergleich zu anderen feuerhemmenden Produkten aus. Es ist ökoeffizient mit einer 13%igen Reduktion der CO₂-Emissionen und konform mit den Prüfstandards CEN TS 45545 Teil 2 und der DIN 5510. Die Brandschutzeffizienz ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Fig. 1: Fireblock Performances

According to CEN TS 45545 Railway standard

Fireblock resin + gel coat: HL3 level



Konform mit CEN TS 45545 Teil 2 auf höchstem Brandschutzlevel (Hazard Level) HL3 für Verkehrsmittel

Tabelle 6: Brandschutzmatrix NORSODYNE, erreichte Werte gem. DIN 5510: S4, SR2, ST2

Brennbarkeitsklasse	Rauchentwicklungsklasse	Tropfbarkeitsklasse
Bewertet wird die zerstörte Länge	Integral der Rauchdichte	ST1 - tropft/fällt brennend ab, Nachbrennzeit der Tropfen > 20 s
S2 ≤ 30 cm, Ablöschen ist zugelassen	SR1 nicht erreicht > 100 %*min	ST2 - tropft/fällt nicht oder nicht brennend ab
S3 ≤ 25 cm, Nachbrenndauer ≤ 100 s, kein Einzelwert ≥ 120 s	SR1 ≤ 100 %*min	
S4 ≤ 20 cm, Nachbrenndauer ≤ 10 s	SR2 ≤ 50 %*min	
S5 0 cm, Nachbrenndauer 0 s *)		

*) Organische Schichten von nominell <0,3 mm in Verbundwerkstoffen sind bei der Auswertung der zerstörten Länge nicht zu berücksichtigen. Die Gültigkeit der Prüfzeugnisse beträgt 3 Jahre.

Die Analyse zum Tragverhalten der mit der Brandschutzmatrix gefertigten Profile bestand aus Untersuchungen der Festigkeit- und Steifigkeitseigenschaften unter Zug- und Biegebeanspruchungen. Die Fertigung und die mechanischen Untersuchungen der Profile wurden im Faserinstitut Bremen durchgeführt. Hier standen die erforderlichen technischen Gerätschaften (Pultrusionsanlage, geeignete Prüfmaschinen) zur Verfügung.

4.3.1 Verwendete Materialien

Die Kennwerte laut Herstellerangaben sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 7: Verwendete Materialien

Fasern:	E-Glas 2400 tex von P-D Glasseiden
Matrix:	FIREBLOCK NORSODYNE P 81091 TF von CCP COMPOSITES US LLC, Kansas City
Beschleuniger:	Trigonox C von Akzo Nobel (1%)
Trennmittel:	FORM Treil INT-270 von Lange und Ritter (1%)

Tabelle 8: Matriceigenschaften NORSODYNE P 81091

Mechanische Eigenschaften gem. ISO 527 (1999)

Festigkeit:	25 MPa
Modul:	3479 MPa
Bruchdehnung:	0,72 %

Biegeeigenschaften gem. ISO 178 (2003)

Biegefestigkeit:	60 MPa
Biegemodul:	3276 MPa

4.3.2 Herstellung und Untersuchung von Prüfkörpern

Um die Verbundeigenschaften der verwendeten Glasfasern und der Matrix zu ermitteln, wurden Standardprüfkörper pultrudiert und diese mechanischen Prüfungen wie Zug-, Biege- und Schlagzähigkeitsuntersuchungen unterzogen. Für die Fertigung der Profile stand ein Werkzeug zur Verfügung mit dem rechteckige Probenkörper mit den Abmessungen 10 mm x 2 mm hergestellt werden konnten. Das Werkzeug ist mit einer Kühlzone ausgestattet, die bei längeren Versuchsabläufen zu einer optimalen Ausnutzung der Topfzeit des verwendeten Matrixsystems führt.

Die Versuchsanordnung wurde in der Technikumsanlage des FIBRE aufgebaut und ausgerichtet. Die Glasfaserrovings wurden durch die Harzwanne und das Werkzeug bis zu der Abzugsvorrichtung der Pultrusionsanlage hindurchgeführt. In dem Harzbad wurde die Faser einmal umgelenkt, um die Benetzung mit der Matrix zu verbessern. In allen Versuchen wurde der Versuchsaufbau unter einer Absaugvorrichtung eingehaust, um Styroldämpfe des ungesättigten Polyesterharzes wirkungsvoll abzusaugen.

Bei der Verarbeitung stellte sich der hohe Feststoffanteil des Brandschutzharzes von 70% als Nachteil dar. Die damit verbundene höhere Viskosität führt zu einer schlechteren Benetzung der Glasfasern im Kern eines Rovings. Die gefüllte Brandschutzmatrix führt zu einem Abscheren von Glasfasern am Eingang des Pultrusionswerkzeuges, so dass der Faseranteil im Profil von 70% auf unter 50% herabgesetzt werden musste. Das Schliffbild in Abbildung 51 zeigt die Füllstoffe in der Brandschutzmatrix. Durch den Volumenbedarf der Füllstoffe wird ersichtlich, dass der Faservolumengehalt der Profile herabgesetzt werden muss.

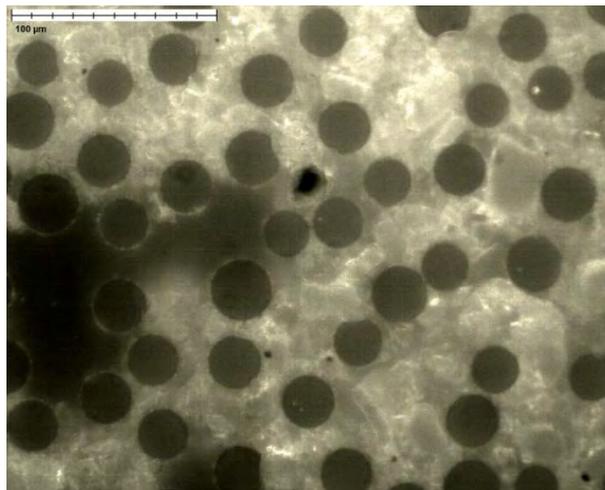


Abbildung 51: Querschliff eines Bauteils mit Brandschutzmatrix

Die so gefertigten und vorbereiteten Proben wurden anschließend im Normklima des Prüflaboratoriums des Faserinstituts klimatisiert und dann den eigentlichen Prüfungen zugeführt. Die Prüfmethode sowie die zugrundeliegenden Normen sind der *Tabelle 4* zu entnehmen.

Tabelle 9: Angewendete Normen

- Klimatisierung der Proben gem. DIN EN ISO 14125
- Zugprüfungen gem. DIN EN ISO 527
- Biegeprüfungen gem. DIN EN ISO 291
- Schlagzähigkeit gem. DIN EN ISO 179
- Brandschutzprüfung gem. AITM2-0002_2009-03

4.3.3 Ergebnisse

Die ermittelten Kennwerte der mechanischen Untersuchungen sind der *Tabelle 5* zu entnehmen. Durch die Reduktion des Faservolumengehaltes sind die mechanischen Zugeigenschaften der Proben mit Brandschutzmatrix signifikant verringert. Die Zugfestigkeit beträgt ein Drittel gegenüber den Profilen ohne Brandschutzmatrix. Alle anderen Kennwerte sind ebenfalls verringert.

Tabelle 10: Gegenüberstellung der Verbundeigenschaften mit / ohne Brandschutz aus pultrudiertem Probenmaterial 10 x 2 mm (Kennwerte jeweils in 0°-Richtung)

Ohne Brandschutz	Kennwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
Zugfestigkeit	1.453,75 MPa	61,05 MPa	4,2 %
Zugmodul	58.096,16 MPa	1.894,05 MPa	3,26 %
Biegefestigkeit	936,69 MPa	105,74 MPa	11,29 %
Biegemodul	50.537,89 MPa	868,53 MPa	1,72 %
Schlagzähigkeit	387,82 KJ/mm ²		56,76 %

Mit Brandschutz	Kennwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
Zugfestigkeit	485,69 MPa	16,01 MPa	3,30 %
Zugmodul	34.324,15 MPa	1.345,78 MPa	3,92 %
Biegefestigkeit	597,24 MPa	57,32 MPa	9,60 %
Biegemodul	28.252,08 MPa	396,74 MPa	1,40 %
Schlagzähigkeit	245,20 KJ/mm ²		14,81 %

Im Vergleich mit kommerziell hergestellten Pultrusionsmaterialien werden jedoch bei den Profilen mit Brandschutzmatrix hinreichend hohe mechanische Kennwerte erzielt (*Tabelle 11*). Für die Simulation wurden aus Sicherheitsgründen noch weiter abgeschwächte Langzeitbemessungswerte zu Grunde gelegt.

Tabelle 11: Vergleich der im FIBRE gemessenen Werte mit aus der Literatur bekannten Werten

	Mit Brandschutzmatrix ermittelte Kennwerte Quelle: FIBRE	Literaturwerte Quelle: FIBERLINE	In der Simulation verwendete Langzeitbemessungswerte Quelle: FIBERLINE
Zugfestigkeit (0°)	486 MPa	240 MPa	75 MPa
Zugmodul (0°)	34.324 MPa	23.000 MPa	
Biegefestigkeit (0°)	597 MPa	240 MPa	75 MPa

Durch die in der mechanischen Prüfung erzielten Kennwerte ist eine gegenüber den Langzeitbemessungswerten ausreichende Sicherheit gegeben.

Die Wirkungsweise der gefüllten Brandschutzmatrix wird hier in *Abbildung 52* dargestellt. Beide Proben weisen die Abmessungen 2 x 10 mm auf und wurden für jeweils 60 Sekunden mit einer offenen Flamme beaufschlagt. Die links dargestellte Probe brannte 100 Sekunden nach, die Matrix ist vollständig zerstört. Die Probe mit Brandschutz (rechts) bildete durch chemische Umwandlungsprozesse eine sauerstoffarme Schutzschicht. Ein Weiterbrennen nach der Beflammung war nicht feststellbar.



Abbildung 52: Gegenüberstellung des Ergebnisses von Brandprüfungen ohne und mit Brandschutzmatrix

5 Herstellung der Fensterrahmenprofile

Die Rohdaten des berechneten und simulierten Fensterrahmenprofils wurde dem Werkzeugbauer übergeben. Es wurde ein vierteiliges Werkzeug mit einer Kühlzone angefertigt (*Abbildung 53*).

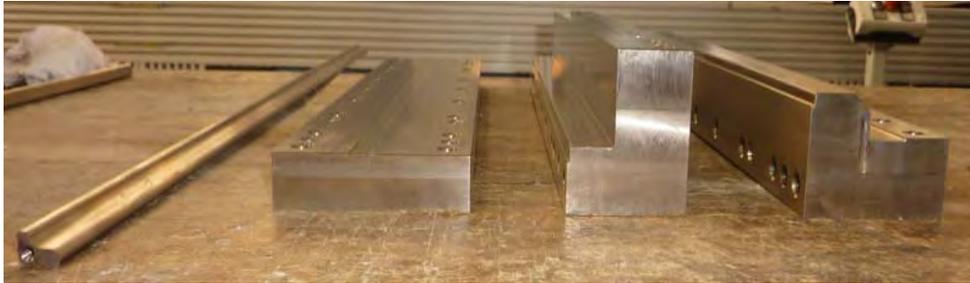


Abbildung 53: vierteiliges Pultrusionswerkzeug zur Fertigung der Fensterrahmen

Für die Vorbereitung der Profilverfertigung waren folgende Arbeitsschritte durchzuführen:

- Umspulen des Fasermaterials
- Bau der Führungs- und Leitelemente
- Anpassung der Harzwanne
- Bau der Kernhalterung
- Anfertigung der formschlüssigen Abziehvorrichtungen
- Aufbau und Ausrichtung der Anlagen und des Werkzeugkerns
- Einziehen und Durchschleusen der Fasern



Abbildung 54: Spulengatter mit insgesamt 296 verwendeten Rovingspulen



Abbildung 55: Einschleusen des Fasermaterial mit Zugbändern, Kernhalterung mit Kern



Abbildung 56: Führung im Harzbad mit Umlenkung der Glasfasern



Abbildung 57: Fensterprofilrahmen in der Abzugsvorrichtung



Abbildung 58: Versuchsaufbau mit Schutzfolien und Absaugvorrichtung

5.1 Versuchsdurchführung

Das Werkzeug wurde, wie im Vorversuch, auf 160 Grad aufgeheizt. Das gemischte Matrixsystem wurde in vorgesehene Harzwanne gegeben und der Versuch mit einer Abzugsgeschwindigkeit von 15 cm/min gestartet. Im Verfahrensablauf mit der Technikumsanlage sind die Maschineneinstellungen und die Spulen auf ihre einwandfreien Abrollbedingungen zu überwachen. Der noch unverfestigte Faserstrang muss manuell auf Spannung gehalten werden, damit der Prozess nicht zum Stillstand kommt. Im weiteren Verlauf sind die Profile abzutrennen.

Die Führungselemente sind zu überwachen, da abgelöste Glasfaserfilamente sich hier ansammeln und im weiteren Verlauf zu Prozessstörungen führen können (*Abbildung 59*). In besonderen Fällen kann es auch zu einem Abriss eines einzelnen Rovings kommen, der dann zu einer Verringerung des Faservolumengehaltes im Profil führt (*Abbildung 60*).



Abbildung 59: Verengung der Führungsbohrungen durch Filamentablagerungen



Abbildung 60: Abgerissener Roving.

Nach ca. zwei Stunden Versuchsdauer wurden ersten Veränderungen an der Oberfläche des Profils ersichtlich, die Oberfläche wurde zunehmend uneben und rauer. Dies deutete darauf hin, dass Harzreste an der Werkzeugoberfläche festgebacken waren. Daraufhin wurde eine Reinigung, das sogenannte Purge-Verfahren, durchgeführt. Dabei wird der Vorschub für einen kurzen Zeitraum (ca. 10 s) unterbrochen. Durch dieses Vorgehen sollen Harzrückstände an das Profil gebunden werden die bei dem Wiedereinsetzen des regulären Vorschubs von der Werkzeugoberfläche entfernt werden. Ein erstes Purgen führte zu keiner Verbesserung der Profiloberfläche. Bei einem weiteren Purgevorgang mit längerer Unterbrechungszeit wurde der Werkzeugkern derart in das Profil eingebunden, so dass bei Wiederaufnahme des Vorschubs die vordere Kernhalterung deformiert wurde. Der Versuch musste darauf hin abgebrochen werden.



Abbildung 61: Ablagerungen auf der Profiloberfläche.

In einer zweiten Versuchsreihe sollte mit einer höheren Abzugsgeschwindigkeit von 35 cm/min einer Verminderung der Oberflächenqualität in Form von Matrixanhaftungen entgegengewirkt werden. Die Schwachstelle der Kernhalterung aus Aluminium sollte durch ein zusätzliches Stützelement aus einem Winkelprofil aus Stahl behoben werden.

Das Werkzeug und sämtliche Führungselemente und Bohrungen zur Aufnahme der Glasrovings wurden mit einem Trennmittel der Firma „AIRTECH“ beschichtet, um die Reibung und das Anhaften der Matrix zu minimieren.

Durch zu hohe Abzugsgeschwindigkeiten erfolgte die Aushärtung der Matrix mit der damit verbundenen Schwindung außerhalb des Werkzeugs. Innere Spannungen führten daher zur Krümmung der Profile. Mit der geringeren Abzugsgeschwindigkeit wie in der ersten Versuchsreihe wird dieses Problem beseitigt werden können. Um die Oberflächenqualität beizubehalten, muss die Werkzeugoberfläche hartverchromt werden.

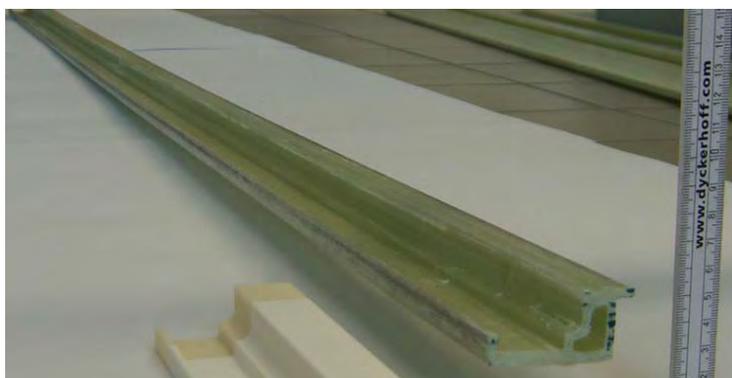


Abbildung 62: Krümmung eines 2,5 m langen Profils

5.2 Analyse Fertigungsqualität

Weitere Probleme in den gefertigten Profilen stellten Querrisse dar, die unregelmäßig von dem unbeheizten Werkzeugkern ausgehen. Lichtmikroskopische Untersuchungen der Querschnittsflächen ergeben keinen Hinweis auf eine inhomogene Verteilung von Glasfasern innerhalb des Profils. Es wird daher von thermisch induzierten Spannungen im Bauteil ausgegangen.



Abbildung 63: Normale Faserverteilung



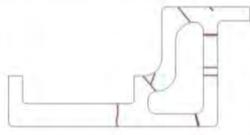
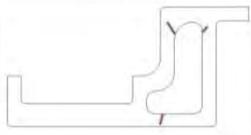
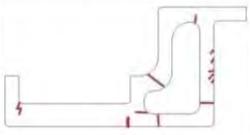
Abbildung 64: Riss mit Verzweigungen



Abbildung 65: Durchgehender Riss

Die sich bildenden Risse waren im Versuchsablauf nicht statisch fixiert, sondern um den Kern umlaufend. Nachdem während des Versuchs ein stationärer Zustand erreicht wurde, waren das Auftreten und die Ausdehnung der Risse am geringsten
Tabelle 12.

Tabelle 12: Qualität der Profile über Versuchsdauer

	Probe 1 Anfang	Probe 2 Mitte	Probe 3 Ende
Risslage			
Qualität der Ränder	++	+	-
Faserverteilung	+	++	+
Risse	-	+	--
Harzansammlungen	+	-	-
Luft einschlüsse	++	-	+

Als Ursache können zunächst Veränderungen in der Matrix angenommen werden. Durch mögliche Volumenänderungen, hervorgerufen durch chemische Umbau-mechanismen bei der Aushärtung der Matrix, können Schwindungsrisse entstehen. Dies wird begünstigt, wenn bei einer inhomogenen Aushärtung die im Material entstehenden Zugspannungen dessen Zugfestigkeit übersteigen (*Abbildung 66*). Ebenfalls können dadurch Eigenspannungen im Material entstehen, die zu einer Krümmung der Profile führen. Des weiteren addiert sich hierzu der thermische Schrumpf durch die vorherrschenden Aushärtetemperaturen (Werkzeugtemperatur 160°C).

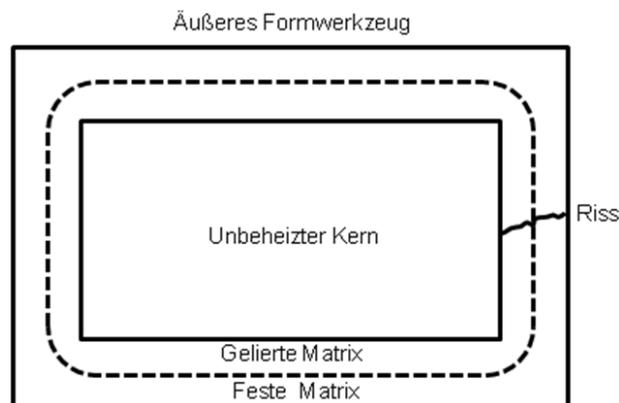


Abbildung 66: Schwindungsrisse, Schematische Schnittdarstellung des Pultrusionswerkzeuges

Ein größeres Problem bei der Rissbildung stellt der unbeheizte Werkzeugkern dar. Durch das mit Raumtemperatur in das Werkzeug einströmende Glasfaser-/ Harz-

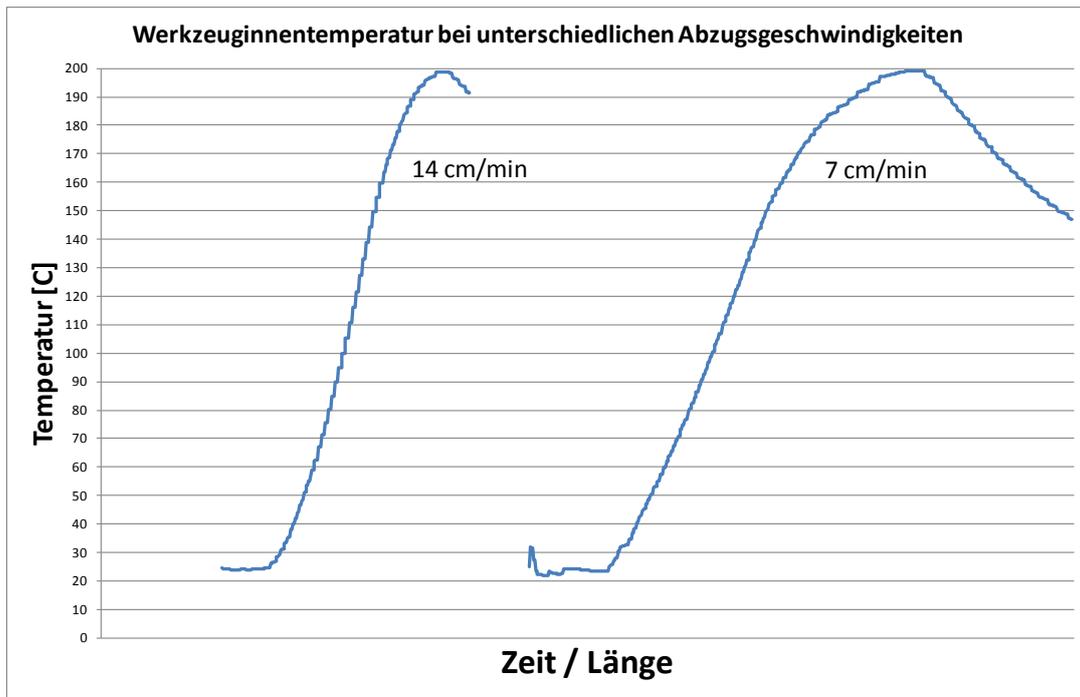


Abbildung 69: Temperaturverlauf im Pultrusionswerkzeug

Dielektrische Analyse (DEA) im Pultrusionswerkzeug

Durch die Dielektrische Analyse (DEA) kann das Aushärtungs- und Verarbeitungsverhalten von Polymeren in Echtzeit untersucht werden. Die Dielektrische Analyse liefert Daten über das Verhalten eines Dielektrikums in einem elektrischen Wechselfeld. Hierzu bedient man sich des Prinzips eines Kondensators. Das zu untersuchende Material befindet sich dabei in direktem Kontakt mit einem dielektrischen Sensor, der aus zwei Elektroden besteht. Kunststoffe sind Dielektrika und nicht elektrisch leitfähig. Dennoch kann eine Spannung durch die Ionen und Dipole im Material gemessen werden (verursacht durch z.B. Verunreinigungen). Die Materialien werden dabei bezüglich ihrer Ionenviskosität, die aus dem dielektrischen Verlustfaktor berechnet wird, getestet. Die Ionenviskosität erscheint als Funktion der Zeit und der Temperatur.

Grundsätzlich werden Sensoren benutzt, bei denen sich das zu analysierende Dielektrikum zwischen zwei Elektroden befindet. An einer dieser Elektroden ist eine elektrische Wechselspannung angelegt, die zweite Elektrode dient als Empfänger. Es baut sich dadurch ein elektrisches Wechselfeld auf, dessen Feldlinien in das zu untersuchende Material eindringen. Entlang dieser Feldlinien finden sowohl Ionenwanderungen als auch Dipolschwingungen statt. In der Regel liegt der Durchmesser der Zone, in die die Feldlinien eindringen, in der gleichen Größenordnung wie der Elektronenabstand. Die vorhandenen Ionen wandern dabei zur Elektrode mit entgegen gerichteter Ladung.. Für die Untersuchungen wurde ein Plattenkondensator verwendet.

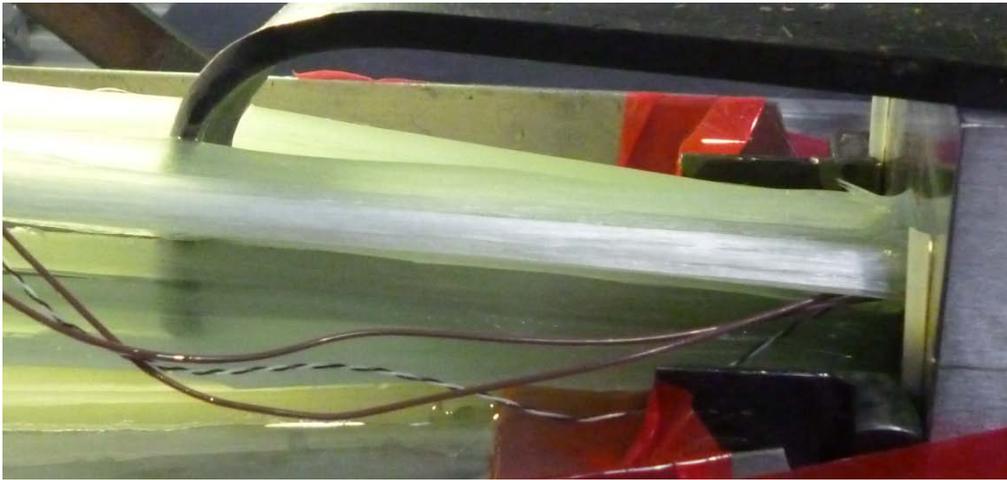


Abbildung 70: Messkabel Dielektrischer und Thermischer Sensoren

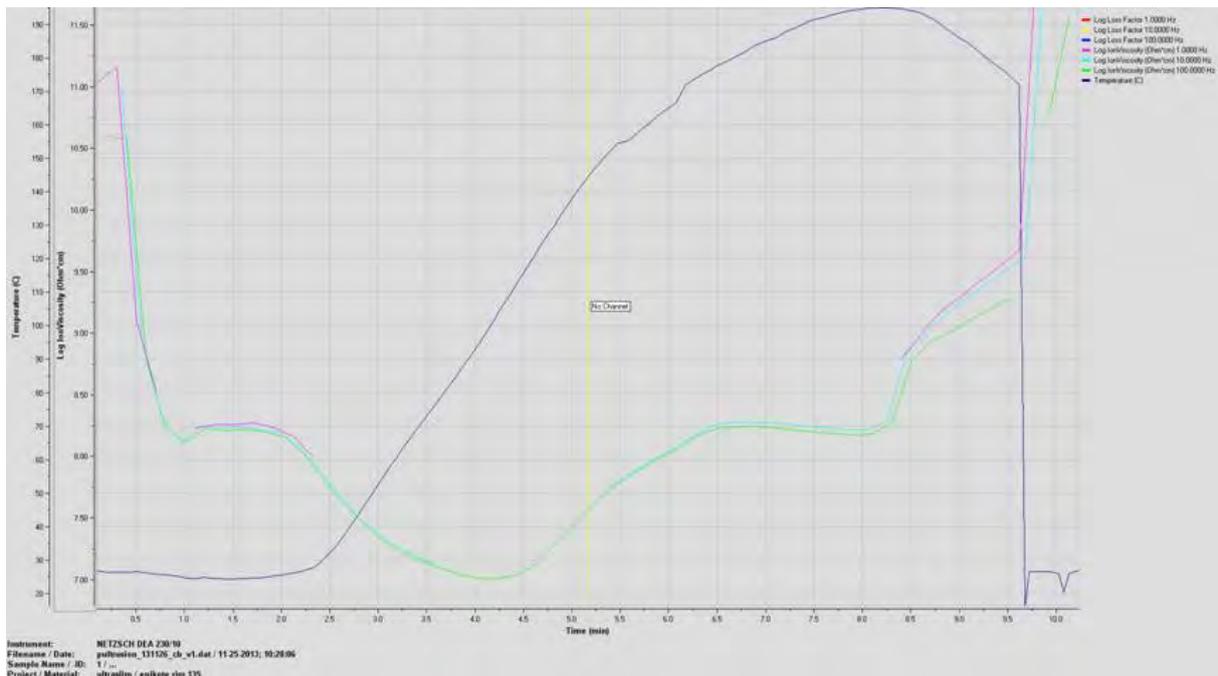


Abbildung 71: Prüfergebnis Dielektrische Analyse im Pultrusionswerkzeug

5.3 Herstellung von Profilen mit geänderter Geometrie

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben wurde, ist die ursprünglich entwickelte Profilgeometrie nochmals überarbeitet worden. Nach den am Pultrusionswerkzeug durchgeführten Änderungen wurde in einer zweiten Versuchsreihe weitere Profile im FIBRE gefertigt. Um der vorher beschriebenen Problematik des Verzuges und der Rissbildung vorzubeugen wurde hierfür ein bekanntes und für die Pultrusion spezifiziertes Harzsystem der Firma Lange und Ritter eingesetzt. Es zeichnet sich durch eine gute Reaktionskinetik und niedrigen Schrumpf aus.

Die Fertigung der Profile erfolgte mit den identischen Rahmenbedingungen wie in der ersten Versuchsreihe. Erwartungsgemäß konnten nun rissfreie und ungekrümmte Profile erstellt werden. Die Maßhaltigkeit der Profile lag durchgehend im Bereich kleiner 0,2mm (siehe Tabelle 13 im Anhang). Diese Profile wurden der Forschungsstelle 2 zu weiteren Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

5.4 Mechanische Kennwerte der Profile und Abgleich mit Simulation

Neben den Materialkennwerten die an normierten Proben mit entsprechenden Prüfnormen ermittelt werden, sind in diesem vorliegenden Fall ebenfalls bestimmte Bauteilkennwerte von Bedeutung. Insbesondere gilt es die simulierten Kennwerte mit realen Messwerten zu verifizieren. Im Folgenden wird der Widerstand der Profile gegen Windlasten (Druck und Sog) überprüft: die Belastungsfähigkeit der Sicherheitsleiste, die ein mögliches Abgleiten der Fensterscheiben bei Versagen der Verklebung verhindern soll, sowie die Gesamtdurchbiegung der Profile, die Hinweise auf die Verformung bei Windsog gibt.

Für die Versuchsreihen wurden an verschiedenen Produktionsstellen Proben genommen. Die Proben waren Profilabschnitte mit einer Länge von 50 mm. Die Schnittkanten wurden geschliffen und poliert, um eine mögliche Kerbwirkung zu minimieren. Für die Winddruck- und -sog- Untersuchungen wurden auf der Kontaktfläche Rahmen/Scheibe ein metallischer Hebelarm mit den Abmessungen 50 * 120 * 10 mm aufgeklebt. Mit diesem Hebel sollte das Moment, das eine sich durchbiegende Scheibe auf den Rahmen ausübt, simuliert werden. Die Probestücke wurden in der Universalzugprüfmaschine in der Einbausituation fixiert (Abbildung 72). Für die Simulation von Winddruck wurde der Hebel auf Druck belastet, für die Simulation des Windsogs wurde der Hebel auf Zug belastet. Vereinfachend wurden die folgende Annahmen getroffen:

- Die größte Durchbiegung findet in der Rahmenmitte statt.
- Die Fensterbeschlagelemente sind in der Rahmenmitte angebracht.
- Die Beschläge sind unendlich steif.



Abbildung 72: Einbausituation für Probeelemente zur Aufbringung simulierter Momente (Winddruck)

Die ermittelten Kennwerte sind in der folgenden Tabelle dargestellt

	Maximalkraft [N]	Standardabweichung [N]	Variationskoeffizient [%]
Druck (Winddruck)	102,18	3,88	3,80
Zug (Windsog)	136,32	13,59	9,97

Das in dieser Versuchsreihe ermittelte, mindestens ertragene Moment betrug 9,9 Nm. Aus der Simulation der Scheibendurchbiegung ergab sich rechnerisch ein maximales Moment von 11 Nm. Der Rahmen wäre somit bei maximaler Windlast bruchgefährdet.

Entgegen der in der Simulation getroffenen Annahme wurden bei der Prüfung die Profilelemente nicht eingeklebt. Dadurch fehlt die Stützwirkung, es kommt zu einer Relativbewegung in der Fuge. Hierdurch wird das beaufschlagte Moment auf eine wesentlich kleinere Querschnittsfläche übertragen, es kommt dadurch zum kritischen Versagen des Profils. Eine Verklebung erbringt in diesem Fall eine höhere Festigkeit.

Für das Profil wurde eine Sicherheitseinrichtung vorgesehen, die im Falle eines Versagens der Klebung zwischen Scheibe und Rahmen ein Abgleiten der Scheibe verhindern soll. Die Sicherheitsvorrichtung in Form eines Steges muss im Ausnahmefall die gesamte Masse der Glasscheibe tragen können. Zur Ermittlung der Bruchkräfte wurden Rahmenelemente in der Zugprüfmaschine eingespannt und die Sicherheitsstege bis zum Bruch belastet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 73 dargestellt.

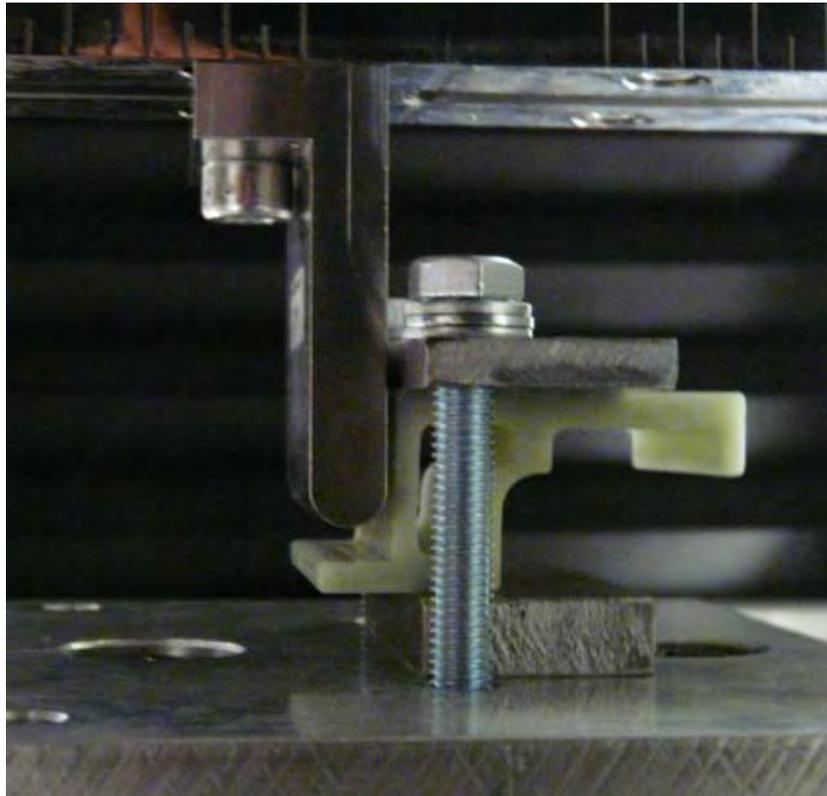


Abbildung 73. Versuchsaufbau zum Abscheren der Sicherheitsvorrichtung

Der Belastungstest ergibt eine maximale Streckenlast von über 20 N/mm. Unter Berücksichtigung von Verschwächungsbeiwerten und einer nicht ebenen Auflage der Scheibe kann von einer ausreichenden Belastbarkeit des Sicherheitssteges ausgegangen werden.

	Maximalkraft [N]	Standardabweichung [N]	Variationskoeffizient [%]
Bruch des Steges	1031,20	61,01	5,92

Durchbiegung des Rahmenprofils

Um Aussagen zur Steifigkeit und Nachgiebigkeit des Profilrahmens treffen zu können wurden Teilelemente des Rahmens einer Drei-Punkt-Biege Prüfung unterworfen. Die Hauptbelastungsrichtung beträgt 90° zur Scheibenebene, so dass die Verformung des Rahmen/Scheibe - Komplexes bei Windlast überprüft werden kann. Der Versuchsaufbau wurde mit einem regulärem Drei-Punkt-Biege-Prüfstand realisiert (Abbildung 74). Der Auflagerabstand betrug 255 mm.



Abbildung 74: Aufbau zur Prüfung der Durchbiegung der Fensterrahmen

Eine elastische Verformung des Fensterrahmenprofils konnte bis zu einer Biegelast von 5 kN beobachtet werden. Bei höheren Belastungen kam es dann zur plastischen Verformung im Bereich der Auflager (Abbildung 75). Der Biegeversuch wurde bei einer Biegelast von 7 kN abgebrochen um mögliche Beschädigungen der Prüfeinrichtung zu vermeiden. Die Struktur der Probekörper blieb unbeschädigt, bis zum vollständigen Bruch der Profile sind höhere Kräfte zu erwarten. Aus den Kraft-Weg-Diagrammen ergab sich bei der Belastung der Profile mit 5 kN eine mittlere Durchbiegung von 1,3 mm, bei einer Stützweite von 225 mm. Aus der Simulation der Scheibendurchbiegung ergibt sich aus der größten angenommenen Windlast eine Maximalkraft (ermittelt durch Aufsummierung der einzelnen Knotenelemente) von 1430 N. Bei dieser Kraft ergibt sich aus dem Kraft-Weg-Diagramm eine Durchbiegung von 0,4 mm. Auf eine Stützweite von 1m hochgerechnet beträgt somit die Rahmendurchbiegung bei maximaler Windlast 1,76 mm. Ob damit die nachhaltige Dichtigkeit des Fensters gegeben ist hängt von den Dichtungsparametern ab. Sinnvoll wäre der Einsatz weiterer Beschlag- oder Zuhalteelemente, gegebenenfalls muss eine weitere Versteifung des Profils vorgesehen werden.

Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass die gemessenen mechanischen Kennwerte gut mit den simulierten Werten übereinstimmen. Das in diesem Projekt entwickelte Fensterrahmenprofil könnte so zur Anwendung kommen. Zu klären sind jedoch weitere Anforderungen wie Beschlag- und Zuhaltesysteme sowie der Platzbedarf zur mechanischen Ansteuerung der Beschlagelemente. Die Abführung von Kondensat und Regenwasser (Schlagregen) ist ebenfalls zu überprüfen.



Abbildung 75: Durch Auflager im Biegeversuch beschädigte Probenoberfläche

6 Bau eines Demonstrators

6.1 Zielsetzung

Mit dem Bau eines Demonstrators wurden mehrere Ziele verfolgt. Zum Einen stellte der Messeauftritt auf der BAU2013 im Januar 2013 in München ein wichtiges Zwischenziel des Forschungsvorhabens dar. Auf der Weltleitmesse für das Bauwesen sollte nach einjähriger Laufzeit des Forschungsvorhabens ULTRASLIM das Zwischenergebnis einem Fachpublikum präsentiert werden. Anhand eines Funktionsprototyps sollte Kritik gesammelt und eventuelle Anregungen festgehalten werden.

Zum Anderen war ursprünglich vorgesehen, an diesem Funktionsprototypen nach Ausstellung auf der Messe bautechnische Messungen vorzunehmen. Hierfür erwiesen sich die Fertigungstoleranzen dieses Prototyps jedoch als zu groß.

6.2 Bau des Messedisplays

Das ULTRASLIM-Fenster sollte zur Demonstration in ein Messedisplay eingebaut werden. Das Display wurde nach Entwurf durch das Team der FH Dortmund aus einer Holz-Unterkonstruktion erstellt, die zur Beschwerung und Erhöhung der Standsicherheit Wasserkanister aufnehmen kann. Die Außenseiten wurden dann mit mattschwarz beschichteten PCV-Integralschaum-Platten verkleidet.



Abbildung 76: Messedisplay, Herstellung und Vormontage ohne Verkleidung

6.2.1 Bau des Konzept-Demonstrators

Blend- und Flügelrahmen wurden aus am Faserinstitut Bremen pultrudierten GFK-Profilstücken gefertigt. Die an der FH Dortmund auf Gehrung gesägten Profilstücke wurden an den Ecken mit einem Hybrid-Konstruktionsklebstoff (3M Scotch-Weld 7172 B/A) strukturell verklebt. Zur Vorbehandlung wurden die Klebeflächen mit Isopropanol (70%) entfettet, mit Faservlies (3M Scotch-Brite CF-HP) angeraut und dann wieder mit Isopropanol abgewischt. Das Aushärten der Klebungen erfolgte innerhalb von 24 h bei Raumtemperatur. Anschließend wurde der überschüssige Klebstoff abgeschliffen.



Abbildung 77: Geklebter GFK-Rahmen



Abbildung 78: Vormontage Beschläge

Eine 1 m auf 1 m große Scheibe Pilkington Spacia Vakuumisoler-Verglasung wurde im zu verklebenden Randbereich mit Isopropanol entfettet und umlaufend mit 3M VHB-Klebeband für Structural-Glazing-Anwendungen versehen. Auf das Auftragen des hierbei üblichen Silan-Glasprimers wurde bewusst verzichtet, da das Fenster nicht dauerhaft im Außenbereich eingesetzt werden sollte. Das ohne Primer geklebte VHB-Tape lässt sich - mit einigem mechanischen Aufwand - notfalls später wieder lösen, und die Scheibe könnte für einen anderen Prototypen verwendet werden.



Abbildung 79: Scheibe mit VHB-Tape vor und nach Zuschnitt

Der GFK-Flügelrahmen wurde zur Vorbereitung auf allen Klebeflächen mit Isopropanol entfettet, mit Faservlies aufgeraut und abschließend wieder mit Isopropanol abgewischt. Nach Auflegen der Scheibe wurden Rahmen, Klebeband und Scheibe durch Anpressen mit einem Rollwerkzeug dauerhaft verbunden. Dieser Montageschritt erfolgte in den Laboren der 3M Deutschland GmbH in Neuss.



Abbildung 80: Verkleben und Anpressen von Scheibe und Rahmen mit VHB-Klebeband

Im letzten Abschnitt der Vormontage wurden vier Parallelausstell-Scharniere der Firma Cotswold über strukturelle Klebungen am Flügelrahmen angebracht. Die Führungsschienen der Scharniere konnten aufgrund der Profilgeometrie nicht direkt aufgeklebt werden, sondern bedurften einer Aufständerung mit ca. 2 mm starken GFK-Streifen. Wieder wurde der Hybrid-Konstruktionsklebstoff 3M Scotch-Weld 7172 B/A eingesetzt, um eine hohe Anfangsfestigkeit zu erzielen und bei diesen schwierigen Bedingungen (Aufständerung) eine optimale Stärke der Klebschicht zu gewährleisten. Die Aushärtung erfolgte innerhalb von 48 h bei Raumtemperatur.



Abbildung 81: Kleben der Scharniere an den Rahmen, Aushärtung

Zur reversiblen Befestigung wurde der Blendrahmen mit Bohrungen versehen, durch welche die fest mit dem Flügelrahmen verklebten Scharniere mit der Holzkonstruktion des Messedisplays verschraubt werden können. Die selbstklebenden Sanierungsdichtungen der Firma Deventer wurden abschließend auf die dafür vorgesehenen Stellen aufgebracht und das Fenster zum Transport verpackt. Die abschließenden Montageschritte erfolgten direkt auf dem Messestand der Forschungsinitiative ZukunftBAU.

6.2.2 Messeauftritt

Vom 14. bis 19. Januar 2013 betreute das Team der Fachhochschule Dortmund den Messeauftritt des Forschungsvorhabens ULTRASLIM. Das ULTRASLIM-Fenster-system erfuhr auf der BAU2013 eine sehr positive Resonanz.



Abbildung 82: BAU2013 – Vormontage des Messedisplays



Abbildung 83: Bau2013 - Einsetzen der Rahmen in das Messedisplay



Abbildung 84: Justieren der Öffnungsmechanik



Abbildung 85: BAU2013 - Aufbringen des ULTRASLIM-Logos



Abbildung 86: BAU2013 - fertiggestelltes Messedisplay



Abbildung 87: BAU2013 - Herr Prof. Rogall erläutert Herrn Dr. Ramsauer den Aufbau der im Faserinstitut pultrudierten GFK-Profile



Abbildung 88: BAU2013 - Besucher am fertiggestellten Messedisplay



Abbildung 89: BAU2013 - Fachgespräch am Messestand



Abbildung 90: BAU2013 - Messebesucher am ULTRASLIM-Display

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines sehr schlanken und energieeffizienten Fassaden- und Fensterprofils zur Aufnahme von Vakuumisoliergläsern. Das Projekt stützte sich dabei auf aktuelle Entwicklungen kostengünstiger Vakuumverglasungen (VIG) mit sehr guten U-Werten in Verbindung mit faserverstärkten Kunststoffen (FVK) und einer Klebtechnik. Im vorliegenden Projekt wurde ein schlankes und leichtes Fenstersystem entwickelt, das durch seine Leichtbauweise insbesondere für die Altbausanierung interessant ist.

Die innerhalb des Projekts entwickelten Fensterrahmenprofile wurden mittels der Finite-Elemente-Methode auf ihre mechanischen Anforderungen gegenüber Gewichtsbeanspruchungen und Windlasten überprüft und optimiert. Aus den Konstruktionsdaten wurden Pultrusionswerkzeuge angefertigt und Profile im Technikumsmaßstab produziert. Eine abschließende Überprüfung der Profile in verschiedenen Zug- und Druckversuchen auf definierte Festigkeitseigenschaften ergaben eine wesentliche Bestätigung der simulierten Kennwerte. Das in diesem Projekt entwickelte Fensterrahmenprofil entspricht somit den gestellten Anforderungen.

Die baulichen Mindestanforderungen an den Brandschutz wurden innerhalb des Projektes untersucht und dargestellt. In begleitenden Untersuchungen sind Standardprobekörper mit unterschiedlichen Matrixsystemen pultrudiert und deren mechanischen Eigenschaften in Zug-, Biege- und Schlagzähigkeitsuntersuchungen bestimmt worden. Brandhemmende Pultrusionsharze die z. B. im Schienenfahrzeugbau Anwendung finden, ergaben niedrigere Festigkeitskennwerte. Dies wurde bei der Simulation der Rahmenprofile berücksichtigt.

Aus den angefertigten Profilen wurden Demonstratoren hergestellt und zu einem Messemodul aufgebaut. Das im Projekt entwickelte ULTRASLIM-Fenstersystem konnte so erstmalig auf der Messe BAU2013 in München der Öffentlichkeit vorgestellt werden. Die positive Resonanz zeigte auch, dass entgegen der Aussagen großer Fensterhersteller durchaus eine Nachfrage nach schlanken VIG-Fenstern besteht.

Ein derzeit noch bestehendes Problem ist die fehlende bauaufsichtliche Zulassung der VIG-Scheiben in Deutschland. Pilkington, der Hersteller der im ULTRASLIM-Fenster eingesetzten VIG-Scheibe Spacia, hat nach eigenem Bekunden ein Interesse daran, das VIG weiter zu optimieren und auch in Deutschland eine bauaufsichtliche Zulassung zu erlangen. Das flexible ULTRASLIM-Fenstersystem ist geeignet neu- und weiterentwickelte VIG-Scheiben aufzunehmen. So ist etwa zur Verbesserung des U-Wertes nur ein kostengünstiger Austausch der Scheibe erforderlich, während Flügelrahmen, Blendrahmen und Baukörperanschluss beibehalten werden.

Durch die Integration einer „Euro-Nut“ in die pultrudierte Rahmenstruktur können unterschiedliche Mechaniken aufgenommen und somit zahlreiche Öffnungsarten realisiert werden. Zu klären sind jedoch weitere Anforderungen an den Platzbedarf zur mechanischen Ansteuerung von Verriegelungen und Verschlüssen sowie von möglichen Eckmünlungen. Die Abführung von Kondensat und Regenwasser (Schlagregen) ist ebenfalls zu untersuchen.

8 Literatur

8.1 Einsatz von Faserverbund-Kunststoffen im Bauwesen

Genzel, Elke; Bastian Martin:

Bauen mit Kunststoffen

Artikel aus der Zeitschrift Baukultur Nr. 3, 2011, S. 18-20

Sieder, Mike:

Bauen mit Membranen - Ein Überblick.

Artikel aus der Zeitschrift Baukultur Nr. 3, 2011, S.30-32

Krahwinkel, Manuel; Gehmert, Christian:

Bauteile aus Kunststoffen im Bauwesen

Artikel aus der Zeitschrift Bautechnik, Jg.: 88, Nr. 6, 2011, S. 362-372

Lang, W.; Rampp, T.; Puchta, K.; Cremers, J.; Beck, A. Binder, M.; Fux, V.; Manara, J.;
Arduni-Schuster, M.; Ebnert, H.P.:

Neue Hüllen für alte Gebäude - Membrankonstruktionen

Artikel aus der Zeitschrift Deutsches Ingenieurblatt, Jg.: 18, Nr. 11, 2011, S. 18 - 25

Kurath, Josef; Ringli, Alexis; Sturzenegger, Christoph:

Starker Verbund

Artikel aus der Zeitschrift Tec 21, Jg. 136, Nr. 3/4, 2010, S. 31-35

Keller, Thomas; Keller, Regula:

Fasern im Verbund. Vorteile, Nachteile und Potenziale glasfaserverstärkter

Kunststoffe in der Architektur

Artikel aus der Zeitschrift db Deutsche Bauzeitung, Jg.: 144, Nr. 4, 2010, S. 63 - 65

Eekhout, Mick:

Das Experiment hinter dem Monument - Dachkonstruktion aus GFK

Artikel aus der Zeitschrift Baublatt, Jg.: 121, Nr. 17, 2010, S. 16 - 23

Wurm, Jan; Weber, Felix:

Faserverbundwerkstoffe in der Gebäudehülle

Artikel aus der Zeitschrift Archplus, Jg.: 43, Nr. 200, 2010, S. 198 - 202

Engelsmann, Stephan; Spalding, Valerie:

Leichtbau mit Kunststoffen

Artikel aus der Zeitschrift Detail, Jg.: 50, Nr. 11, 2010, S. 1212-1222

Ludwig, Carsten, Univ. Stuttgart, Institut für Tragkonstruktion und Konstruktives Entwerfen -
ITKE - (Herausgeber):

Glasfaserverstärkte Kunststoffe unter hoher thermische und mechanischer Belastung

Peters, Stefan:

Glasfaserverstärkte Kunststoffe für den Fenster- und Fassadenbau

aus Innovative Fassadentechnik, Oktober 2009, Ernst und Sohn 2009

Dehn, Frank; Holschemacher, Klaus; Nguyen, Vie Tue:

Faserverbundwerkstoffe - Innovationen im Bauwesen

Beiträge aus Praxis und Wissenschaft, 2005 XII, Beuth Verlag

Knippers, Jan; Peters, Stefan; Weller, Claus-Peter:
Werkstoff für eine kommende Architektur der Gebäudehülle Glasfaserverstärkter Kunststoff
Artikel aus der Zeitschrift Fassadentechnik, Jg.: 11, Nr. 3, 2005, S. 22 - 26

AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.):
Handbuch Faserverbundkunststoffe
3. Aufl., Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2010

Ehrenstein, Gottfried Wilhelm:
Faserverbund-Kunststoffe
2. Aufl., Hanser, München [u.a.], 2006.

Schürmann, Helmut:
Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin,
Heidelberg: 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2007

Wurm, Jan ; Weber, Felix:
BAUFOKUS - Materialkunde Faserverbundwerkstoffe in der Gebäudehülle
Artikel: Zeitschrift Arch+ : Zeitschrift für Architektur und Städtebau, 2010, 200, S. 198-204.

Baquero, Christian Witt:
Schöck ComBAR - wo Stahl seine Grenze stößt.
Bauen mit innovativen Werkstoffen. VDI Verlag, Düsseldorf, 2007, S. 243-248.

Wurm, Jan:
Verbundwerkstoffe - Hüllenmaterial der Zukunft ?
Bauen mit innovativen Werkstoffen, VDI Verlag, Düsseldorf, 2009, S. 115 - 125

Flemming, Manfred; Roth, Siegfried:
Faserverbundbauweisen
Springer, Berlin [u.a.], 2003.

Weller, Claus Peter:
Fenster und Fassaden aus GFK und Glas (Diss.)
ITKE, Stuttgart, 2007

Malek, Thomas:
Noch leichter, noch belastbarer - Trends in der Hybridtechnik
Artikel in der Zeitschrift Plastverarbeiter 61, 5, 2010, S. 38-39.

8.2 Fügetechnik Kleben

Albinsky, Kerstin; Martens, Nadine:
Von der modernen Fassadengestaltung bis zum Brückenbau:
Das Bauwesen entdeckt die Fügetechnik Kleben
Artikel in IFAM (Hrsg.): Jahresbericht 2009-2010, Bremen, 2010; S. 100-104.

Beiss, Tobias; Menacher, Markus; Feulner, Robert; Hülder, Gerrit; Osswald, Tim A.:
Kleben von duroplastischen Verbundwerkstoffen.
Kurzer Prozess dank Vibrationsschweißtechnik, Adhäsion - Kleben & Dichten 52, 10, 2008

Brockmann, Walter:
Klebtechnik
Wiley-VCH, Berlin, 2005.

Feldmann, Markus; Abeln, Björn; Geiss, Paul-Ludwig; Wagner, Astrid; Völling, Boris:
Auf Augenhöhe mit der Schweißtechnik
Artikel in Adhäsion - Kleben & Dichten 52, 7/8, 2008, S. 20-26

Geiss, Paul Ludwig:
Klebtechnik übernimmt tragende Rolle im Bauwesen
Artikel in Adhäsion - Kleben & Dichten 50, 1/2, 2006, S. 14-18

Habenicht, Gerd:
Kleben
6. Aufl., Springer, Berlin [u.a.], 2009.

Naughton, Padraig; Droste, Alexander; Röttger, Jan:
Gewichtsreduktion und kosteneffiziente Montage durch geklebte Hybridstrukturen
Artikel in Adhäsion - Kleben & Dichten 49, 7/8, 2005, S. 14-18.

8.3 Brandschutz in Kunststoffen

Eyerer, Peter; Hirth, Thomas; Elsner, Peter:
Polymer Engineering. Springer,
Berlin [u.a.], 2008, S. 109-112

Mink, Hans-Paul:
Brandschutz im Detail
Feuertrutz Verlag, Köln, 2010

Mouritz, A. P.; Gibson, A. G.:
Fire properties of polymer composite materials
Springer, Dordrecht, 2006

Umweltbundesamt (Hrsg.):
Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel
Berlin, 2000

8.4 Nachhaltigkeit von Faserverbund-Kunststoffen

AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.)
Nachhaltigkeit von Faserverbundkunststoffen.
Frankfurt am Main, 2010

Bledzki, A. K.; Goracy, K.; Barth, Ch.
Recycling duroplastischer Verbundwerkstoffe
Artikel in G. Leonhardt (Hrsg.): Recycling von Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden.
DGM Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, 1997, S. 1-8

Jung, N.:
Umweltentlastung dank Leichtbauweise und Recycling
Artikel in Plastverarbeiter 42, 7, 1991, S. 26-29

8.5 Profilherstellung durch Pultrusion

Entwicklung leichter Profile und Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen für Anwendungen in der textilen Gebäudehülle und der Fenstertechnik (PROFAKU)
BMVBS-Antragsforschung (Z 6 - 10.08.18.7-08.29), Bremen, 2008-2010.

Mielert, F.; Bäumer, R.; Haase, W.; Sobek, W.
Pultruded Fiber-Reinforced Profiles for Multi-Layer Textile Building Envelopes
CFK-Valley Stade Convention 2010

Bäumer, R.; Herrmann, A. S.
Leichte Profile und Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen
Internationale Baufachmesse - DEUBAU 2010
Forschungsinitiative Zukunft Bau, 12.-15.01.2010, Essen

Herstellung definiert gekrümmter Profile mit dem Pultrusionsverfahren (PULKRUM)
Teilvorhaben: Profilkrümmung unter Nutzung von Verzugsmechanismen
Kooperationsprojekt im Förderprogramm InnoNet des BMWI, Verbundprojekt IN-6069

Purol, H., Dommès, H.
Continuous production of curved composite profiles for aircraft applications
Presentation on 9th World Pultrusion Conference (EPTA), Rome, Italy, 26. - 28.03.2008

Purol, H. Dommès, H.
New Developments for slightly curved profiles with pultrusion
CFK-Valley Convention, Stade 13.-14.06.2007

Purol, H., Hoffmeister, C., Dommès, H., Herrmann, A.S.
Strangziehverfahren und Strangziehvorrichtung zum Herstellen von Profilen aus Faserverbundwerkstoffen
Patent 10 2008 016 194.2 2008

9 Anhang

Tabelle 13: Massabweichungen der pultrudierten Profile

			a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
	Sollmass [mm]		46	26,5	3	23	5	11	4	24	17	12	4,5	3,5
Proben Nr.	lfd. Meter													
V7-2	1,0		-0,16	-0,31	-0,10	-0,18	-0,23	-0,17	-0,22	-0,38	-0,21	0,05	0,41	0,49
V7-3	3,3		-0,16	-0,29	-0,02	-0,22	-0,17	-0,10	-0,09	-0,37	-0,22	-0,06	0,30	0,51
V7-4	5,5		-0,03	-0,25	0,09	-0,13	-0,21	-0,17	-0,20	-0,33	0,06	0,15	0,24	0,44
V7-5	7,8		-0,26	-0,29	-0,11	-0,24	-0,19	-0,08	-0,22	-0,36	-0,07	0,13	0,86	0,21
V7-6	10,0		-0,05	-0,31	-0,03	-0,15	-0,24	-0,11	-0,10	-0,37	0,56	0,42	-0,28	0,55
V7-7	12,3		-0,03	-0,18	-0,12	-0,29	-0,19	-0,17	-0,19	-0,54	0,75	0,76	-0,22	-0,13
V7-8	14,6		-0,24	-0,16	-0,13	-0,27	-0,26	-0,17	-0,19	-0,21	0,38	0,71	0,72	-0,22
V7-9	16,8		-0,04	-0,16	-0,12	-0,19	-0,18	-0,09	-0,16	-0,28	1,00	1,18	-0,03	0,01
V7-10	19,1		-0,04	-0,14	-0,07	-0,25	-0,24	-0,09	-0,15	-0,24	0,82	1,19	-0,06	0,00
V7-11	21,3		0,07	-0,06	-0,03	-0,28	-0,12	-0,07	-0,13	-0,21	0,92	1,44	-0,01	-0,02
V7-12	23,6		-0,03	-0,15	-0,02	-0,29	-0,12	-0,12	-0,15	-0,22	1,01	1,26	-0,03	-0,21
V7-13	25,9		0,03	-0,13	-0,14	-0,17	-0,01	-0,07	-0,22	-0,19	1,10	1,45	-0,02	-0,03
V7-14	28,1		0,13	-0,13	-0,10	-0,07	-0,07	-0,08	-0,10	-0,29	1,13	1,54	-0,31	-0,16
		Min	-0,26	-0,31	-0,14	-0,29	-0,26	-0,17	-0,22	-0,54	-0,22	-0,06	-0,31	-0,22
Massabweichung [mm]		Max	0,13	-0,06	0,09	-0,07	-0,01	-0,07	-0,09	-0,19	1,13	1,54	0,86	0,55
		Mittel	-0,06	-0,20	-0,07	-0,21	-0,17	-0,11	-0,16	-0,31	0,56	0,79	0,12	0,11
Proben Nr.	lfd. Meter													
V8-1	2,0		-0,04	-0,25	-0,12	-0,01	-0,20	-0,05	-0,13	-0,48	-0,15	0,30	0,17	0,07
V8-2	4,3		0,10	-0,17	0,01	-0,14	-0,12	-0,15	-0,19	-0,39	0,18	0,61	-0,10	0,00
V8-3	6,5		-0,07	-0,16	-0,02	0,15	-0,12	-0,09	-0,22	-0,38	0,12	0,66	0,04	-0,29
V8-4	8,8		0,08	-0,14	-0,04	-0,04	-0,09	-0,09	-0,21	-0,33	0,95	1,15	-0,11	-0,21
V8-5	11,0		0,05	-0,10	0,11	-0,10	-0,18	-0,07	-0,18	-0,25	0,92	1,08	-0,17	-0,29
V8-6	13,3		0,01	-0,10	-0,02	-0,08	-0,13	-0,10	-0,19	-0,49	0,55	0,38	0,57	0,12
		Min	-0,07	-0,25	-0,12	-0,14	-0,20	-0,15	-0,22	-0,49	-0,15	0,30	-0,17	-0,29
Massabweichung [mm]		Max	0,10	-0,10	0,11	0,15	-0,09	-0,05	-0,13	-0,25	0,95	1,15	0,57	0,12
		Mittel	0,02	-0,15	-0,01	-0,04	-0,14	-0,09	-0,19	-0,39	0,43	0,70	0,07	-0,10
Proben Nr.	lfd. Meter													
V9-2	0,8		-0,05	-0,14	-0,03	-0,22	-0,12	-0,06	-0,14	-0,28	0,64	-0,12	0,10	-0,14
V9-3	3,0		-0,05	-0,17	-0,04	-0,13	-0,10	-0,06	-0,11	-0,27	1,14	-0,02	0,06	-0,25
V9-4	5,3		-0,04	-0,13	-0,01	-0,27	-0,07	-0,04	-0,12	-0,31	1,20	0,12	0,12	-0,29
V9-5	7,5		-0,03	-0,15	-0,04	-0,27	-0,11	-0,02	-0,10	-0,29	1,22	0,16	0,00	-0,32
V9-6	9,8		0,01	-0,01	-0,01	-0,27	-0,02	-0,05	-0,10	-0,27	1,14	0,19	-0,10	-0,50
V9-7	12,0		0,06	-0,11	0,04	-0,23	-0,05	-0,04	-0,11	-0,23	1,48	0,19	-0,17	-0,26
V9-8	14,3		0,01	-0,13	-0,08	-0,23	-0,07	-0,03	-0,11	-0,25	0,90	0,18	-0,04	-0,29
V9-9	16,5		0,04	-0,08	-0,04	-0,21	-0,09	-0,02	-0,13	-0,28	1,14	0,18	-0,05	-0,44
V9-10	18,8		0,10	-0,07	-0,04	-0,16	-0,07	-0,07	-0,13	-0,25	1,22	0,23	-0,27	-0,53
V9-11	21,0		0,12	-0,07	-0,04	-0,30	-0,10	-0,03	-0,08	-0,25	1,69	0,71	-0,19	-0,48
V9-12	23,3		0,10	0,01	-0,01	-0,24	-0,07	-0,02	-0,09	-0,24	1,69	0,63	-0,24	-0,31
		Min	-0,05	-0,17	-0,08	-0,30	-0,12	-0,07	-0,14	-0,31	0,64	-0,12	-0,27	-0,53
Massabweichung [mm]		Max	0,12	0,01	0,04	-0,13	-0,02	-0,02	-0,08	-0,23	1,69	0,71	0,12	-0,14
		Mittel	0,02	-0,10	-0,03	-0,23	-0,08	-0,04	-0,11	-0,27	1,22	0,22	-0,07	-0,35
Gesamt gemessene		Min	-0,26	-0,31	-0,14	-0,30	-0,26	-0,17	-0,22	-0,54	-0,22	-0,12	-0,31	-0,53
Massabweichung [mm]		Max	0,13	0,01	0,11	0,15	-0,01	-0,02	-0,08	-0,19	1,69	1,54	0,86	0,55
		Mittel	-0,01	-0,16	-0,04	-0,15	-0,13	-0,09	-0,16	-0,33	0,68	0,61	0,06	-0,08