

Armin D. Rogall, Luis Ocanto, Christian Lüken
Sebastian Seidelmann, Daniel Horn

ULTRALIGHT

**Weiterentwicklung eines ultraschlanken,
energieeffizienten Fassaden- und Fenster-
systems mit faserverstärkten Kunststoff-
profilen (FVK) in Kombination mit Vakuum-
isolierglas (VIG) für optimalen Wärmeschutz**

F 3014

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) 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

2018

ISBN 978-3-7388-0180-4

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

ULTRALIGHT

Weiterentwicklung eines ultraschlanken, energieeffizienten Fassaden- und Fenstersystems mit faserverstärkten Kunststoffprofilen (FVK) in Kombination mit Vakuumisolierglas (VIG) für optimalen Wärmeschutz

ABSCHLUSSBERICHT

Fachhochschule Dortmund
University of Applied Sciences and Arts
Fachbereich Architektur
Emil-Figge-Str. 40
44227 Dortmund

Projektleitung:

Prof. Dipl.-Ing. Armin D. Rogall

Projektbearbeitung:

V-Prof. Dipl.-Ing. Luis Ocanto M.Eng.

Dr. Dipl.-Chem. Christian Lüken

Dipl.-Ing. Sebastian Seidelmann

Dipl.-Ing. Daniel Horn M.Sc.

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (Aktenzeichen: II 3-F20-13-1-002 / SWD -10.08.18.7-13.37). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Zielsetzung des Forschungsvorhabens.....	1
1.2	Entwicklungsstand nach Abschluss des Forschungsvorhabens ULTRASLIM.....	2
1.3	Verfügbarkeit und Eigenschaften neuer Vakuumverglasungen	4
1.4	Spezielle Eigenschaften von Vakuumverglasungen	5
2	Untersuchung der ULTRASLIM-Profilgeometrie	7
2.1	Profilgeometrie zu Beginn des Forschungsvorhabens	7
2.2	FEM-Simulation des Wärmedurchgangs.....	9
2.2.1	Verwendete Software und Parameter	9
2.2.2	Modellierung der Vakuumverglasung.....	10
2.2.3	Analyse der Profilgeometrie 3.2.10.....	11
2.3	FEM-Simulation des Bauteilverhaltens unter Windlast	15
2.3.1	Allgemein.....	15
2.3.2	Ergebnisse der Berechnungen.....	17
2.4	Differenzklimaverhalten.....	19
2.5	Öffnungsarten und Beschläge	25
3	Weitere Optimierung des Fenstersystems.....	26
3.1	Entwicklungsansatz	26
3.2	Verbesserte Profilgeometrie 3.2.11.1	27
3.2.1	Allgemein.....	27
3.2.2	FEM-Analyse des Wärmedurchgangs.....	29
3.3	Verbesserte Profilgeometrie 3.2.12.1	31
3.3.1	Allgemein.....	31
3.3.2	FEM-Analyse des Wärmedurchgangs.....	33
3.3.3	FEM-Analyse des Bauteilverhaltens unter Windlast	35
3.4	Realisierung weiterer Öffnungsarten.....	36
3.4.1	Profil 3.2.12.1T	36
3.4.2	Senk-Klapp-Wendefenster	38
3.4.3	Dreh-Kippfenster in GFK-Holz-Hybridbauweise	41
3.4.4	Vergleich und Bewertung der Öffnungsarten	44
3.5	Weitere Maßnahmen zur Optimierung des thermischen Bauteilverhaltens.....	46
3.5.1	Variation der Verglasung.....	46

3.5.2	Reduktion der Höhe des Glasrandverbundes	48
3.5.3	Reduktion der Wärmeleitfähigkeit des Glasrandverbundes.....	50
3.5.4	Außenseitige Wärmedämmung	52
3.6	Fertigung neuer GFK-Profile.....	55
4	Vakuumverglasungen im Bestandsbau	57
4.1	Problemstellung und Beispielobjekt	57
4.2	Berechnung des Uw-Wertes nach DIN EN ISO 10077-1.....	58
4.3	Simulation des thermischen Bauteilverhaltens	62
4.4	Sanierungsmaßnahmen	63
4.5	Anforderungen an das Fenster.....	63
4.6	Problembereiche und Ausgangszustand	65
4.7	Maßnahmen zur weiteren Abdichtung	66
4.8	FEM-Analyse des Wärmedurchgangs nach der Sanierung.....	73
5	Zusammenfassung und Ausblick	76
6	Anhang - Wärmeleitfähigkeiten in der FEM-Simulation	78
7	Anhang – Verglasungen in WINDOW 7.4	79
8	Ergebnisse der Differenzklimaversuche	81
9	Anhang – Bericht FEM-Berechnungen IB-Kramer	86
10	Anhang - Fotos Displays und Messeauftritte	120
11	Literatur.....	123

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Um die Ziele der Energiewende im beabsichtigten Zeitrahmen umzusetzen, müssen energieeffiziente Lösungen sowohl für den Neubau, insbesondere aber auch für die energetische Sanierung des Gebäudebestands entwickelt werden. Dabei soll aber auch eine Architektur vermieden werden, bei der die Ästhetik ganz den Anforderungen der EnEV untergeordnet ist - denn unsere Nutz- und Wohngebäude sind wichtige Ausdrucksformen unserer Kultur und bestimmen schon allein durch ihre ständige Präsenz unseren Alltag und bebaute Umwelt.

Eine besondere Bedeutung kommt hierbei der Entwicklung hochdämmender Fenster- und Fassadensysteme zu, denn transparente Bauteile und Fassadenelemente sind ein essenzieller Bestandteil moderner Architektur. Immer weiter verschärfte Vorgaben zur Energieeinsparung resultierten zunächst in Zwei-, später in Drei- und sogar Mehrfachverglasungen. Bedingt durch die immer höheren Scheibengewichte einerseits und die steigenden Anforderungen an die Wärmedämmung auch des Fensterrahmens andererseits wurden Fensterrahmen aus Aluminium, Holz und insbesondere PVC-U in der Regel stetig größer in den Profildimensionen und Ansichtsbreiten.

Einen möglichen Ausweg aus dieser Entwicklung bietet der Übergang von Mehrfach-Wärmeschutzverglasungen zu Vakuumverglasungen. Vakuumverglasungen mit U_g -Werten entsprechend einer sehr guten Zweifach-Wärmeschutzverglasung sind seit vielen Jahren auf dem Markt (Fa. Pilkington). In den letzten Jahren erfolgte insbesondere auf dem chinesischen Markt eine Entwicklung und Einführung neuer Vakuumverglasungen, die erstmals U_g -Werte auf dem Niveau von Dreifach-Verglasungen ($0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$) erlauben. In naher Zukunft sind weitere Verbesserungen zu erwarten ($0,3\text{-}0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$), so dass neue Vakuumverglasungen selbst Dreifachverglasungen mit Krypton-Füllung übertreffen können - und dies bei geringen Verglasungsstärken (6-10 mm) und daher geringen Verglasungsgewichten.

Diese Kombination von Eigenschaften erlaubt für Neubauanwendungen die Konstruktion schlanker Leichtbausysteme. Im Bestandsbau, insbesondere bei regional und baukulturell bedeutenden Bauweisen sowie bei denkmalgeschützten Gebäuden, wo Verglasungsgewicht und -einbautiefe eine noch wesentlich größere Rolle spielen, können neue Sanierungspotenziale erschlossen werden.

1.2 Entwicklungsstand nach Abschluss des Forschungsvorhabens ULTRASLIM

Das Forschungsvorhabens ULTRALIGHT implementierte Ergebnisse der bereits geleisteten Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Rahmen des Forschungsvorhabens ULTRASLIM (Aktenzeichen II 3 F20-10-1-062 / SF – 10.08.18.7-11.35), durchgeführt unter Projektleitung durch das Faserinstitut Bremen FIBRE e.V.), und ergänzt diese um wichtige Aspekte. Das über ULTRASLIM hinausgehende Ziel war die Entwicklung eines marktfähigen Fenstersystems, unter gezielter Berücksichtigung des Feedbacks von Industriepartnern und Diskussionen auf Fachmessen, insbesondere der BAU 2013 in München, um dem vorherrschenden Innovationsstau in der Fensterbranche entgegenzuwirken. Dieses Fenstersystem stieß beim Publikum der BAU 2013 auf eine sehr positive Resonanz, die sich in zahlreichen Fachgesprächen äußerte. Eine nachfolgende Analyse der Gespräche zeigte allerdings auch, welche Hindernisse einer Markteinführung noch entgegenstanden.

Untersuchung und Optimierung des Wärmeschutzes

Im Forschungsvorhaben ULTRALIGHT erfolgte keine detaillierte Analyse des thermischen Bauteilverhaltens. Dies war daher im Projekt ULTRALIGHT zu leisten, insbesondere durch die grundlegenden Unterschiede zwischen Vakuumglas und gasgefüllten Mehrfachverglasungen, die den Wärmefluss durch das Bauteil stark beeinflussen können.

Untersuchung des Bauteilverhaltens unter Windlast

Ebenfalls sollten im Projekt ULTRALIGHT Aussagen zum Verhalten des Fensters unter Windlast getroffen werden. Hierzu sollten als extern vergebener Auftrag FEM-Berechnungen durch das Ingenieurbüro IB Kramer durchgeführt werden. In diesen Berechnungen aufgezeigten Schwachstellen sollte bei Bedarf durch eine Optimierung der Profilgeometrie begegnet werden, die in diesem Fall durch eine weitere FEM-Simulation geprüft werden sollte.

Verbesserungen der Vakuumisolierverglasung

Die im Messedemonstrator zur Anwendung kommende Vakuumisolierverglasung (Pilkington Spacia ST II) musste weiter optimiert werden. Zwar bot das von uns eingesetzte Vakuumisolierverglasung mit einer Gesamtstärke von nur 6,2 mm Stärke eine Wärmedämmwirkung, die für diese Stärke beeindruckend ist (U-Wert 0,9-1,1 W/m²K). Die Werte erreichten aber noch nicht das Niveau moderner Dreifachverglasungen (U-Wert < 0,7 W/m²K). Weitere bisher unzureichend gelöste Anforderungen betrafen den Bruch-, Schall- und Sonnenschutz sowie die Probleme der Serienfertigung. Im Projekt ULTRALIGHT sollten daher auch neue Vakuumverglasungen anderer Hersteller untersucht werden.

Alternative Öffnungsarten

Zum Thema Öffnungsarten erreichte uns eine Vielzahl von Anregungen, so dass für den Vorserienprototypen alternative, bisher nicht vorgesehene, Öffnungsarten zu untersuchen waren. Während sich die bisher betrachteten Öffnungsarten vornehmlich an Bürogebäuden orientierten, sollten für den Einsatz in Wohngebäuden sowohl die effizientere, steuerbare natürliche Lüftung trotz Winddichtheit als auch die Möglichkeit einer Reinigung des Fensters verbessert werden. Das Öffnen der Fenster nach Außen sollte allerdings nicht aufgegeben werden, da so einige wichtige Vorteile des ULTRASLIM-Fenstersystems verloren gingen. Es war daher zunächst vorrangig zu untersuchen, wie mit auf dem Markt verfügbaren Mechaniken ein Senk-Klapp-Wende-Mechanismus umgesetzt werden kann.

Obwohl der auf der BAU 2013 gezeigte Demonstrator noch nicht serienreif war, da die Ausstellung bereits nach der Hälfte der Projektlaufzeit erfolgte, erfuhr er auf der Messe eine sehr starke positive Resonanz bei Industrieunternehmen, Architekten, Planern und Bauherren. Insbesondere deuten die häufigen Fragen nach der Marktverfügbarkeit des Systems auf ein großes Interesse insbesondere der Architekten und Planer hin.

Das Forschungsvorhaben ULTRASLIM sollte deshalb um weitere Punkte ergänzt werden, um die die Markteinführung des neuen energieeffizienten Fenstersystems zu beschleunigen. Das neue und erweiterte Ziel des Forschungsvorhabens ULTRASLIM war die Bereitstellung eines Nullserien-Prototypen, der schon in realen Versuchsbauvorhaben eingesetzt werden kann. Dementsprechend mussten die noch bestehenden bautechnischen Probleme zufriedenstellend und mindestens bis zur Einhaltung der baulichen Mindestanforderungen gelöst werden.

1.3 Verfügbarkeit und Eigenschaften neuer Vakuumverglasungen

Zur Laufzeit des Forschungsvorhabens waren Vakuumverglasungen folgender Hersteller teilweise mit Einschränkungen marktverfügbar:

- NSG Pilkington (Produkt SPACIA)
- Beijing Synergy Vacuum Glazing Technology Co., Ltd.
- Eagon Windows & Doors Co., Ltd.
- Qingdao Hengda Glass Technology Co., Ltd.

Während des vorangegangenen Projekts ULTRASLIM und zu Beginn der Durchführung von ULTRALIGHT waren die Fensterprofile auf das Vakuumglas SPACIA der Firma Pilkington ausgelegt. Im Laufe dieses Forschungsvorhabens wurden jedoch von der Firma Synergy neue Vakuumverglasungen auf den Markt gebracht, die aufgrund der verbesserten Eigenschaften im Folgenden für das ULTRALIGHT-Fenstersystem eingesetzt werden sollten.

Hinsichtlich der Auslegung des ULTRALIGHT-Fenstersystems bestehen drei wesentliche Unterschiede zwischen den neuen Vakuumgläsern der Firma Synergy und der ursprünglich angesetzten Verglasung Pilkington Spacia:

- Niedrigere U_g -Werte in der Scheibenmitte: 0,4-0,7 W/m²K (statt 0,9-1,1 W/m²K), während der Projektlaufzeit waren allerdings nur 0,58 W/m²K lieferbar.
- Einsatz teilvorgespannter Gläser möglich
- andersartiger Aufbau des Glasrandverbundes („edge seal“, Abb. 1.1)

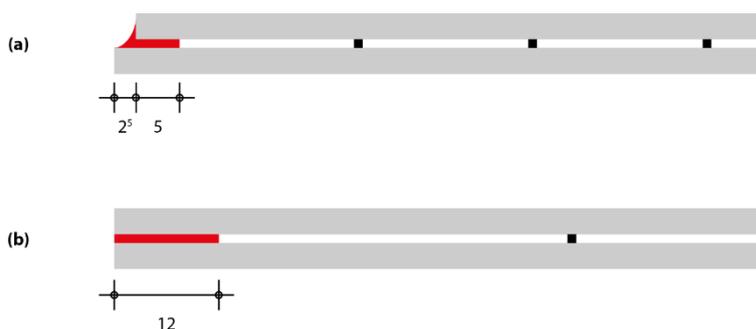


Abb. 1.1 Schematischer Aufbau und Glasrandverbund „edge seal“ (rot) der aktuell verfügbaren Vakuumgläser Pilkington Spacia (a) und Synergy (b).

Bei den Produkten der Firma Synergy handelt es sich nicht um Stufengläser – dies war bei den Pilkington-Vakuumgläsern fertigungsbedingt durch die Ausführung des Glasrandverbundes der Fall. Gleichzeitig weisen die Synergy-Vakuumgläser allerdings einen wesentlich breiteren

Randverbund aus Glaslot auf, der im Vergleich zu den Spacia-Produkten auch unsauberer verarbeitet ist.

1.4 Spezielle Eigenschaften von Vakuumverglasungen

Betrachtet man Vakuumglas und konventionelle - also mit Edelgasen befüllte - Mehrfach-Wärmeschutzverglasungen im Vergleich, so bestehen zwei Hauptunterschiede hinsichtlich des thermischen Bauteilverhaltens:

- U_g in Scheibenmitte potenziell niedriger bei VG (auch verglichen mit Kr-Dreifach)
- Randverbund 0,1-0,2 mm Glaslot od. Metall mit vergleichsweise hoher Wärmeleitfähigkeit

Moderne Mehrfach-Wärmeschutzverglasungen verfügen im Bereich des Glasrandverbundes über einen Warme-Kante-Aufbau, der die thermische Trennung gewährleistet (Abb. 1.2).

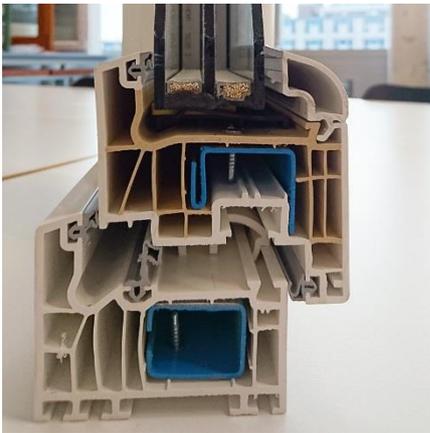


Abb. 1.2 Schnitt durch eine gasgefüllte Dreifach-Verglasung 4/12/4/12/4 der Fa. Pilkington (links), Abstandshalter in 20-facher Vergrößerung (rechts).

Das bei gasgefüllten Verglasungen immer notwendige Trockenmittel liegt hier in einem Hohlprofil aus Kunststoff vor, das eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist. Dünne Metallfolien sind außen zur Herstellung eines gasdichten Abschlusses aufgebracht. Die Abdichtung erfolgt im oberen Bereich durch Butylelastomere, im unteren durch Polysulfid oder Silikon.

Im Gegensatz hierzu ist der Aufbau des Glasrandverbundes bei Vakuumverglasungen („edge seal“) wesentlich einfacher, da hier kein Trockenmittel benötigt wird. Die beiden Scheiben sind über Glaslot direkt miteinander verbunden, um dauerhaft ein Hochvakuum im Scheibenzwischenraum gewährleisten zu können (Abb. 1.3).

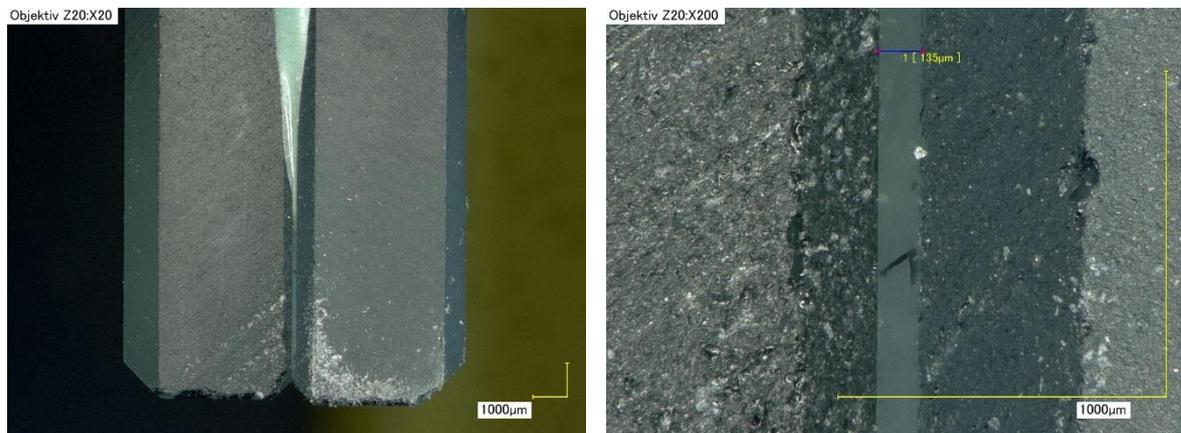


Abb. 1.3 Seitenansicht einer Vakuumverglasung 4/0,15/4 der Firma Synergy in 20-facher (links) und 200-facher (rechts) Vergrößerung.

Wie in einer einfachen FEM-Simulation des Wärmeflusses sichtbar wird, verhält sich eine Vakuumverglasung im Bereich des Randverbundes ähnlich einer Einfachverglasung, da die Verbindung von außen nach innen vollständig über Glas hergestellt ist (Abb. 1.4).

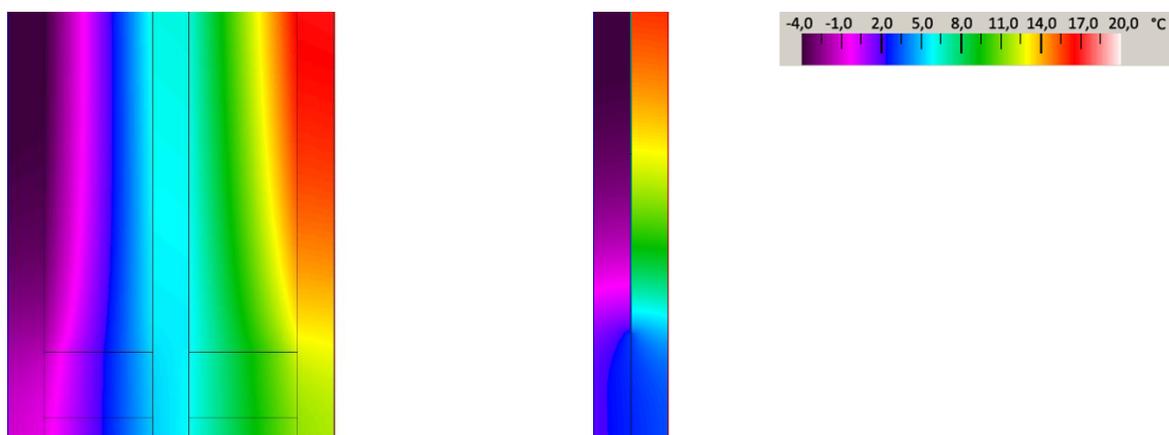


Abb. 1.4 Simulierter Temperaturverlauf (THERM) bei außen -5 °C und innen 20 °C für eine Dreifach-Wärmeschutzverglasung 4/12/4/12/4 mit $U_g = 0,70\text{ W/m}^2\text{K}$ (links) und eine Vakuumverglasung 4/0,15/4 mit $U_g = 0,42\text{ W/m}^2\text{K}$ (rechts).

Ohne entsprechende konstruktive Maßnahmen wären folglich die raumseitigen Oberflächentemperaturen im Bereich des Randverbundes so niedrig, dass im Winter mit starkem Tauwasseranfall zu rechnen wäre. Eine Herausforderung im Forschungsvorhaben ULTRALIGHT bestand darin, diese thermische Schwachstelle so zu kompensieren, dass die hervorragenden U_g -Werte der Verglasungen nutzbar gemacht werden konnten.

Als Grundlage der weiteren FEM-Berechnungen zum Wärmedurchgang und zum Verhalten des Fensters unter Windlast wurde zunächst die Profilgeometrie 3.2.10 entwickelt (Abb. 2.2).

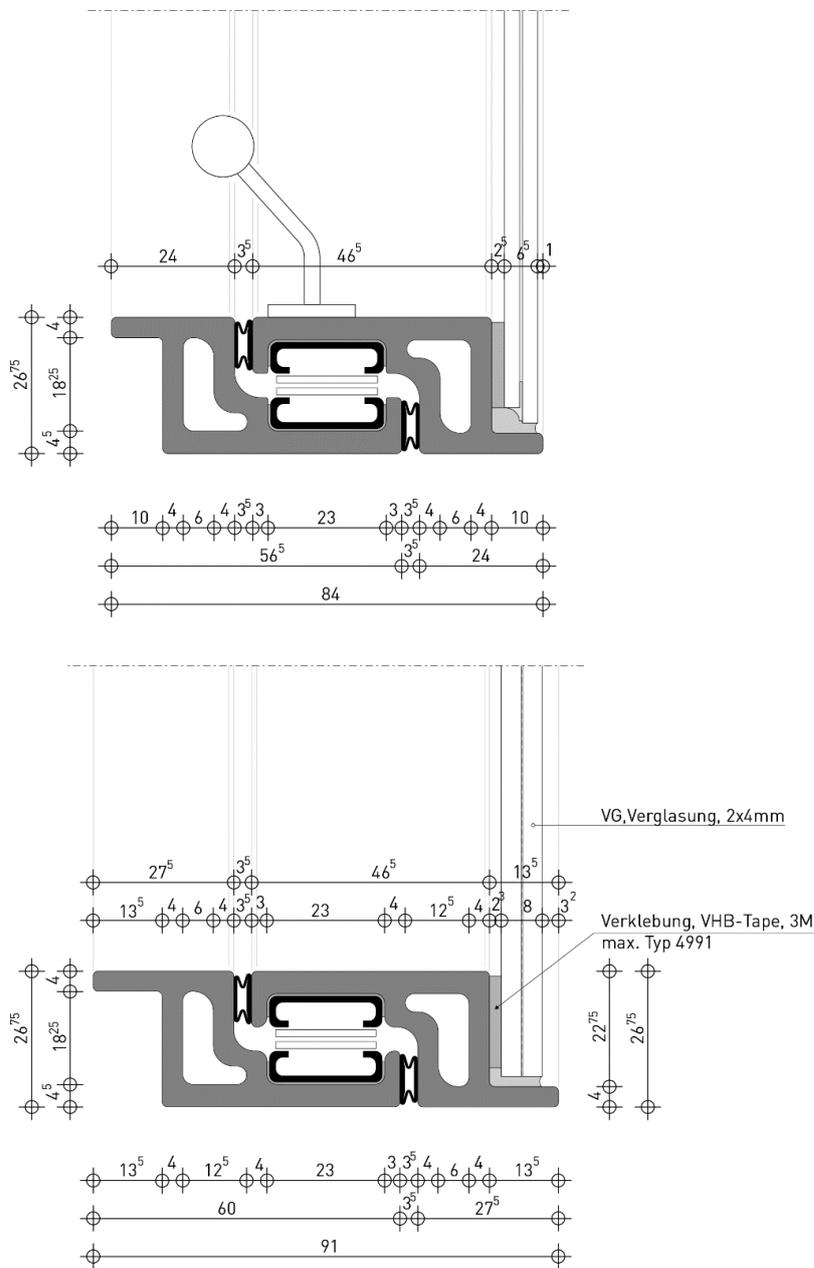


Abb. 2.2 Profilgeometrie 3.2.8 für VG 2x3 mm (oben) und 3.2.10 für VG bis 2x5 mm (unten).

Gegenüber der Profilgeometrie 3.2.8 wurde die untere GFK-Kante, welche die Eigenlast der Verglasung aufnimmt, um 3,5 mm verlängert, um Vakuumverglasungen mit einer Stärke von bis zu 2x5 mm aufnehmen zu können. Dies ermöglichte erstmals den Einsatz aller während der Laufzeit des Forschungsvorhabens marktverfügbaren Vakuumverglasungen und insbesondere der neuartigen Synergy-Produkte mit deutlich niedrigeren U_g -Werten gegenüber Pilkington Spacia. Die anderen Dimensionen des Profils wurden zunächst nicht verändert.

2.2 FEM-Simulation des Wärmedurchgangs

2.2.1 Verwendete Software und Parameter

Das thermische Bauteilverhalten wurde hauptsächlich anhand von FEM-Simulationen untersucht. Hierzu wurden die Programme „THERM“ FINITE ELEMENT SIMULATOR v7.4.3.0 und BERKELEY LAB „WINDOW“ v7.4.6.0 des Lawrence Berkeley National Laboratory eingesetzt.

Folgende Einstellungen bei THERM wurden vorgenommen, falls nicht ausdrücklich anders beschrieben:

- QUAD TREE MESH PARAMETER = 8
- MAXIMUM % ERROR ENERGY NORM = 5%
- MAXIMUM ITERATIONS = 15

Entsprechend der DIN EN ISO 10077-2:2015 wurden bei den Berechnungen von U-Werten nach DIN EN ISO 6946:2015 mit THERM und WINDOW folgende Randbedingungen zugrunde gelegt:

- Außentemperatur $\theta_e = 0 \text{ °C}$
- Innentemperatur $\theta_i = 20 \text{ °C}$
- außenseitiger Wärmeübergangswiderstand $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$
- raumseitiger Wärmeübergangswiderstand $R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$
- Die mit WINDOW berechneten U_w -Werte beziehen sich auf ein Fensterelement mit den Außenmaßen $B = 1230 \text{ mm}$ und $H = 1480 \text{ mm}$.

Zur Bestimmung der raumseitigen Oberflächentemperaturen wurden gemäß der DIN EN ISO 13788:2013 die folgenden Randbedingungen vorausgesetzt:

- Außentemperatur $\theta_e = -5 \text{ °C}$
- Innentemperatur $\theta_i = 20 \text{ °C}$
- außenseitiger Wärmeübergangswiderstand $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$
- raumseitiger Wärmeübergangswiderstand $R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$

Die angesetzten Wärmeleitfähigkeiten sind im Kapitel „Anhang - Werkstoffe in der FEM-Simulation“ aufgeführt.

Gemäß DIN EN ISO 10077-2:2015 (Anhang B, Tab. B.1) wurde für raumseitige Oberflächen von Rahmen und Verglasung ein erhöhter Wärmeübergangswiderstand $R_{si} = 0,20 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ angesetzt, sofern diese Oberflächen der Bedingung „verringerte Strahlung/Konvektion“ entsprechen. In Abb. 2.3 sind die entsprechenden Flächen schattiert. Hierbei ist die zu berücksichtigende Strecke b gleich der Tiefe d , jedoch maximal 30 mm.

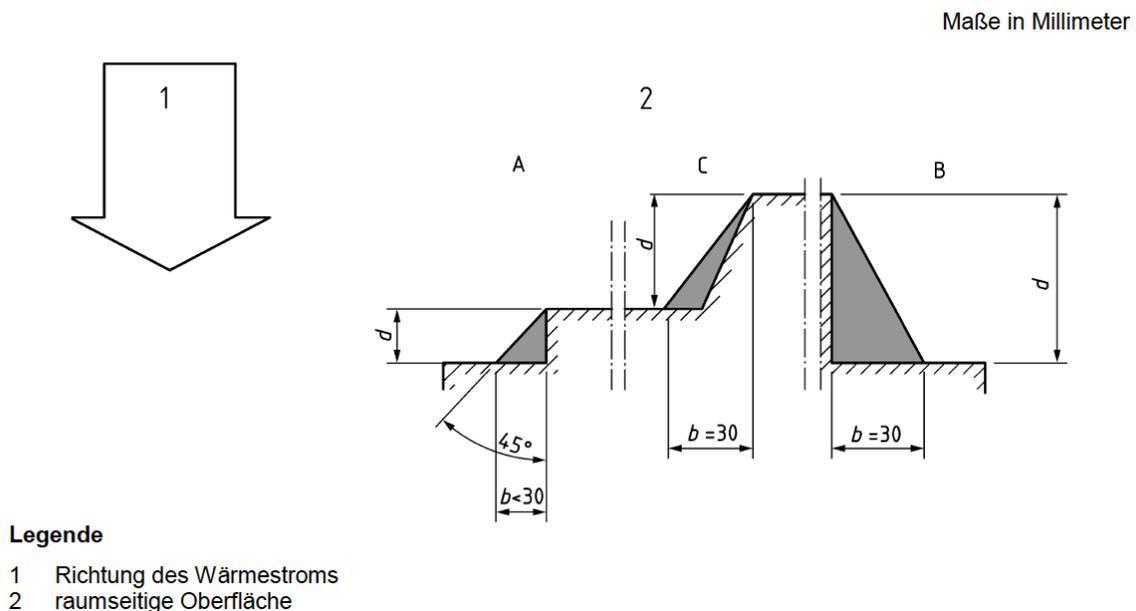


Abb. 2.3 Schematische Darstellung von Oberflächen mit einem erhöhten Wärmeübergangswiderstand aufgrund eines verringerten Wärmeübergangs infolge von Strahlung/Konvektion [DIN EN ISO 10077-2:2015, B.1].

2.2.2 Modellierung der Vakuumverglasung

Da es bislang keine offiziell verfügbaren fertigen Modelle gibt, mussten die neuen Vakuumverglasungen der Firma Synergy mit WINDOW und THERM modelliert werden. Hierfür getroffene Annahmen sind in Anhang A dargestellt.

Die genaue chemische Zusammensetzung wie auch die exakten bauphysikalischen Eigenschaften des im Glasrandverbund eingesetzten Glaslots sind nicht veröffentlicht. Es ist jedoch bekannt, dass es sich um ein niedrigschmelzendes Glas mit hohem Bleioxid-Gehalt handelt, so dass in der FEM-Simulation eine Wärmeleitfähigkeit des Randverbundes von $\lambda_{rv} = 1,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ angenommen wurde, entsprechend einem typischen Flintglas. Aufgrund der sehr geringen Schichtdicke (0,15 mm) wurde weiter angenommen, dass auch größere Variationen dieses Wertes nur geringe Auswirkungen auf die raumseitigen Oberflächentemperaturen haben. Diese Annahme wurde später verifiziert (siehe Abschnitt 3.5.3).

2.2.3 Analyse der Profilgeometrie 3.2.10

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ULTRASLIM konnte die im Projekt ULTRASLIM entwickelte Profilgeometrie erstmals einer detaillierten Simulation des thermischen Bauteilverhaltens unterzogen und daraufhin optimiert werden. Ausgangspunkt der Optimierungen war die Profilgeometrie 3.2.10 (Abb. 2.4).

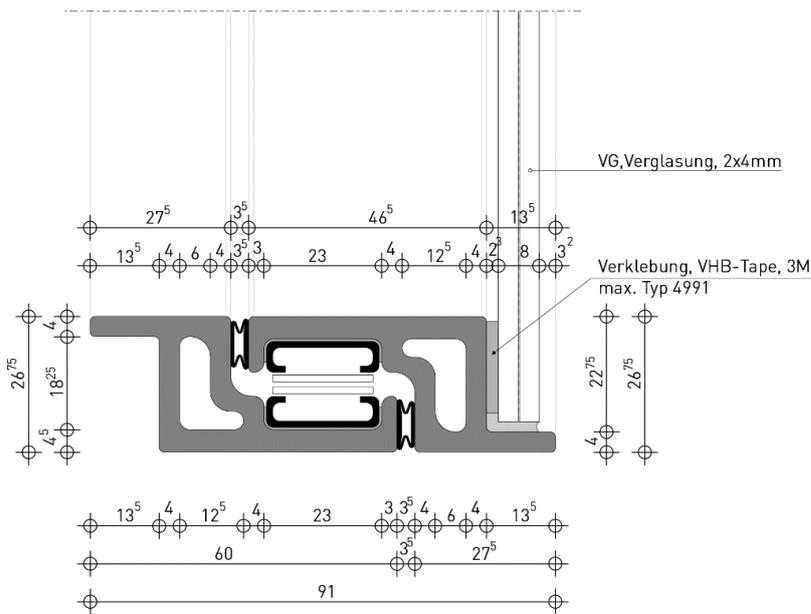


Abb. 2.4 ULTRALIGHT Profilgeometrie 3.2.10 mit Bemaßung.

Ausgehend von der in Abb. 2.4 dargestellten Geometrie wurde mit der Software THERM 7.4 ein vereinfachtes Modell für die FEM-Simulation des thermischen Bauteilverhaltens erstellt (Abb. 2.5).

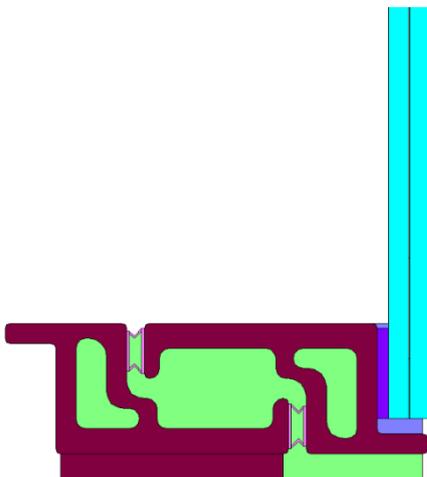


Abb. 2.5 THERM-Modell der Profilgeometrie 3.2.10 mit Verglasung VG 2x4 mm, $U_g = 0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Im Modell liegt der Blendrahmen auf einem 5 mm starken GFK-Flachprofil auf, das hier den Anschluss an den Baukörper simuliert. Der Abstand von 5 mm ist notwendig, um die Öffnung des Fensters nach außen hin zu gewährleisten. Da die Verglasung bündig mit der Fassade abschließen sollte, wurde die Fläche unter dem Flügelrahmen in der FEM-Simulation als leicht belüfteter Hohlraum nach DIN EN ISO 10077-2 angesetzt. Anhand dieses Modells wurde entsprechend den in der DIN 4108-2 und DIN EN ISO 13788 vorgegebenen Randbedingungen der Wärmedurchgang durch das Bauteil im FEM-Verfahren simuliert (Abb. 2.6).

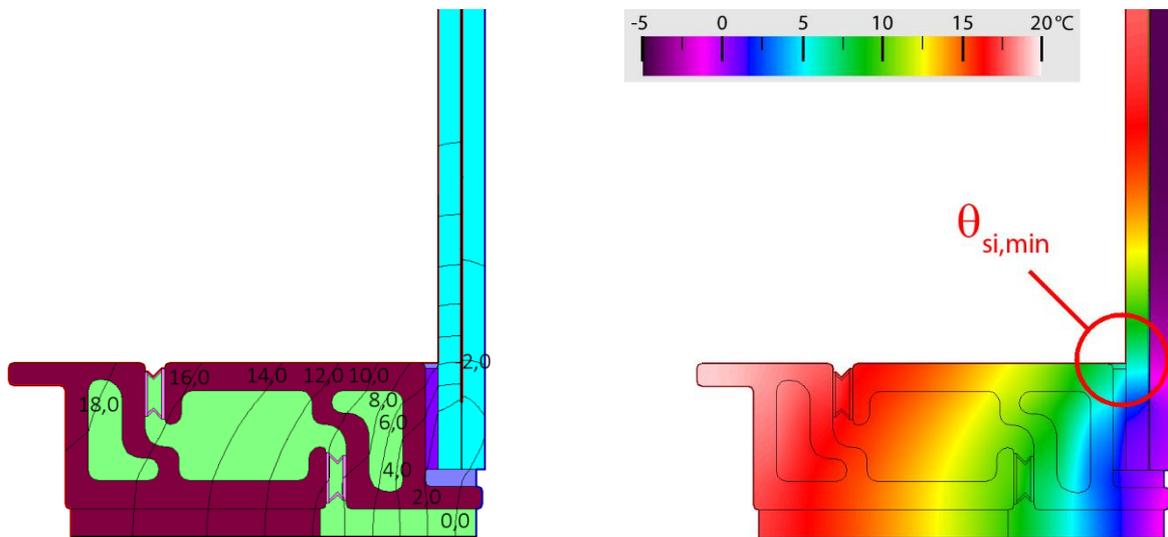
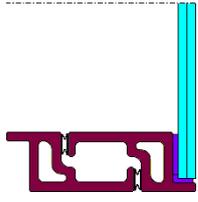
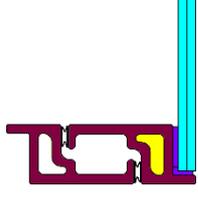
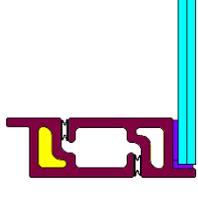
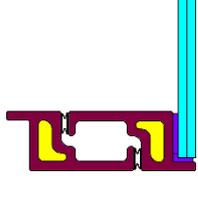
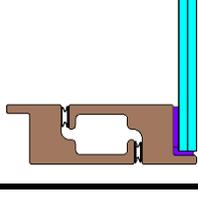


Abb. 2.6 Profil 3.2.10, Isothermenverlauf (links) und IR-Falschfarben (rechts) bei $\theta_e = -5$ °C.

In der Simulation wurde deutlich, dass die thermische Schwachstelle des Glasrandverbundes aus Glaslot das thermische Bauteilverhalten dominierte. Dementsprechend war die kälteste raumseitige Oberflächentemperatur bei -5 °C außen mit 6,1 °C der obere Übergang von der Verglasung zum Rahmen (siehe Markierung Abb. 2.6). Bei 0 °C außen errechnete sich die Temperatur an dieser Stelle zu 8,9 °C.

Bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50% (8,6 g/m³ absolut) auf der Raumseite beträgt der Taupunkt 9,3 °C. Im Fensterbau wird daher gemeinhin die 10 °C-Isotherme zur vereinfachten Bewertung des Tauwasseranfalls herangezogen. Problematisch ist der Verlauf der 10 °C-Isotherme in Abb. 2.6 durch den Innenraum, denn in diesem Bereich ist bei Außentemperaturen unter 0 °C mit dem Anfall von Tauwasser zu rechnen.

Im Folgenden wurden die Auswirkung eines Verfüllens der Profilkerns mit einer WL030 Wärmedämmung sowie des Profilmaterials auf das thermische Bauteilverhalten untersucht. Hierzu wurden Profile mit keinem, ein oder zwei Dämmkernen sowie aus Hartholz ohne innere Hohlräume betrachtet (Tab. 2.1).

	Rahmen Material	Kern Flügelrahmen	Blendrahmen	$\theta_{si,min}$ [°C]	U_w [W/m ² K]
	UP-GF $\lambda = 0,25 \text{ W/mK}$	Luft	Luft	6,1	0,84
	UP-GF $\lambda = 0,25 \text{ W/mK}$	WL030	Luft	6,1	0,83
	UP-GF $\lambda = 0,25 \text{ W/mK}$	Luft	WL030	6,1	0,84
	UP-GF $\lambda = 0,25 \text{ W/mK}$	WL030	WL030	6,1	0,83
	Hartholz $\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$	massiv	massiv	6,1	0,84

Tab. 2.1 Minimale raumseitige Oberflächentemperatur $\theta_{si,min}$ bei $\theta_e = -5 \text{ °C}$ und U_w -Werte bei $U_g = 0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$ für Fenster B 1230 mm x H 1480 mm für unterschiedliche Materialien.

Eine Wärmedämmung der Kerne und auch der Einsatz eines Rahmenmaterials mit geringerer Wärmeleitfähigkeit zeigten keine signifikanten Auswirkungen auf die minimalen raumseitigen Oberflächentemperaturen den U_w -Wert des Fensters.

Dies kann dadurch erklärt werden, dass der weitaus größte Teil der Wärmeverluste über die kurze Verbindung Glas-Glaslot-Glas erfolgt, wohingegen der innere Aufbau des Fensterprofils nur schwächer in die Bilanz einfließt. Insbesondere die Beschaffenheit des weit raumseitig gelegenen Blendrahmens hat so im Rahmen des Fehlers der FEM-Berechnungen keine Auswirkungen mehr auf den Wärmedurchgang.

2.3 FEM-Simulation des Bauteilverhaltens unter Windlast

2.3.1 Allgemein

Das Erstellen eines Modells für die FEM-Simulation und die Berechnungen zum Verhalten des Fensters unter Windlast wurden durch die Firma IB Kramer als Auftragsarbeit ausgeführt. Ein vollständiger Bericht ist im Anhang beigefügt (Anlage, Abschnitt 9).

Die Profile wurden als unidirektionale Profile, hergestellt im Pultrusionsverfahren, angenommen. Die Verglasung wurde mittels doppelseitiger Klebebänder TYP VHB, Fabrikat 3M an die Profile geklebt. Die Auslegung der Verklebung des Glases sowie der Verglasung selber waren nicht Bestandteil der FEM-Analyse, wurden aber zur umfassenden Betrachtung des Systems in der Simulation erfasst.

Festgelegt wurde weiterhin als Öffnungsart ein nach außen öffnendes Senk-Klapp-Wendefenster. Hierzu wurde seitens IB Kramer der Beschlag Nr. 21874 des Herstellers IPA (Dänemark) mit einem Verriegelungspunkt unten und je drei seitlichen Kraftangriffspunkten im geöffneten Zustand angesetzt (Abb. 2.7).

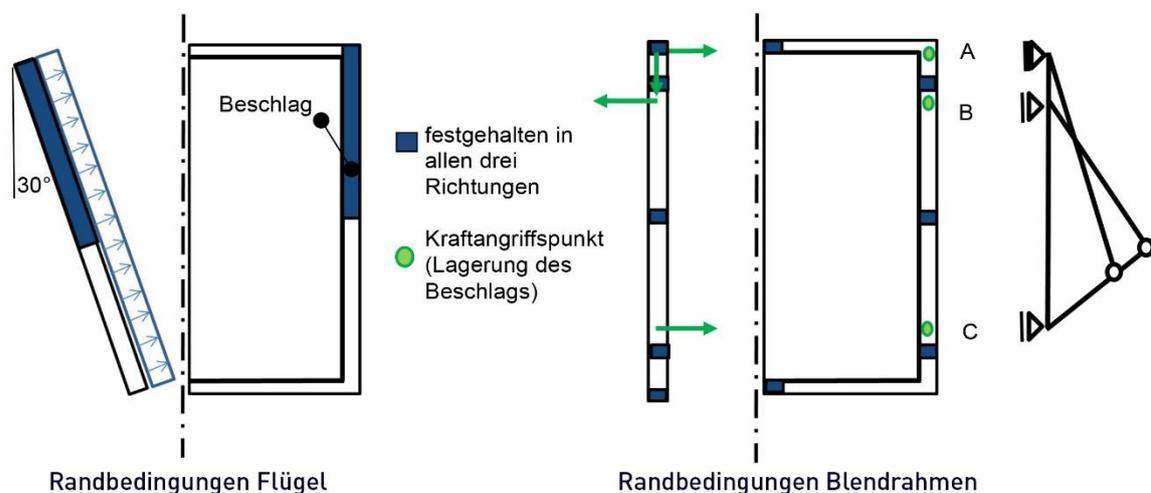


Abb. 2.7 Randbedingungen für Lastfall LF02 und Berücksichtigung des Beschlags im geöffneten Zustand.

Als Einsatzbereich des untersuchten Fensters mit B 1.500 mm x H 1.500 mm wurde eine Gebäudehöhe zwischen 0 m bis 18 m in der Windzone 3 im Binnenland gemäß DIN 1055-4 angenommen, entsprechend einer maximalen Windgeschwindigkeit von 27,5 m/s (10 Bft).

Die Berechnung erfolgte nach der Finiten-Elemente-Methode mit dem Programm ANSYS. Die Materialkennwerte wurden nicht mittels Versuchen an Kleinproben ermittelt. Da es sich um die Entwicklung eines Profils mit Industrie-Standard handelt, wurden die Kennwerte auf einer Literaturrecherche basierend als realistische und von jedem Hersteller zu erreichende Werte angenommen. Aufgrund des relativ geringen E-Moduls im Vergleich mit der Festigkeit des gewählten Werkstoffes GFK wurden zunächst nur die Verformungen des Systems als Bemessungskriterium herangezogen. Um eine gebrauchstaugliche Ausführung gewährleisten zu können, durften sowohl der Flügel, insbesondere im geöffneten Zustand, als auch der Blendrahmen keine großen Verformungen aufweisen.

Die Verglasung wurde als aussteifendes Element herangezogen, mit Kraftübertragung ausschließlich über die Verklebung und Eigengewichtsabtrag auch über eine Klotzung.

Nach diesen Vorgaben wurden die folgenden Lastfälle untersucht:

- LF01 Winddruck im offenen Zustand
- LF02 Windsog im offenen Zustand
- LF03D Winddruck im geschlossenen Zustand
- LF03S Windsog im geschlossenen Zustand

Details zu diesen Szenarien sind dem Anhang zu entnehmen.

2.3.2 Ergebnisse der Berechnungen

In der FEM-Simulation wurde die Profilgeometrie 3.2.10 mit Vakuumverglasungen 2x4 mm respektive 2x5 mm hinsichtlich der vier zuvor definierten Lastfälle untersucht (Tab. 2.2). Die Verformungen des Blendrahmens waren aufgrund mehrerer Anbindungspunkte an den Rohbau - zehn Punkte gleichmäßig verteilt über den Umfang des Fensters - in jedem untersuchten Fall unkritisch klein und sind daher nicht in Tab. 2.2 aufgeführt. Der vollständige Bericht im Anhang enthält auch diese Werte.

Lastfall		Maximale Verschiebung [mm]			
		Verglasung 2x4 mm		Verglasung 2x5 mm	
		Glasscheibe	Flügel	Glasscheibe	Flügel
LF01	Winddruck geöffnet	16,51	8,69	10,43 (-36,8%)	7,98 (-10,6%)
LF02	Windsog geöffnet	32,72	16,74	19,88 (39,2-%)	14,83 (-11,4%)
LF03D	Winddruck geschlossen	7,23	0,028	3,82 (-47,2%)	0,026 (-7,1%)
LF03S	Windsog geschlossen	17,81	1,22	9,87 (-44,6%)	0,99 (-18,9%)

Tab. 2.2 FEM-Simulation der Profilgeometrie 3.2.10, maximale Verschiebungen in Krafrichtung (senkrecht zur Glasoberfläche) und prozentuale Veränderung durch stärkere Verglasung.

Durch die Wahl eines nach außen öffnenden Beschlags ergaben sich für Scheibe und Fensterflügel keine signifikanten Verformungen bei Winddruck im geschlossenen Zustand (LF03D).

Bei den Lastfällen im geöffneten Zustand LF01 und LF02 traten hingegen starke Verformungen auf. Hier wurde deutlich, dass der Einsatz der stärkeren 2x5 mm Vakuumverglasung durch die strukturelle Verklebung von Scheibe und Rahmen die Stabilität des gesamten Fensters steigert. Für die weitere Optimierung des ULTRALIGHT-Fenstersystems (Kapitel 3) wurde daher die Vakuumverglasung mit 2x5 mm angesetzt. Bei Windsog im geöffneten Zustand kam es zu einer sehr starken maximalen Verschiebung von 16,74 mm (mit 2x4 mm VG) bzw. 14,83 mm (mit 2x5 mm VG) des Flügelrahmens. Diese Werte müssen im Hinblick auf die Stabilität der Verglasung und der GFK-Profile als kritisch bezeichnet werden für den Fall, dass das Fenster bei schwerem Sturm (27,5 m/s, 10 Bft) tatsächlich geöffnet wird. Ein realistischeres Nutzerverhalten bestände sicherlich darin, Fenster bei starkem Wind, also ab ca. 6 Bft, geschlossen zu halten.

Die Verschiebung durch Windsog im geschlossenen Zustand (Lastfall LF03S) resultierte in einer Verdrehung des Flügelrahmens und hierdurch zu einer leichten Öffnung der Dichtebene um 1,22 mm (2x4 mm VG) bzw. 0,99 mm (2x5 mm VG), so dass in diesem Bereich insbesondere am oberen Fensterrand Wasser eindringen könnte (Abb. 2.8).

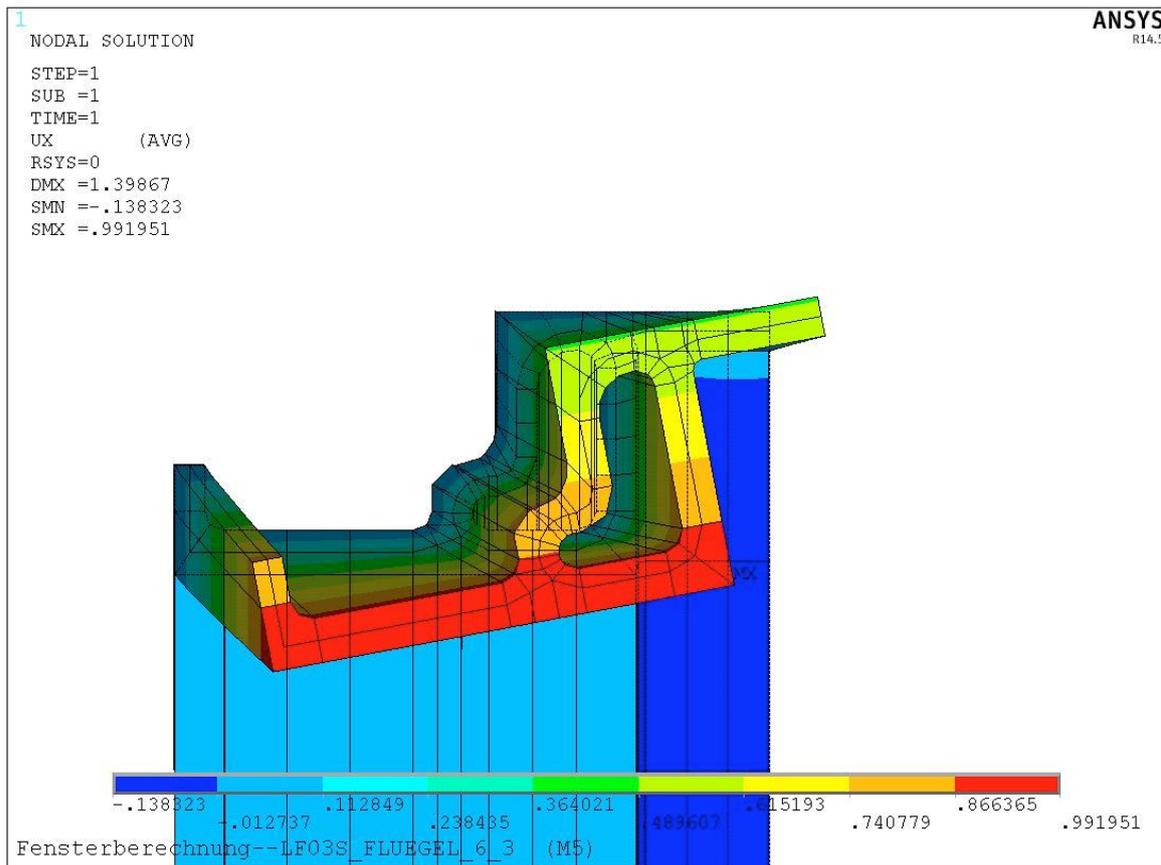


Abb. 2.8 Simulation LF03S an Profil 3.2.10 mit 2x5 mm VG, Verschiebung Verformungsfaktor 10.

Die beobachtete starke Verschiebung war zum Teil auch das Resultat der gewählten einfachen Beschlagstechnik, insbesondere der modellierten Verriegelung in nur einem Punkt. Der vergrößerte Spalt könnte durch den Einsatz hochflexibler Anschlagdichtungen gegebenenfalls noch kompensiert werden.

Nach Rücksprache mit dem Pultrudeur FCT FiberConcept war die Belastung des ausschließlich unidirektional verstärkten GFK-Profiles durch Torsionskräfte unter Windsog jedoch als möglicherweise materialkritisch zu bezeichnen. Es wurde daher empfohlen, das Profil durch Einlage einer GFK-Matte zusätzlich in Querrichtung zu verstärken oder deutlich größer zu dimensionieren. Dieser Ansatz wurde in Kapitel 3 weiter verfolgt.

2.4 Differenzklimaverhalten

Zur Verifizierung der FEM-Berechnungen zum thermischen Bauteilverhalten (Abschnitt 2.2) wurden in Kooperation mit der Firma Josko Fenster & Türen GmbH (Kopfung, Österreich) Versuche am Differenzklimastand durchgeführt.

Hierzu wurde ein Prototyp des ULTRALIGHT-Fensters mit der Profilgeometrie 3.2.10 im Stockaußenmaß B 1000 mm x H 1000 mm mit zwei selbstklebenden Umlaufdichtungen aus Silikonschaum (Firma SICO, Witten) neu abgedichtet. Aufgrund von Fertigungsmängel der zu Projektbeginn vorhandenen GFK-Profile, die das dichte Schließen des Fensters beeinflussten, wurde zusätzlich ein Prototyp der Geometrie 3.2.10 in den selben Abmessungen aus Massivhartholz (Bangkirai) angefertigt (Abb. 2.9). Die Holzoberflächen wurden nicht versiegelt, um die Feuchtigkeitsbildung besser sichtbar zu machen. Gleichzeitig konnten Erkenntnisse für den Einsatz von VG in filigranen Holzprofile gewonnen werden, die für den Austausch von Einfachglas mit VG in alten Bestandsrahmen sehr wichtig sind.



Abb. 2.9 Im Differenzklimastand der Firma Josko installierte Prototypen in GFK (links) und Holz (rechts).

Die Blendrahmen beider Fenster wurden hierzu mit Komtriband in die unten abgebildete Holzkonstruktion eingeklebt (Abb. 2.10).

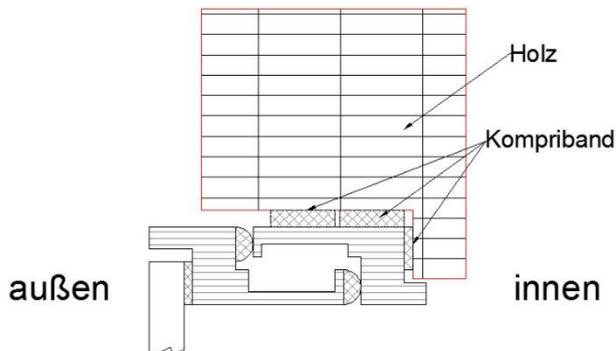


Abb. 2.10 Montage der Prototypen im Differenzklimastand, Querschnitt.

Die THERM-Modelle des Profils 3.2.10 wurden wie folgt an die Prüfsituation angepasst:

- Berechnung der tatsächlich eingebauten Vakuumverglasung des Herstellers Synergy mit $U_g = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Aufstehen der Verglasung auf der unteren GFK-Leiste
- Temperatur innen $23 \text{ }^\circ\text{C}$ statt $20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Austausch des GFK-Sockels durch 4 mm Komtriband

Die FEM-Simulation des thermischen Bauteilverhaltens ergab für das neue Szenario wie zu erwarten höhere raumseitige Oberflächentemperaturen (Abb. 2.11).

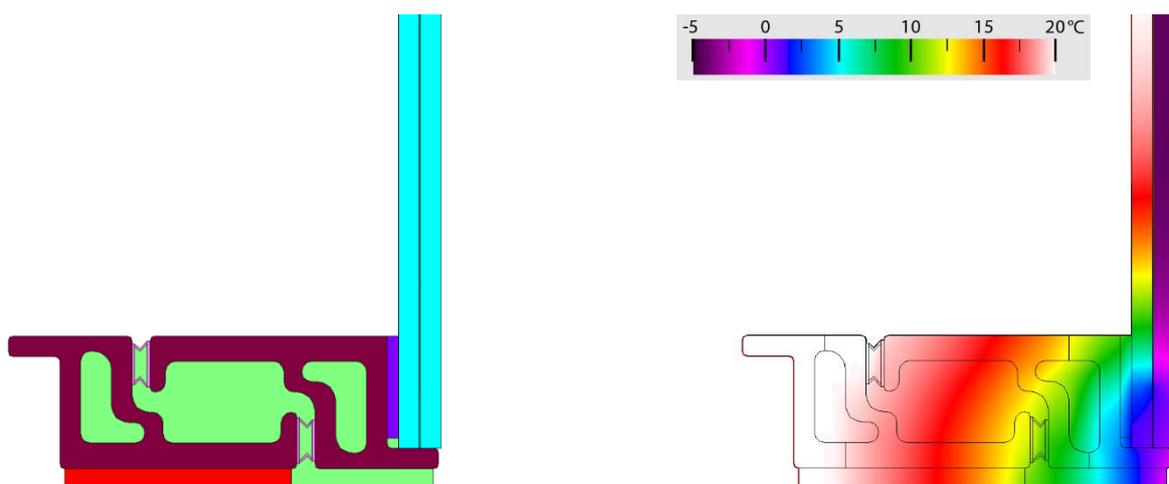


Abb. 2.11 THERM-Modell Ultralight-Profil 3.2.10 (GFK) mit $U_g = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$ in Prüfsituation (links), IR-Falschfarben (rechts) bei $\theta_e = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ und $\theta_i = 23 \text{ }^\circ\text{C}$.

Für das GFK-Fenster wurde so unter diesen Bedingungen eine minimale raumseitige Oberflächentemperatur von 8,3 °C ermittelt. Eine analoge Berechnung für das Fenster aus massivem Hartholz ($\lambda = 0,18 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) ergab für die minimale raumseitige Oberflächentemperatur einen nahezu identischen Wert von 8,4 °C (Abb. 2.12).

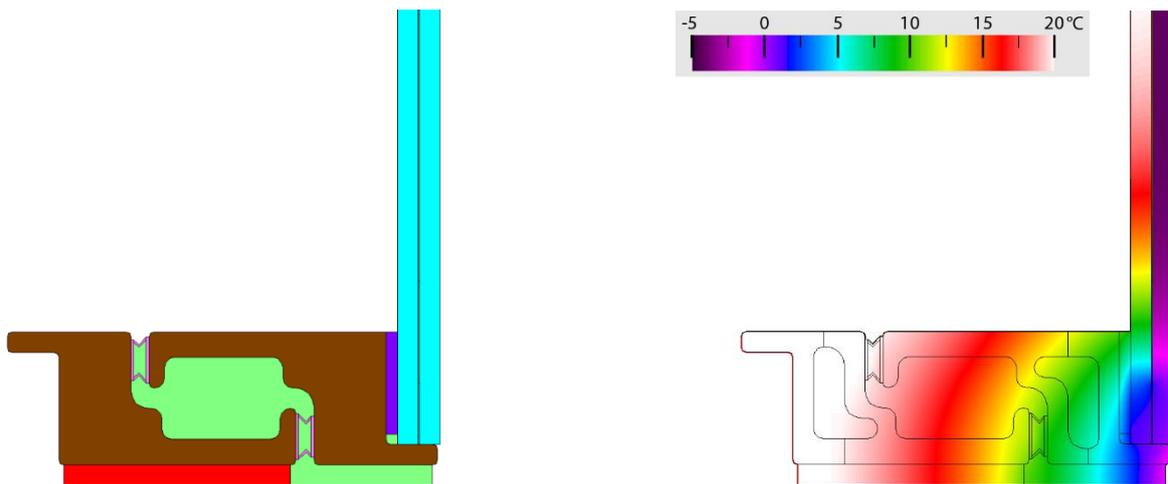


Abb. 2.12 THERM-Modell Ultralight-Profil 3.2.10 (Hartholz) mit $U_g = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$ in Prüfsituation (links), IR-Falschfarben (rechts) bei $\theta_e = -5 \text{ °C}$ und $\theta_i = 23 \text{ °C}$.

Diese Werte wurden im Folgenden experimentell anhand von Differenzklimatemessungen an den Prototypen überprüft.

Die Messung der Oberflächentemperatur am Differenzklimastand erfolgte mit einem Oberflächenfühler an markierten Positionen auf der Raumseite der Verglasung (Abb. 2.13).

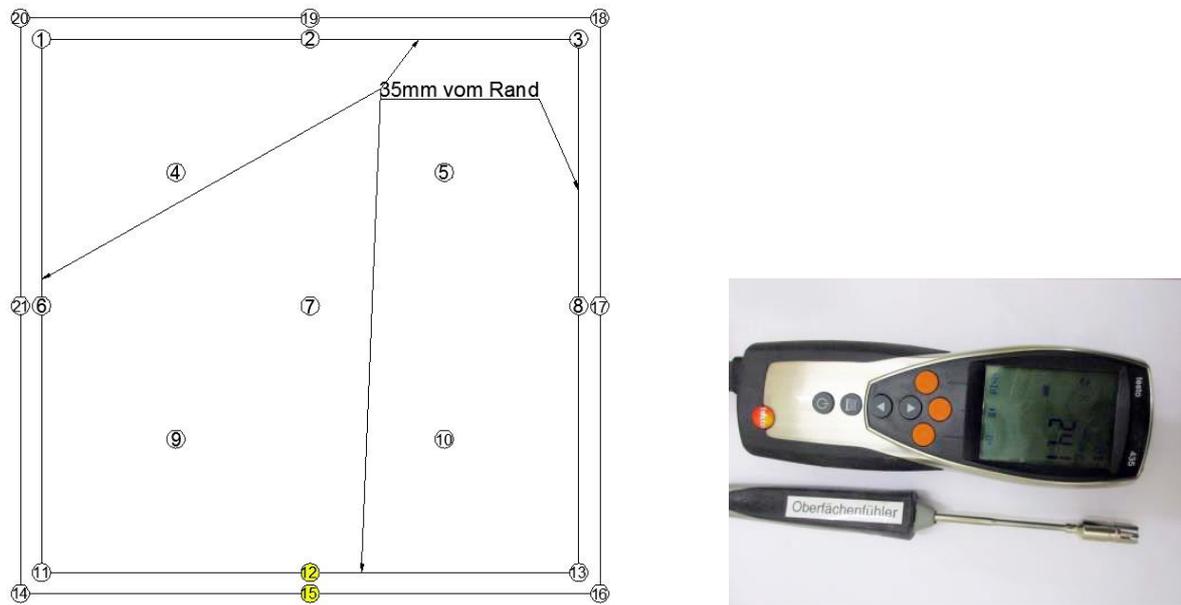
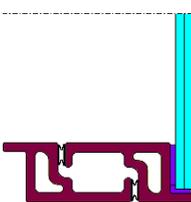
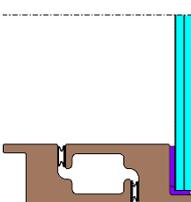


Abb. 2.13 Positionierung der Temperatur-Messpunkte für die Differenzklima-Versuche (links) und zur Messung der Oberflächentemperaturen eingesetztes Multifunktionsmessgerät TESTO 435 (rechts).

Zur Einordnung der Ergebnisse wurden die Messwerte der beiden Punkte 12 und 15 mit den Ergebnissen der FEM-Simulation mit der Software THERM 7.4 verglichen (Tab. 2.3). Alle weiteren Datenpunkte sind in Anhang 8 wiedergegeben.

Profil		θ_{si} [°C]						
		11	12	13	14	15	16	
3.2.10		gemessen in Pos.	12,7	17,4	13,9	3,4	11,4	5,4
	THERM-Simulation	-	17,7	-	-	8,3	-	
3.2.10		gemessen in Pos.	14,9	18,1	15,1	7,5	11,8	6,3
	THERM-Simulation	-	17,7	-	-	8,4	-	

Tab. 2.3 Gemessene und berechnete raumseitige Oberflächentemperaturen bei innen 23 °C (40% rel. Feuchte), außen -5 °C.

Die in den Messreihen ermittelten Temperaturen lagen insbesondere für Messpunkt 15 höher als die simulierten Werte. Dies kann dadurch erklärt werden, dass dem THERM-Modell ein gleichmäßig 12 mm breiter Glasrandverbund (edge seal) zu Grunde liegt. Die real von der Firma Synergy gelieferten Scheiben weisen jedoch ein Glasrandverbund mit variierender Breite zwischen 9 und 12 mm auf - die Simulation bezieht sich daher bewusst auf den ungünstigsten Fall, um produktionsbedingte Schwankungen zu berücksichtigen. Wie im weiteren Verlauf dieses Berichtes ausgeführt wird (Abschnitt 3.5.2), hat eine Reduktion des Glasrandverbundes signifikante Auswirkungen auf das thermische Bauteilverhalten.

Im Bereich der Ecken beträgt die Breite des Randverbundes hingegen bis zu 14 mm. Es wurde beobachtet, dass unter den genannten Bedingungen raumseitig Kondensat im Randbereich der Verglasung auftrat, und zwar verstärkt in den Ecken der Fenster (Abb. 2.14). Der ungleichmäßige Randverbund in diesem Bereich könnte einen Beitrag hierzu leisten.

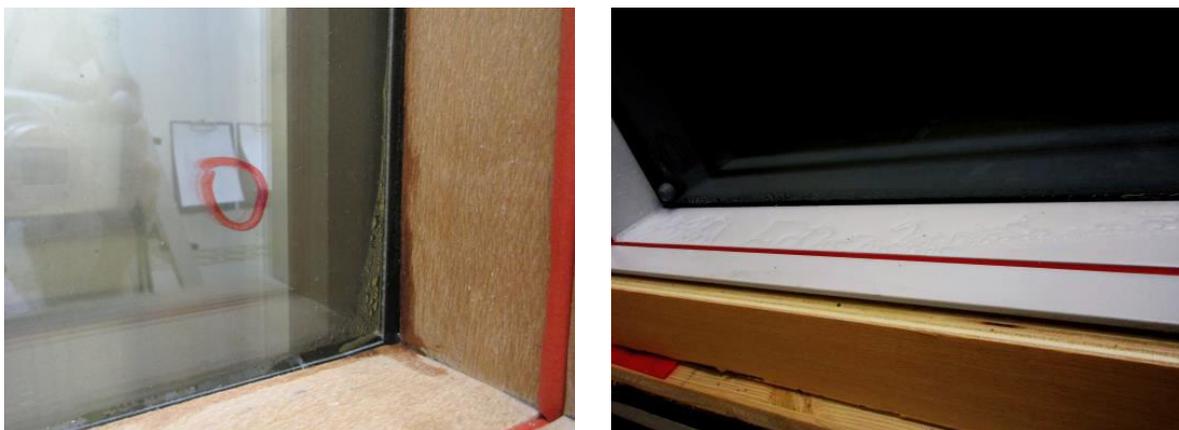


Abb. 2.14 Kondensatbildung am Holzfenster (links) und GFK-Fenster (rechts) bei innen 23 °C (40% relative Feuchte), außen -5 °C.

Dieser Effekt war beim GFK-Fenster stärker zu beobachten in Übereinstimmung mit den gegenüber dem Holzfenster leicht niedrigeren Oberflächentemperaturen.

Mit der Firma Synergy, dem Hersteller der Vakuumverglasung, wurde besprochen, für nachfolgende Projekte Gläser mit schmalere Glasrandverbund und geringeren Toleranzen anzufertigen. Im Forschungsvorhaben Ultralight konnten diese jedoch nicht mehr untersucht werden.

Bei weiterem Absenken der Temperatur auf -10 °C außen kam es nach einigen Tagen bei der Entfernung des Kondensats im Randbereich zu einer Beschädigung des Vakuumventils. Hierbei wurde schließlich auch der abgeschmolzene Glasstutzen zerbrochen, und das Vakuum im Scheibenzwischenraum ging verloren. Als Konsequenz traten nach kurzer Zeit starke Vereisungen auf der raumseitigen Scheibenoberfläche auf (Abb. 2.15).



Abb. 2.15 Beschädigung des Vakuumstutzens (links) und Eisbildung bei Verlust des Vakuums am GFK-Fenster (rechts) bei innen 23 °C (40% relative Feuchte), außen -10 °C .

Auch die Verschlusskappe an der Verglasung des Holzfensters wurde bei Reinigungsarbeiten beschädigt, was in diesem Fall aber keinen Verlust des Vakuums zur Folge hatte. Derartige Beschädigungen dürfen selbstverständlich nicht so leicht herbeizuführen sein. Auch dem Hersteller der Verglasungen ist dieses Problem bekannt, und die Firma Synergy hat inzwischen darauf reagiert. In der neuesten Generation der Vakuumverglasungen ging man zu einem flachen Ventilaufbau über, bei dem keine Teile mehr hervorstehen. Während der Projektlaufzeit konnte die verbesserte Verglasung nur in Form von Handmustern bereitgestellt werden (Abb. 2.16).

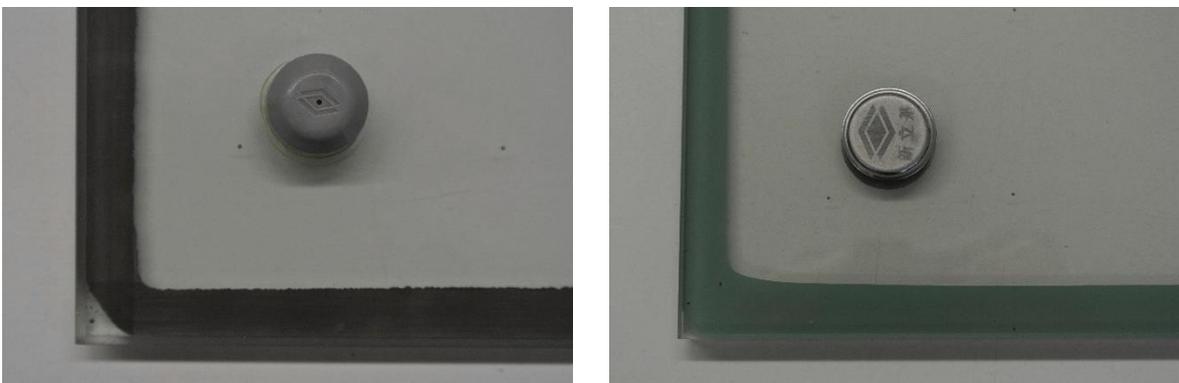


Abb. 2.16 Vakuumverglasungen des Herstellers Synergy mit altem (links) und neuem Vakuumstutzen (rechts).

2.5 Öffnungsarten und Beschläge

Im Rahmen des vorausgegangenen Forschungsvorhabens ULTRASLIM wurde ein Prototyp des Fensters mit Parallel-Ausstellbeschlag hergestellt. Nach wie vor halten wir diese Öffnungsart aufgrund des guten Luftwechsels, der gleichmäßigen Belastung sowie der einfachen Motorisierbarkeit für die geeignete Öffnungsart des ULTRALIGHT-Fensters im Gewerbebau.

Für die Messe BAU 2015 wurde mit einem auf der Profilgeometrie 3.2.10 basierenden Senk-Klapp-Wendefenster eine weitere Öffnungsart realisiert. Nach zahlreichen Gesprächen mit Fensterbauern und Messebesuchern sollten im Rahmen dieses Forschungsvorhabens weitere Öffnungsarten untersucht werden, und zwar mit Fokus auf Dreh-Kipp als marktetabliertem Standard und Senk-Klapp-Wendefenstern als eine Möglichkeit, die Vorzüge eines nach außen öffnenden Fensters mit einer einfachen Reinigung vom Innenraum her zu kombinieren.

Durch intensive Recherche und Messebesuche (fensterbau frontale, DEUBAUKOM, BAU) zeigte sich, dass marktverfügbare Griffe und Verriegelungen nicht ohne Weiteres im neuen Fenstersystem eingesetzt werden konnten, da ihre massive und teilweise komplexe Ausführung der Philosophie des ULTRALIGHT-Prinzips entgegensteht. Aus diesem Grund wurde ein einfacher kombinierter Griff/Zapfenverschluss entwickelt und für die Prototypen durch 3D-Druckverfahren aus Massivkunststoff (ABS und PLA) gefertigt (Abb. 2.17).

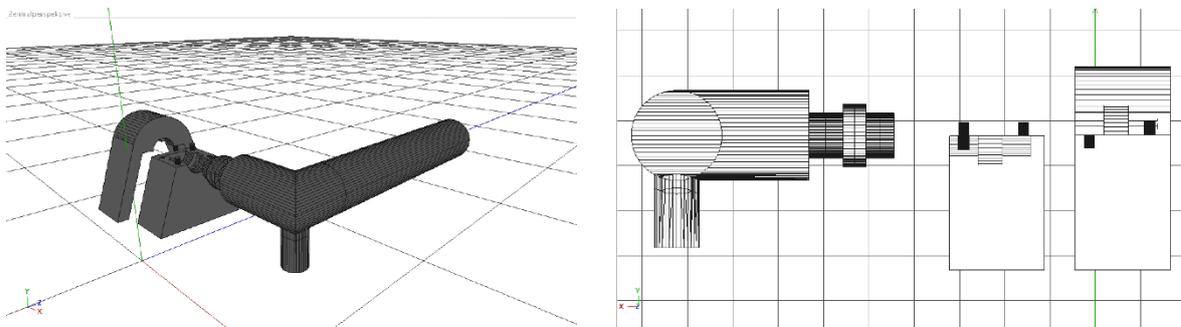


Abb. 2.17 3D-Modell des geplotteten Griff/Verschluss-Mechanismus für das Ultralight-Fenstersystem.

Für eine dauerhafte Anwendung in realen Bausituationen weist dieses Material eine zu geringe Biegefestigkeit auf und würde entsprechend im kritischen Bereich, ähnlich wie kommerzielle PVC-Türgriffe, durch einen Metallzapfen verstärkt werden. Es ist außerdem jedoch bereits möglich, auch faserverstärkte Kunststoffteile zu drucken. Auf diese Weise können Beschläge angefertigt werden, die exakt hinsichtlich Bausituation, Benutzeranforderungen und Design angepasst werden können.

3 Weitere Optimierung des Fenstersystems

3.1 Entwicklungsansatz

Die Analyse der Profilgeometrie 3.2.10 zeigte mehrere Schwachpunkte:

- stellenweise zu niedrige raumseitige Oberflächentemperaturen
- damit verbunden hohes Risiko für den Anfall von Tauwasser an der raumseitigen Übergangsstelle von Verglasung zu Rahmen
- U_w -Werte, die die exzellenten U_g -Werte der neuen VG-Produkte nicht voll ausnutzen
- Einschränkungen bei den Öffnungsarten durch geringen Platz im Profil
- kritische Verdrehung des GFK-Profiles unter Windsog

Der mechanische Schwachpunkt der Geometrie bestand hauptsächlich im Kern, der aus Sicht des externen Ingenieurbüros eher einer quadratischen Form angenähert werden sollte.

Da die extern von der Firma IB Kramer durchgeführten FEM-Berechnungen zum Windlastverhalten des Fensters nur für zwei Geometrien durch Projektmittel gegenfinanziert waren, konnte lediglich eine verbesserte Profilgeometrie untersucht werden. Die im Projekt verfolgte Vorgehensweise war daher, zunächst die Anregungen der Firma IB Kramer aufzunehmen und dann die daraus resultierende neue Profilgeometrie über FEM-Simulationen hinsichtlich des thermischen Bauteilverhaltens zu optimieren. Nach Durchführung dieser Arbeiten wurde abschließend die zweite FEM-Simulation zum Verhalten unter Windlast durchgeführt.

3.2 Verbesserte Profilgeometrie 3.2.11.1

3.2.1 Allgemein

Als Reaktion auf die Forderung nach einer Erhöhung der Profilstärke und des Glaseinstands sowie einer annähernd quadratischen Grundform des Profilkerns wurde das Ausgangsprofil 3.2.10 zur verbesserten Version 3.2.11.1 weiterentwickelt (Abb. 3.1).

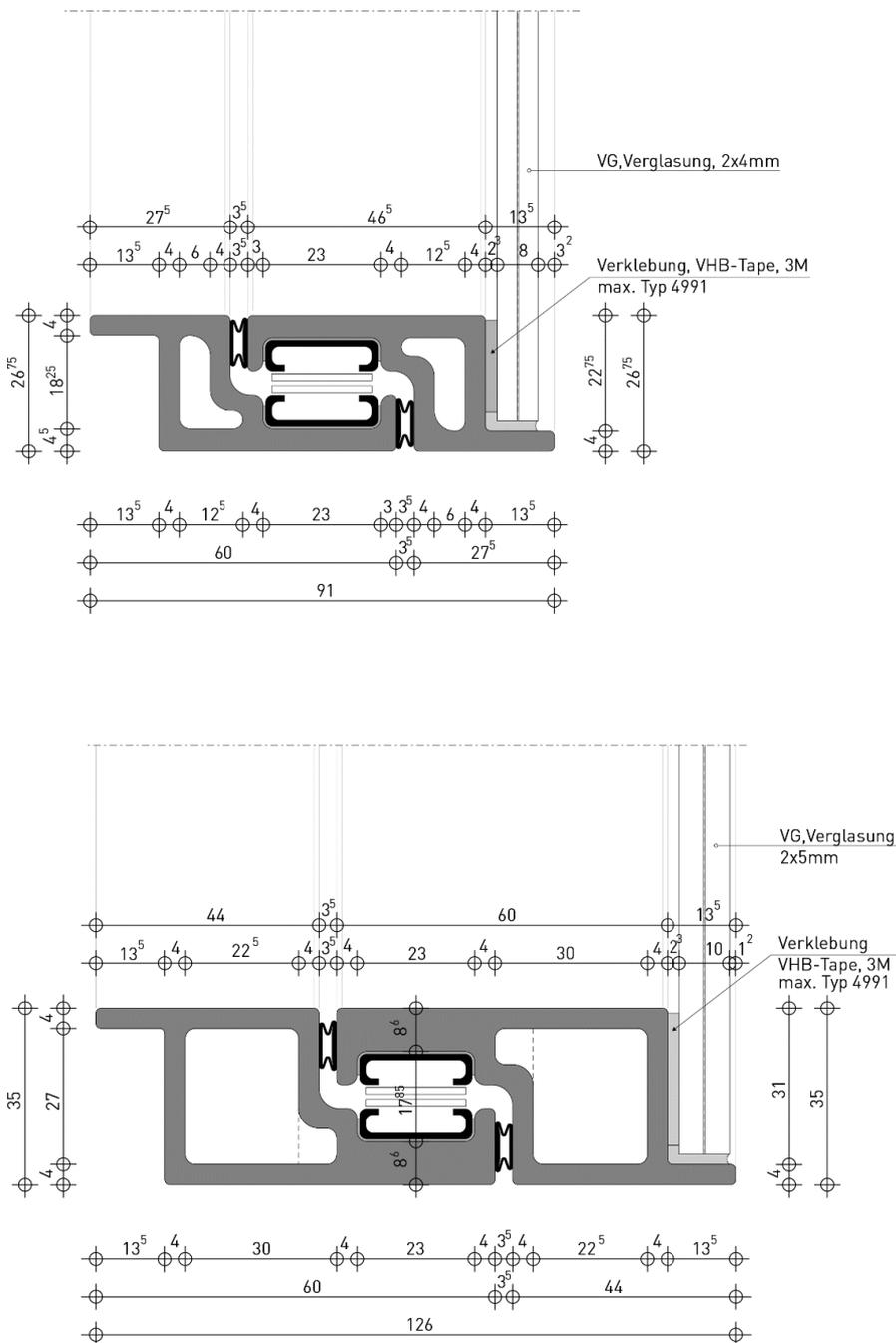
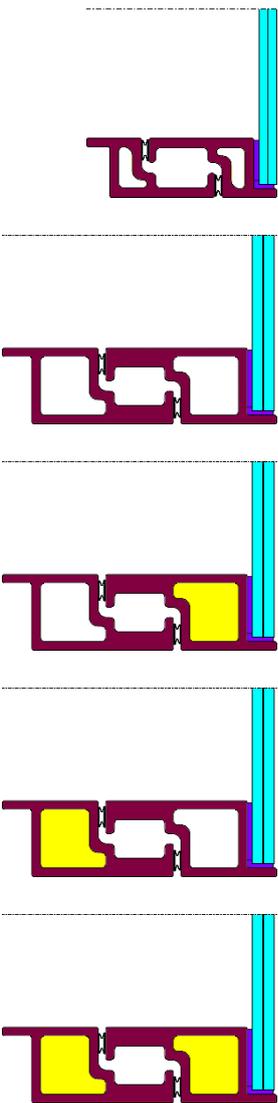
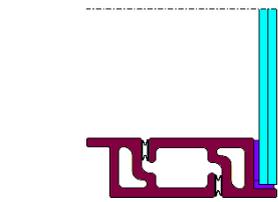
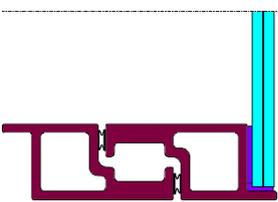
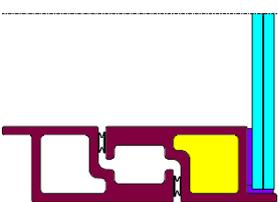
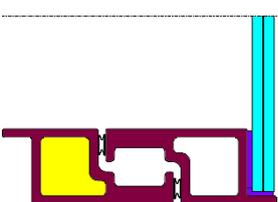
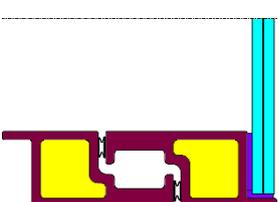


Abb. 3.1 Abmessungen der Profilgeometrien 3.2.10 (oben) und 3.2.11.1 (unten) im Vergleich.

Die Profilhöhe wurde gegenüber der Geometrie 3.2.10 um 35% von 22 mm auf 35 mm, der maximale Glaseinstand ins Profil von 22,75 mm auf 31 mm erhöht. Dieses neue Profil hat den Vorteil, dass es sowohl für die bisher betrachteten Fenster als auch für Türen, Schiebeelemente und größere Festverglasungen zum Einsatz kommen kann. Zusätzlich wurde unter Berücksichtigung der Ergebnisse der FEM-Berechnungen zur Windlast eine stärkere Vakuumverglasung mit 2x5 mm statt 2x4 mm eingesetzt.

3.2.2 FEM-Analyse des Wärmedurchgangs

Das Profil 3.2.11.1 wurde analog zu Abschnitt 2.2 in THERM modelliert. Hierbei wurde ebenfalls wiederum der Einfluss des Verfüllens der Profilkerns mit einem Wärmedämmstoff der WLG 030 untersucht (Tab. 3.1).

Profil		Kern		$\theta_{si,min}$ [°C]	U_w [W/m²K]
		Flügelrahmen	Blendrahmen		
3.2.10		Luft	Luft	6,1	0,84
3.2.11.1		Luft	Luft	8,9	0,81 (-4%)
3.2.11.1		WLG 030	Luft	8,6	0,77 (-8%)
3.2.11.1		Luft	WLG 030	8,8	0,81 (-4%)
3.2.11.1		WLG 030	WLG 030	8,5	0,76 (-10%)

Tab. 3.1 Profil 3.2.11.1 - Einfluss gedämmter Profilkerns und Vergleich zum Ausgangsprofil 3.2.10 ohne Dämmung ($\theta_{si,min}$ für $\theta_e = -5$ °C, U_w für Fenster B 1230 mm x H 1480 mm).

Durch die Modifikationen der Profilgeometrie konnten die minimalen raumseitigen Oberflächentemperaturen signifikant erhöht werden. Auch zeigte sich bei dem höheren Profil ein größerer Einfluss der Kerndämmung des Flügelrahmens, resultierend in signifikant niedrigeren U_w -Werten, aber auch etwas geringerer Oberflächentemperaturen. Nach wir vor

zeigte eine Wärmedämmung des Profilkerns am Blendrahmen keine Auswirkungen, da dieser Kern zu weit raumseitig liegt.

Als Optimum wurde die Geometrie 3.2.11.1 ohne eine Kerndämmung der Rahmen gewählt. Die 10 °C-Isotherme trat jedoch auch bei diesem Profil raumseitig aus dem Bauteil aus, so dass ein größeres Risiko von Tauwasseranfall am raumseitigen Übergang von Verglasung zu Flügelrahmen besteht (Abb. 3.2).

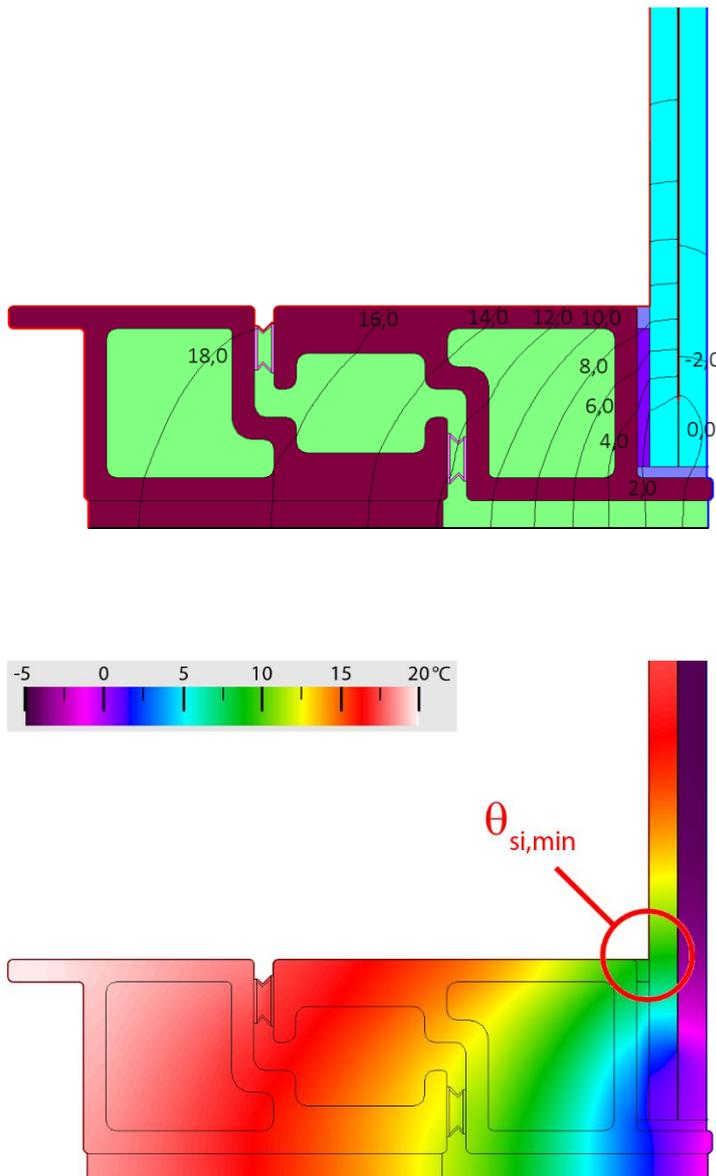


Abb. 3.2 Isothermenverlauf (oben) und Darstellung des Temperaturverlaufs in IR-Falschfarben (unten) der Profilgeometrie 3.2.11.1 bei $\theta_e = -5 \text{ °C}$ und $\theta_i = 20 \text{ °C}$.

Die Geometrie 3.2.11.1 wurde als Zwischenstufe der Entwicklung nicht weiterverfolgt und aus auch nicht einer FEM-Analyse des Verhaltens unter Windlast unterzogen.

3.3 Verbesserte Profilgeometrie 3.2.12.1

3.3.1 Allgemein

Als Reaktion auf die thermische Simulation der Geometrie 3.2.11.1 wurde das Profil nochmals modifiziert, resultierend in der neuen Geometrie 3.2.12.1 (Abb. 3.3).

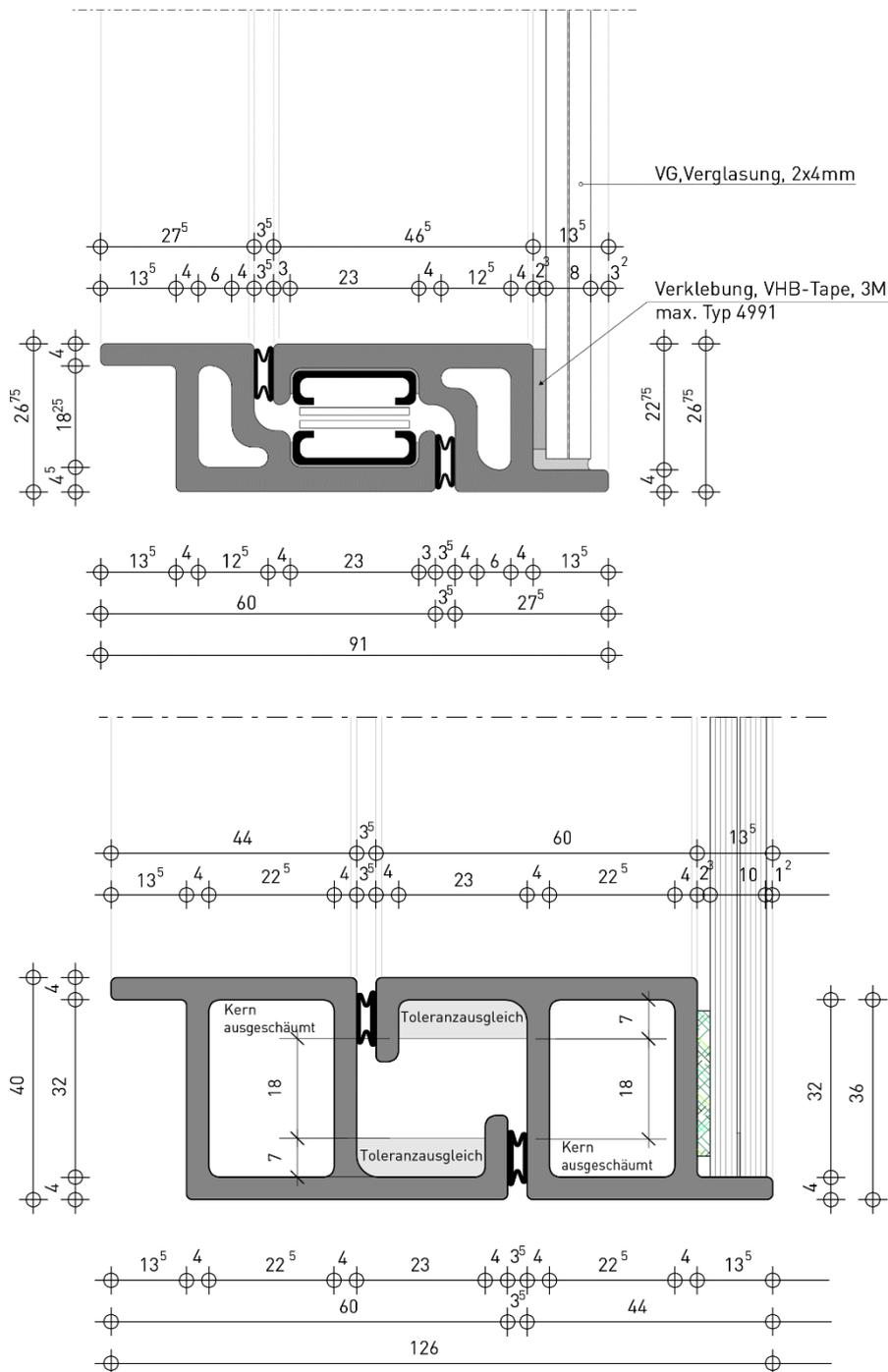


Abb. 3.3 Abmessungen der Profilgeometrien 3.2.10 (oben) und 3.2.12.1 (unten) im Vergleich.

Die Höhe des Profils wurde weiter erhöht – gegenüber der Ausgangsgeometrie 3.2.10 um 54% von 26 mm auf 40 mm. Diese deutliche Vergrößerung war notwendig, um die thermische Schwachstelle des breiten Glasrandverbundes zu kompensieren und insgesamt einen sehr guten Wärmeschutz zu gewährleisten. Gegenüber der Geometrie 3.2.11.1 wurde GFK-Material gespart, da das Profil im Bereich der Beschlagnut weniger massiv ausgelegt ist. Der Toleranzausgleich aus einem Material geringerer Dichte (Kunststoff, Hartholz) dient dem Anpassen an verschiedene Beschlagsgeometrien. Trotz der Verdopplung des Profils handelt es sich bei dem neuen Fenstersystem um ein sehr schlankes Ansichtsprofil, da Flügel- und Blendrahmen hintereinander angeordnet wurden, wie etwa der Vergleich zu einem marktüblichen PVC-Fenstersystem zeigt (Abb. 3.4).

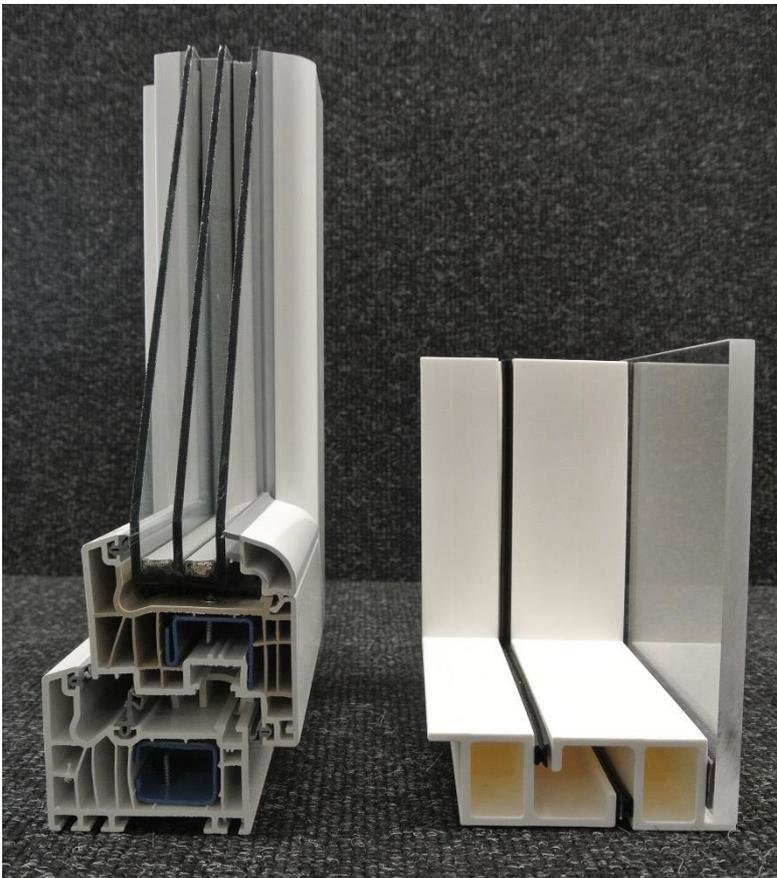
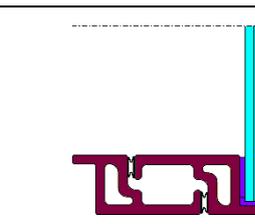
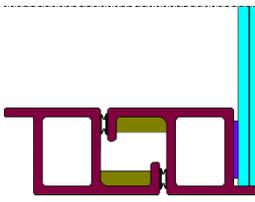
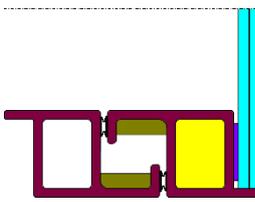
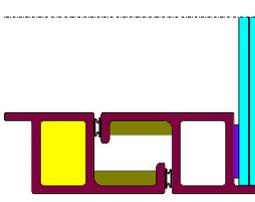
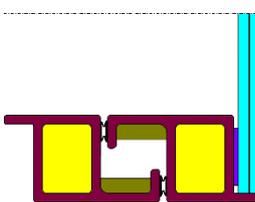
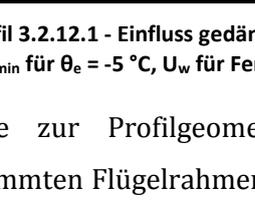


Abb. 3.4 Vergleich von Musterecken eines PVC-Fensters mit Dreifachverglasung (Schüco) und des neuen ULTRALIGHT-Systems (3D-Druck ABS, PMMA-Scheibe entsprechend der Stärke von VG).

3.3.2 FEM-Analyse des Wärmedurchgangs

Das Profil 3.2.12.1 wurde analog zu Abschnitt 2.2 in THERM modelliert. Hierbei wurde ebenfalls wiederum der Einfluss des Verfüllens der Profilkerns mit einem Wärmedämmstoff der WLG 030 untersucht (Tab. 3.2).

Profil		Kern		$\theta_{si,min}$ [°C]	U_w [W/m²K]
		Flügelrahmen	Blendrahmen		
3.2.10		Luft	Luft	6,1	0,84
3.2.12.1		Luft	Luft	10,2	0,77 (-8%)
3.2.12.1		WLG 030	Luft	9,8	0,73 (-13%)
3.2.12.1		Luft	WLG 030	10,1	0,77 (-8%)
3.2.12.1		WLG 030	WLG 030	9,8	0,73 (-13%)

Tab. 3.2 Profil 3.2.12.1 - Einfluss gedämmter Profilkerns und Vergleich zum Ausgangsprofil 3.2.10 ohne Dämmung ($\theta_{si,min}$ für $\theta_e = -5$ °C, U_w für Fenster B 1230 mm x H 1480 mm).

In Analogie zur Profilgeometrie 3.2.11.1 zeigte sich ein starker Einfluss eines wärmegeprägten Flügelrahmens und ein zu vernachlässigender Einfluss einer zusätzlichen Dämmung des Blendrahmens. Für die weiteren Berechnungen wurde wiederum der Aufbau ohne Kerndämmung der Rahmen gewählt.

In der FEM-Simulation verlief die 10°C Isotherme für diesen Fall im Bauteilinneren, wie zu Beginn der Optimierung als Entwicklungsziel festgesetzt (Abb. 3.5).

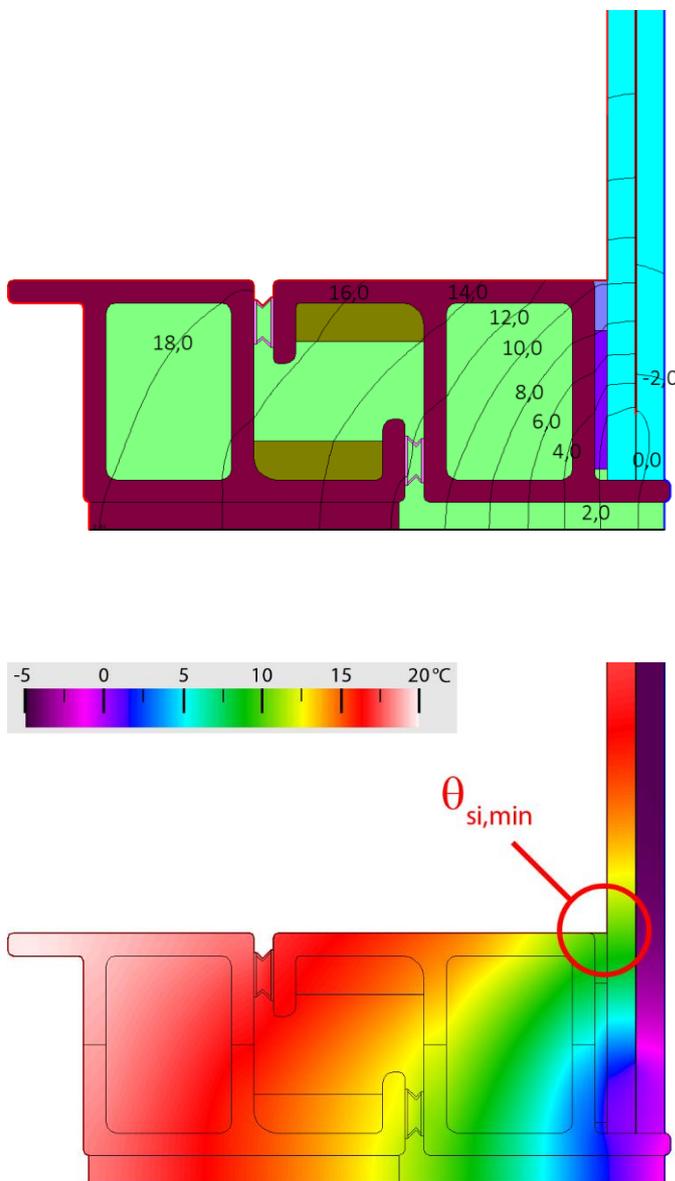


Abb. 3.5 Isothermenverlauf (oben) und Darstellung des Temperaturverlaufs in IR-Falschfarben (unten) der Profilgeometrie 3.2.12.1 bei $\theta_e = -5\text{ °C}$ und $\theta_i = 20\text{ °C}$.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die Profilgeometrie 3.2.12.1 im Folgenden einer Untersuchung des Verhaltens unter Windlast unterzogen.

3.3.3 FEM-Analyse des Bauteilverhaltens unter Windlast

Die verbesserte Profilgeometrie 3.2.12.1 wurde mit dem in Abschnitt 2.2 beschriebenen Modell untersucht und hierzu mit zwei Verglasungsstärken modelliert (Tab. 3.3).

Lastfall		Maximale Verschiebung [mm]			
		Verglasung 2x4 mm		Verglasung 2x5 mm	
		Glasscheibe	Flügel	Glasscheibe	Flügel
LF01	Winddruck geöffnet	11,36	4,63	7,02 (-38,2%)	4,23 (-8,6%)
LF02	Windsog geöffnet	23,35	7,89	13,90 (-40,5%)	7,06 (-10,5%)
LF03D	Winddruck geschlossen	7,04	0,067	3,63 (-48,4%)	0,066 (-1,5%)
LF03S	Windsog geschlossen	14,11	0,85	7,99 (-43,4%)	0,69 (-18,8%)

Tab. 3.3 FEM-Simulation der Profilgeometrie 3.2.12.1, maximale Verschiebungen in Krafrichtung (senkrecht zur Glasoberfläche) und prozentuale Veränderung durch stärkere Verglasung.

Der Vergleich mit der Ausgangsgeometrie 3.2.10 zeigte eine starke Abnahme der maximalen Verschiebungen durch den vergrößerten und quadratischeren Profilquerschnitt (Tab. 3.4).

Lastfall		Maximale Verschiebung [mm]			
		Geometrie 3.2.10		Geometrie 3.2.12.1	
		Glasscheibe	Flügel	Glasscheibe	Flügel
LF01	Winddruck geöffnet	10,43	7,98	7,02 (-32,7%)	4,23 (-47,0%)
LF02	Windsog geöffnet	19,88	14,83	13,90 (-30,0%)	7,06 (-52,4%)
LF03D	Winddruck geschlossen	3,82	0,026	3,63 (-5,0%)	0,066 (+153%)
LF03S	Windsog geschlossen	9,87	0,99	7,99 (-19,0%)	0,69 (-30,3%)

Tab. 3.4 FEM-Simulation der Profilgeometrien 3.2.10 und 3.2.12.1 mit 2x5 mm Verglasung, maximale Verschiebungen in Krafrichtung (senkrecht zur Glasoberfläche) und prozentuale Veränderung durch die verbesserte Profilgeometrie.

Das Verhalten der Geometrie 3.2.12.1 unter Windlast führte nun nicht mehr zu kritischen Verformungen des GFK-Rahmens, so dass das Fenster bis zu einer Gebäudehöhe von 18 m eingesetzt werden kann. Weitere Verbesserungen im Lastfall LF03S könnten durch den Einsatz eines Beschlags mit mehreren Verriegelungspunkten erzielt werden.

3.4 Realisierung weiterer Öffnungsarten

3.4.1 Profil 3.2.12.1T

Um weitere Öffnungsarten für das ULTRALIGHT-Fenstersystem umsetzen zu können, wurde die Beschlagnut von 23 mm auf 30,5 mm vergrößert (Abb. 3.6).

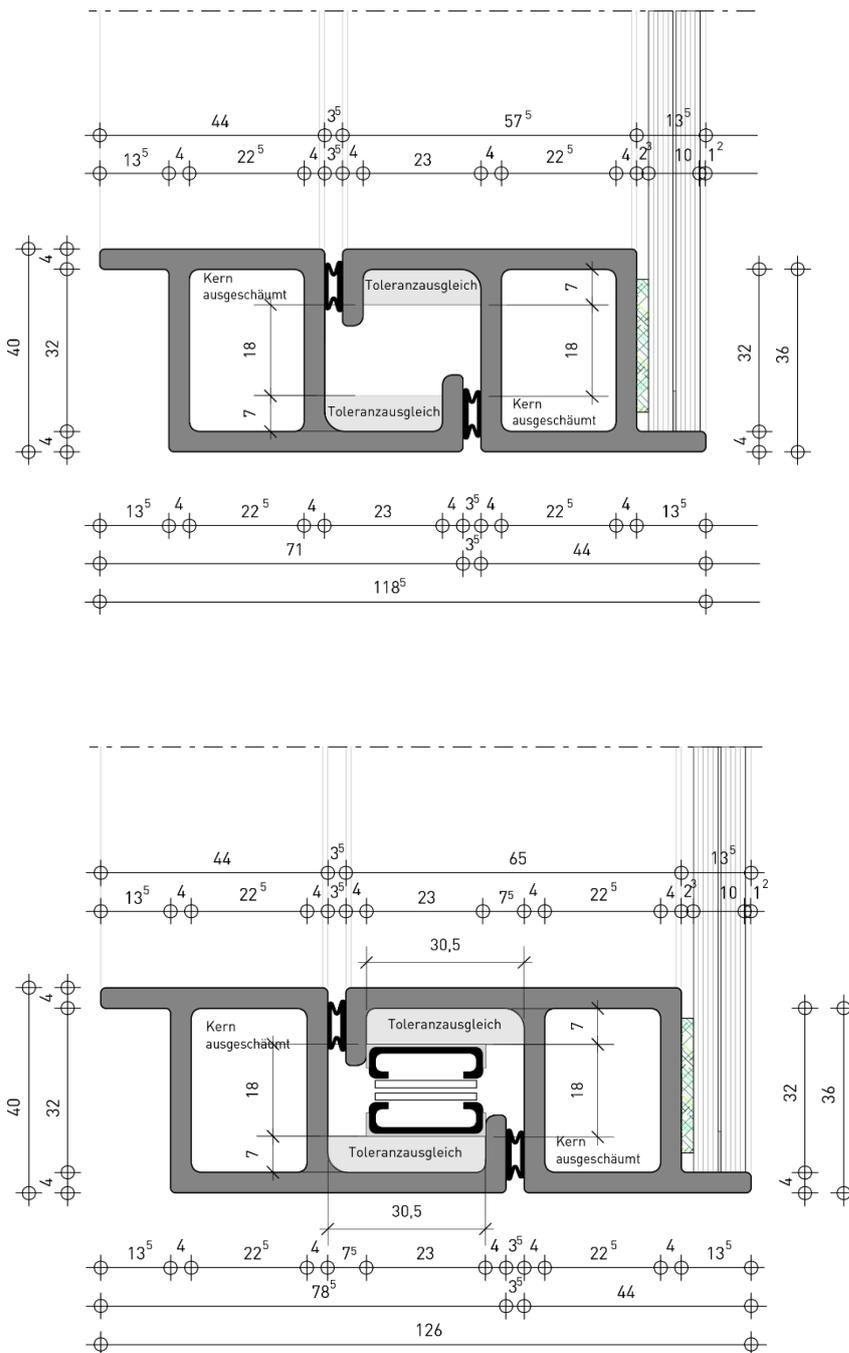


Abb. 3.6 Profilgeometrien 3.2.12.1 (oben) und 3.2.12.1T (unten) im Vergleich.

Durch diese Maßnahme wurde das Anwendungsspektrum des Fensters auf die meisten gängigen Beschlagtypen erweitert. Das neue Profil 3.2.12.1T (T = „tief“) blieb hierbei in den anderen Dimensionen unverändert.

In Diskussion mit dem Büro IB Kramer (Essen) wurde festgestellt, dass durch diese Änderung an der Profilgeometrie nur sehr geringe und dazu positive Auswirkungen auf das Verhalten des Fensters unter Windlast zu erwarten waren. Durch Beschränkungen im Projektetat wurden daher keine neuen Berechnungen für das Profil 3.2.12.1T angefordert.

In den Simulationen zum thermischen Bauteilverhalten zeigte sich wie erwartet ein nahezu identischer Wärmedurchgang für die Profile 3.2.12.1 vs. 3.2.12.1T (Abb. 3.7).

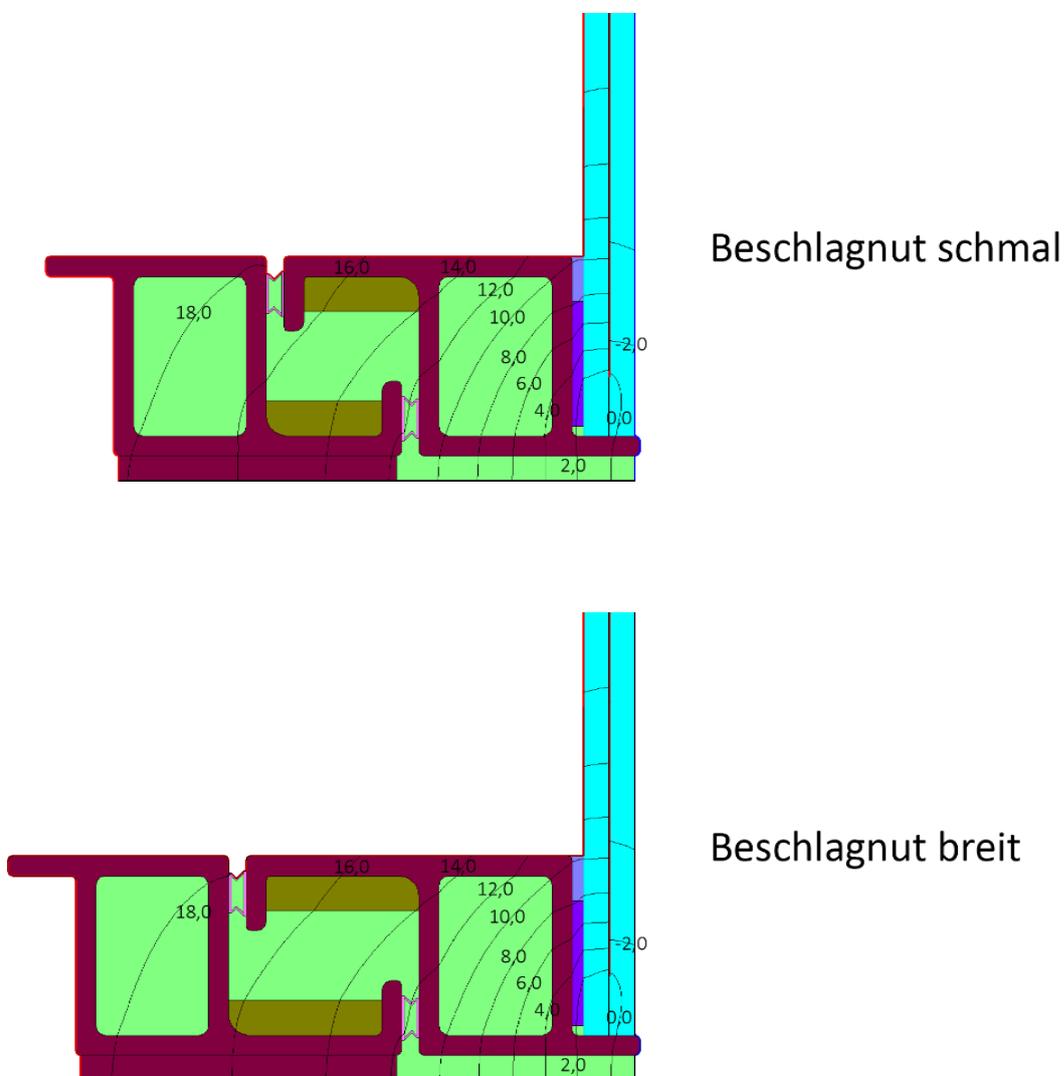
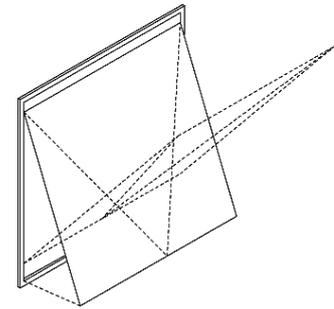


Abb. 3.7 Isothermenverlauf der Profilgeometrien 3.2.12.1 (oben) und 3.2.12.1T (unten) bei $\theta_e = -5\text{ °C}$ und $\theta_i = 20\text{ °C}$.

3.4.2 Senk-Klapp-Wendefenster

Die Öffnungsart Senk-Klapp-Wendefenster weist - wie das bereits umgesetzte Parallel-Ausstellfenster - alle Vorteile eines nach außen hin öffnenden Fensters hinsichtlich Lüftung und Winddruckverhalten auf. Zusätzlich bietet sie die Option einer einfachen Reinigung vom Innenraum her - der gesamte Flügelrahmen kann hierzu nach Lösen einer Arretierung nach innen gedreht werden. Diese Öffnungsart ist damit besonders auch für den Wohnungsbau geeignet.



Mit dem verbesserten ULTRALIGHT-Profil 3.2.12.1T konnte diese Öffnungsart durch Einsatz von Beschlägen der Firma IPA ebenfalls umgesetzt werden. Hierzu wurde gegenüber den Öffnungsarten Parallel-Ausstellfenster und Senk-Klappfenster eine versetzte Anordnung von Blend- und Flügelrahmen gewählt (Abb. 3.8).

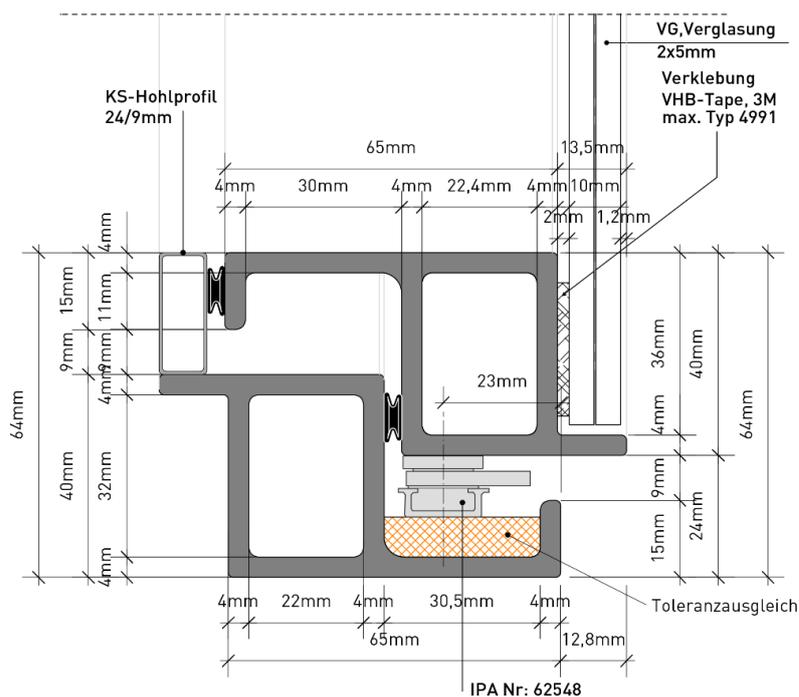


Abb. 3.8 Geometrie 3.2.13.3.2 - Realisierung eines Senk-Klapp-Wendefensters mit dem Beschlag IPA 62548.

Als Konsequenz der versetzten Anordnung der Profile wurde die zweite Dichtebene raumseitig durch Zusatz eines Kunststoff-Hohlprofils geschaffen. Das THERM-Modell wurde zunächst mit einer Kerndämmung (WLG 030) von sowohl Blend- als auch Flügelrahmen erstellt, für die Verglasung wurde wieder ein U_g -Wert von $0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$ angesetzt (Abb. 3.9).

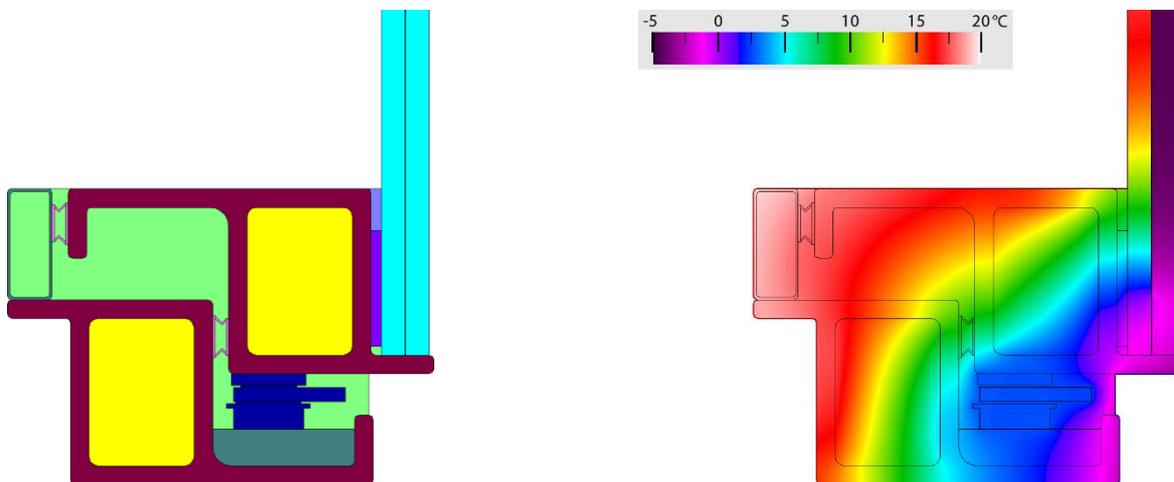
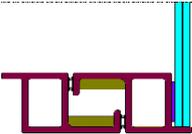
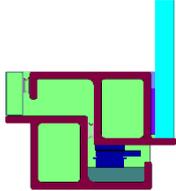
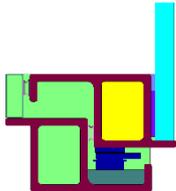
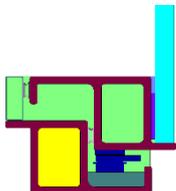
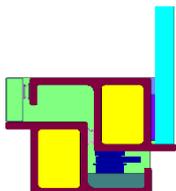


Abb. 3.9 Profilgeometrie 3.2.13.3.2 mit Senk-Klapp-Wendebeslag IPA 62548, $U_g = 0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$
IR-Falschfarben bei $\theta_e = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ und $\theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die minimale raumseitige Oberflächentemperatur wurde in diesem Fall zu $9,1 \text{ }^\circ\text{C}$, der U_w -Wert zu $0,83 \text{ W/m}^2\text{K}$ für ein Fenster der Größe $1230 \text{ mm} \times 1480 \text{ mm}$ berechnet.

Eine Variation der Profil-Kerndämmung zeigte signifikante Auswirkungen auf das thermische Bauteilverhalten mit Optimum bei einem gedämmten Blendrahmen (Tab. 3.5).

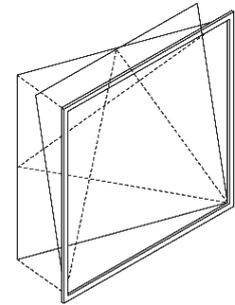
Profil		Kern		$\theta_{si,min}$ [°C]	U_w [W/m²K]
		Flügelrahmen	Blendrahmen		
3.2.12.1T		WLG 030	Luft	10,2	0,77
3.2.13.3.2		Luft	Luft	9,4	0,89 (+16%)
3.2.13.3.2		WLG 030	Luft	9,2	0,83 (+8%)
3.2.13.3.2		Luft	WLG 030	9,5	0,86 (+12%)
3.2.13.3.2		WLG 030	WLG 030	9,1	0,83 (+8%)

Tab. 3.5 Profil 3.2.13.3.2 - Einfluss gedämmter Profilkerns und Vergleich zum Ausgangsprofil 3.2.12.1T ($\theta_{si,min}$ für $\theta_e = -5$ °C, U_w für Fenster B 1230 mm x H 1480 mm, $U_g = 0,42$ W/m²K).

Verglichen mit der Profilgeometrie 3.2.12.1T waren die minimalen raumseitigen Oberflächentemperaturen etwas niedriger, da der Flügelrahmen auch von unten der Außenluft ausgesetzt ist. Der U_w -Wert des Senk-Klapp-Wendefensters lag bei gleichen Außenabmessungen des Fensters deutlich höher. Dies ist auch durch den, der versetzten Anordnung von Blend- und Flügelrahmen geschuldeten, höheren Rahmenanteil bedingt.

3.4.3 Dreh-Kippfenster in GFK-Holz-Hybridbauweise

Ein weiteres Entwicklungsziel war ein nach innen öffnendes Dreh-Kippfenster, da diese Option häufig von Fensterbauern und Bauherren auf Messen nachgefragt wurde. Zwar entstehen durch eine (Kipp-)Öffnung des Fensters zum Innenraum hin Nachteile hinsichtlich der Belüftungseffizienz, des Verhaltens unter Winddruckkräften und der Anforderungen an die Komplexität der Beschläge. Dennoch stünde ein Fehlen dieser in Deutschland beliebtesten Öffnungsart einer erfolgreichen Markteinführung des ULTRALIGHT-Fensters entgegen.



Mit dem verbesserten ULTRALIGHT-Profil 3.2.12.1 konnte diese Öffnungsart als Hybridfenster mit Beschlägen der Firma ROTO Frank umgesetzt werden. Hierzu wurde gegenüber den Öffnungsarten Parallel-Ausstellfenster und Senk-Klappfenster eine versetzte Anordnung von Blend- und Flügelrahmen gewählt, und die Kanten an der Beschlagnut wurden entfernt, da diese für die Öffnungsart nicht benötigt werden (Abb. 3.10).

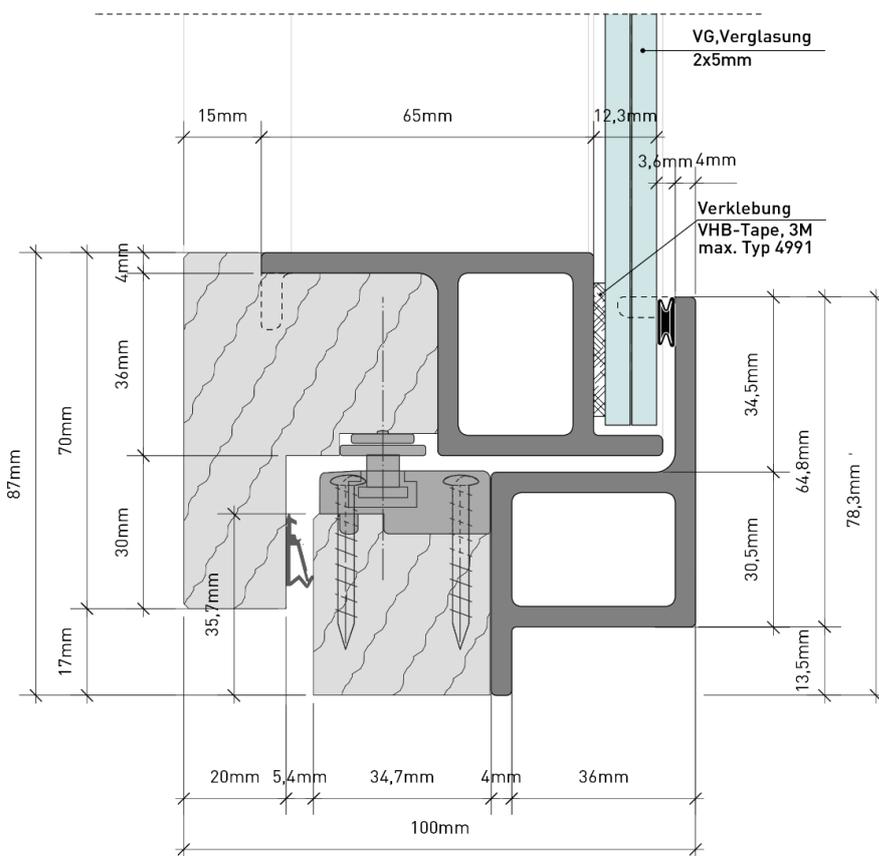


Abb. 3.10 Geometrie 3.2.13. 2 - Realisierung eines Dreh-Kippfensters mit dem Beschlag ROTO NT Designo.

In der Produktion des Fensters könnte dies sehr einfach über ein Ausfüllen des Pultrusionswerkzeugs oder ein nachträgliches Absägen dieser Kanten erreicht werden. Die thermische Bauteilsimulation mit THERM zeigte einen günstigen Temperaturverlauf auch im Bereich des Glasrandverbundes. (Abb. 3.11)

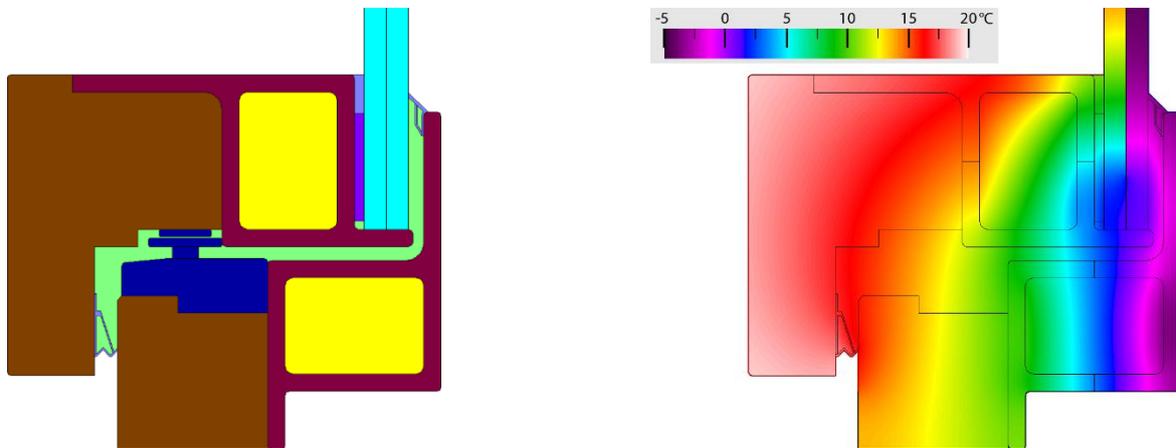
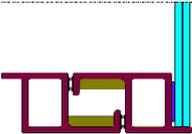
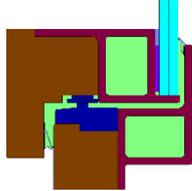
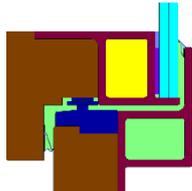
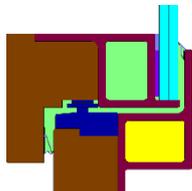
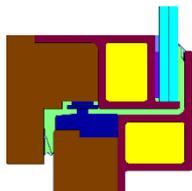


Abb. 3.11 Profilgeometrie 3.2.12.2 mit Dreh-Kippbeschlag ROTO NT Designo, $U_g = 0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$
IR-Falschfarben bei $\theta_e = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ und $\theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die minimale raumseitige Oberflächentemperatur errechnete sich zu $10,5 \text{ }^\circ\text{C}$, d.h. $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ höher als beim Parallel-Ausstellfenster mit identischer Verglasung. Dies ist unter anderem dadurch bedingt, dass bei dieser Öffnungsart eine zusätzliche Überdeckung des Glasrandverbundes durch GFK-Profil, Dichtung und nicht belüfteten Luftraum von außen erfolgt.

Der U_w -Wert $0,74 \text{ W/m}^2\text{K}$ für ein Fenster der Größe B 1230 mm x H 1480 mm betrug, ein dem Parallel-Ausstellfenster (U_w -Wert $0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$) ähnlicher Wert. Die wärmetechnisch günstigere Überdeckung des Glasrandverbundes beim Dreh-Kippfenster – und damit ein niedrigerer Ψ -Wert des Fensters – wird durch den verglichen mit dem Parallel-Ausstellfenster erhöhten Rahmenanteil kompensiert.

Wiederum erfolgte eine Untersuchung der Auswirkung eines Dämmens der Profilhohlräume auf das thermische Bauteilverhalten (Tab. 3.6).

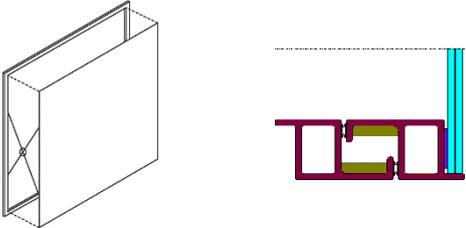
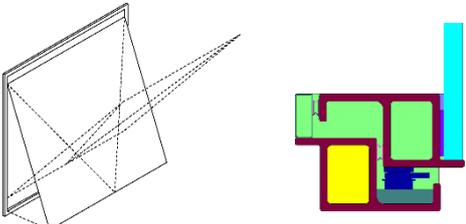
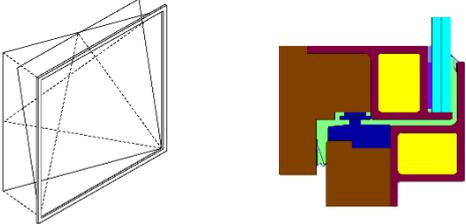
Profil		Kern		$\theta_{si,min}$ [°C]	U_w [W/m²K]
		Flügelrahmen	Blendrahmen		
3.2.12.1T		WLG 030	Luft	10,2	0,77
3.2.12.2		Luft	Luft	10,8	0,82 (+6%)
3.2.12.2		WLG 030	Luft	10,4	0,77 (+0%)
3.2.12.2		Luft	WLG 030	10,9	0,77 (+0%)
3.2.12.2		WLG 030	WLG 030	10,5	0,74 (-4%)

Tab. 3.6 Profil 3.2.12.2 - Einfluss gedämmter Profilkerns und Vergleich zum Ausgangsprofil 3.2.12.1T ($\theta_{si,min}$ für $\theta_e = -5$ °C, U_w für Fenster B 1230 mm x H 1480 mm, $U_g = 0,42$ W/m²K).

In Analogie zur Profilgeometrie 3.2.12.1T zeigte eine Dämmung des Flügelrahmens eine deutliche Verbesserung des U_w -Wertes verbunden mit einer reduzierten minimalen Oberflächentemperatur. Als Optimum für die Variante Dreh-Kipp wurde das Dämmen von sowohl Flügel- als auch Blendrahmen ermittelt.

3.4.4 Vergleich und Bewertung der Öffnungsarten

Abschließend erfolgte ein Vergleich der drei mit dem verbesserten ULTRALIGHT-Profil realisierten Öffnungsarten in der jeweils günstigsten Dämmvariante (Tab. 3.7).

Öffnungsart	Profil	Systemhöhe [mm]	$\theta_{si,min}$ [°C]	U_w [W/m ² K]
Parallel-Ausstell		40 (+5)	10,2	0,77
Senk-Klapp-Wende		64	9,5	0,86 (+12%)
Dreh-Kipp		87	10,5	0,74 (-4%)

Tab. 3.7 Vergleich der unterschiedlichen Öffnungsarten hinsichtlich des thermischen Bauteilverhaltens: Minimale raumseitige Oberflächentemperaturen für $\theta_e = -5$ °C und U_w -Werte für Fenster B 1230 mm x H 1480 mm bei $U_g = 0,42$ W/m²K.

Diese drei sehr unterschiedlichen Öffnungsarten können jeweils basierend auf derselben Profilgeometrie 3.2.12.1 umgesetzt werden. In allen Fällen sind zudem die grundlegenden Geometrien von Blend- und Flügelrahmen identisch, so dass ein Fensterbauer mit nur einer Sorte GFK-Profil verschiedene Anforderungen und Kundenwünsche bedienen kann.

Das zuerst umgesetzte Parallel-Ausstellfenster zeichnet sich aus durch sehr schlanke Ansichtsbreiten, eine effiziente Raumlüftung sowie die Möglichkeit zur einfachen Motorisierung und automatischen Steuerung. Durch die Öffnung nach außen ist einerseits ein Verstellen des Öffnungsweges und damit ein Verhindern manueller Belüftung nicht möglich, andererseits wird der Flügelrahmen bei Winddruck auf die Rahmendichtungen gedrückt. Diese Öffnungsart ist eine besonders gute Wahl für gewerbliche Bauten, bei denen die Fenster von außen gereinigt werden.

Auch ein Senk-Klapp-Wendefenster kann so mit Vakuumglas umgesetzt werden und bietet bei etwas schlechteren Werten für den Wärmeschutz ebenfalls die wesentlichen Vorteile eines nach außen öffnenden Fensters. Die Öffnungsart ist von Vorteil für private Haushalte, bei denen die Möglichkeit einer Reinigung vom Innenraum her gewünscht ist. Systemhöhe und Ansichtsbreite des Rahmens sind für das Senk-Klapp-Wendefenster allerdings höher.

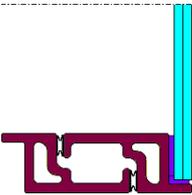
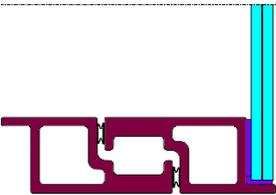
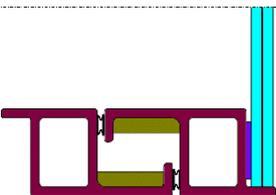
Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten war es schließlich von besonderer Bedeutung, auch die in Deutschland mit großem Abstand beliebteste Öffnungsart Dreh-Kipp zu realisieren. Auch diese konnte mit der ULTRALIGHT-Profilgeometrie umgesetzt werden. Mit dieser Öffnungsart erreicht das ULTRALIGHT-Fenster durch GFK-Holz-Hybridbauweise und günstige Anordnung der Dämmkerne ebenfalls gute U_w -Werte, und die minimalen raumseitigen Oberflächentemperaturen liegen durch die Überdeckung des Glasrandverbundes von außen sogar noch höher als bei den anderen Typen. Dies erfordert eine noch größere Systemhöhe, die aber im Vergleich zu marktüblichen Fenstern noch immer als gering bezeichnet werden kann. Aufwändige Beschlag- und Verriegelungstechnik sowie häufiges Vorkommen falscher Lüftung durch Nutzerverhalten sind bekannte Nachteile des Dreh-Kippfensters, das dennoch aufgrund seiner Beliebtheit beim Verbraucher von keinem deutschen Fensterbauer ignoriert werden kann. Durch die Realisierung eines Dreh-Kipp-Systems mit dem ULTRALIGHT-Profil sollte somit ein wesentliches - oder zumindest von der Fensterbranche so empfundenenes - Hindernis zur Markteinführung von VG-Fenstern beseitigt sein.

3.5 Weitere Maßnahmen zur Optimierung des thermischen Bauteilverhaltens

3.5.1 Variation der Verglasung

Ein offensichtlicher Schritt zur Verbesserung des U_w -Wertes für das Gesamtsystem ist der Einsatz von Vakuumverglasungen mit weiter verbesserten U_g -Werten. Der U_g -Wert einer Vakuumverglasung wird u.a. stark beeinflusst durch die Art der zum Scheibenzwischenraum hin aufgetragenen Low-E-Beschichtungen. Dies resultiert in unterschiedlichen U_g -Werten auch bei Produkten eines Herstellers, je nach der Verfügbarkeit von Low-E-Beschichtungen, die den Herstellungsprozess überdauern. In Anhang 7 sind die entsprechenden Berechnungen verschiedener Vakuumverglasungen des Hersteller Synergy aufgeführt. Die angesetzten Emissivitäten der Low-E-Beschichtungen richten sich hierbei nach Angaben des Herstellers für aktuell oder zeitnah verfügbare Verglasungen.

Die drei Entwicklungsstufen des Ultralight-Profiles wurden im Anschluss mit drei unterschiedlichen Vakuumverglasungen in THERM und WINDOW simuliert (Tab. 3.8).

Profil	U_w [W/m ² K] $\theta_{si,min}$ [°C]		
	$U_g = 0,58$ W/m ² K	$U_g = 0,42$ W/m ² K	$U_g = 0,35$ W/m ² K
3.2.10 	0,98 6,0	0,84 6,1	0,79 6,2
3.2.11.1 	0,95 8,7	0,81 8,9	0,75 9,0
3.2.12.1T 	0,91 9,9	0,77 10,2	0,72 10,3

Tab. 3.8 U_w -Werte für Fenster B 1230 mm x H 1480 mm und minimale raumseitige Oberflächentemperaturen für $\theta_e = -5$ °C in Abhängigkeit von Profil und Verglasung.

Wie zu erwarten zeigte sich die Auswirkung des U_g -Wertes auf die minimalen raumseitigen Oberflächentemperaturen als gering, da diese in der Hauptsache durch das thermische
Weitere Optimierung des Fenstersystems

Verhalten des Glasrandverbundes bestimmt werden, der für alle drei betrachteten Verglasungen als identisch angesetzt wurde. Deutlichere Effekte zeigten sich hingegen auf den U_w -Wert, der durch den Einsatz der besten berechneten Vakuumverglasung nochmals um 6% auf $0,72 \text{ W/m}^2\text{K}$ verbessert werden konnte.

3.5.2 Reduktion der Höhe des Glasrandverbundes

Wie bereits in der Analyse des thermischen Bauteilverhaltens des ULTRALIGHT-Fenstersystems in Kapitel 2 dargestellt, wird der Wärmedurchgang durch eine moderne Vakuumverglasung stark durch den Glasrandverbund aus Glaslot bestimmt, da sich die Scheibe in diesem Bereich thermisch wie eine Einfachverglasung verhält. Der vergleichsweise breite Randverbund der in diesem Forschungsvorhaben eingesetzten Synergy-Vakuumgläser könnte in Zukunft wahrscheinlich reduziert werden. Nach Kommunikation mit der Firma Synergy erscheint eine Verkleinerung von 12 mm auf 5-6 mm zeitnah möglich.

Die Reduktion der Höhe des Glasrandverbundes hatte einen stark positiven Effekt auf die minimalen raumseitigen Oberflächentemperaturen und verringerte damit weiter das Risiko eines Tauwasseranfalls. Der Effekt war im untersuchten Bereich in guter Näherung linear und für niedrigere Außentemperaturen stärker ausgeprägt (Abb. 3.12).

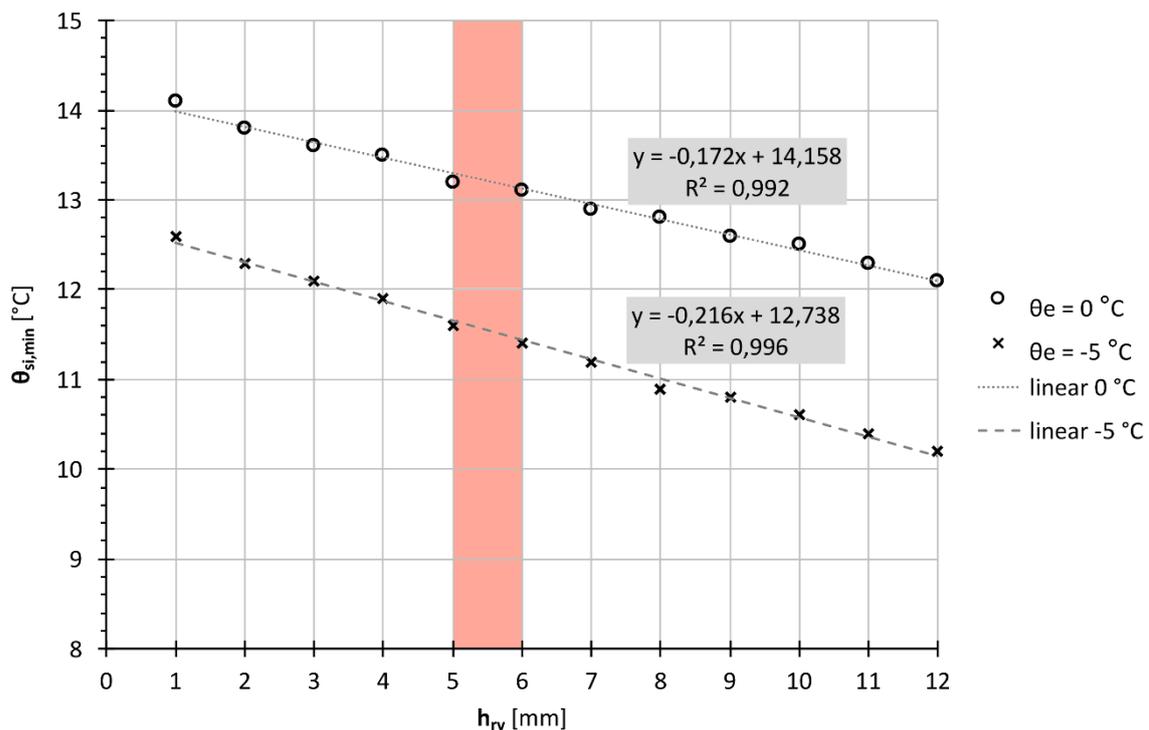


Abb. 3.12 Abhängigkeit der minimalen raumseitigen Oberflächentemperatur $\theta_{si,min}$ von der Höhe des Glasrandverbundes h_{rv} bei verschiedenen θ_e (Profil 3.2.12.1T ohne Kerndämmung, $U_g = 0,42$ W/m²K).

Der im Diagramm rot hinterlegte Bereich bezeichnet die nach Auskunft des Herstellers Synergy anzunehmende technische Grenze für eine weitere Reduktion des Glasrandverbundes. Aufgrund von Fertigungstoleranzen einerseits sowie statischen und dynamischen

Beanspruchungen andererseits ist über diesen Bereich hinaus keine weitere Reduktion zu erwarten.

Die Entwicklung der U_w -Werte für ein Standard-Fenster der Größe B 1230 mm x H 1480 mm in Abhängigkeit von der Höhe des Randverbundes verlief analog (Abb. 3.13).

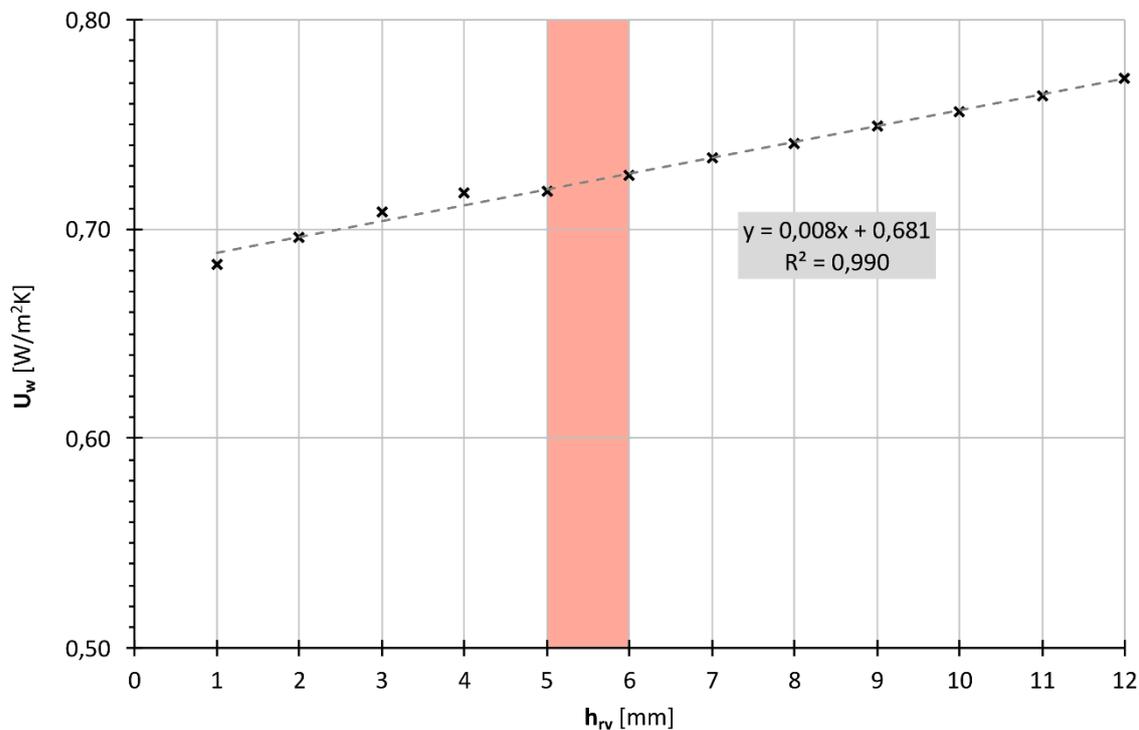


Abb. 3.13 Abhängigkeit des U_w -Wertes (Standardfenster B 1230 mm x H 1480 mm) von der Höhe des Glasrandverbundes h_{rv} (Profil 3.2.12.1T ohne Kerndämmung, $U_g = 0,42$ W/m²K).

Hierbei ist besonders anzumerken, dass diese Vorteile einer zukünftig verbesserten Vakuumverglasung ohne weitere Modifikationen an der Profilgeometrie vorzunehmen genutzt werden können, sobald diese verfügbar ist. Die entsprechenden Scheiben standen für das Forschungsvorhaben UTRALIGHT nicht rechtzeitig zur Verfügung und sollen im Folgeprojekt auf mechanische und thermische Belastbarkeit untersucht werden.

3.5.3 Reduktion der Wärmeleitfähigkeit des Glasrandverbundes

Bei den derzeit verfügbaren Vakuumverglasungen besteht das sogenannte *edge seal* aus einem Glaslot mit durch Zusatz von u.a. Bleioxiden herabgesetztem Schmelzpunkt. In Kooperation mit der Firma Pilkington wurde mittels FEM-Simulation untersucht, welche Auswirkungen auf das thermische Bauteilverhalten der Einsatz eines Materials mit geringerer Wärmeleitfähigkeit hätte.

Ausgehend von der Profilgeometrie 3.2.12.1 und einer Vakuumverglasung 2x5 mm mit einem U_g -Wert von $0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$ bestätigten diese Berechnungen die in Abschnitt 2.2.2 getroffene Annahme, dass eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der geringen Schichtdicke von $0,15 \text{ mm}$ auch über einen großen Bereich nur geringe Auswirkungen zeigt (Abb. 3.14).

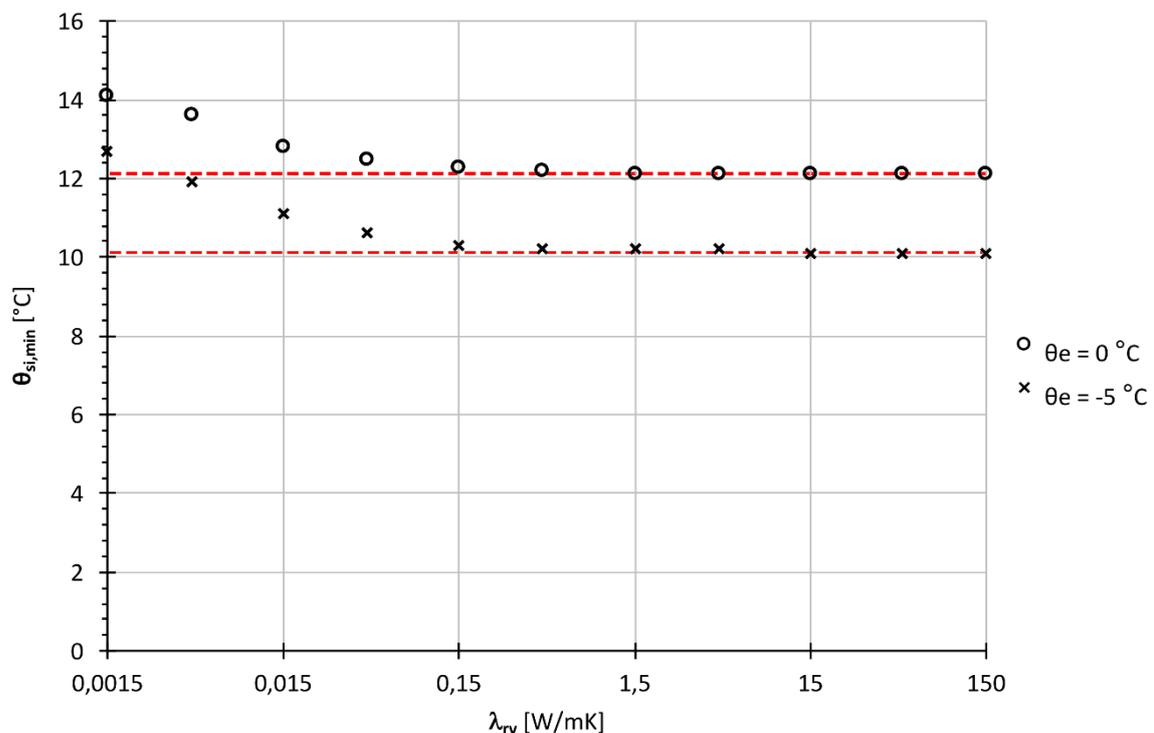


Abb. 3.14 Abhängigkeit der minimalen raumseitigen Oberflächentemperatur $\theta_{si,min}$ von der Wärmeleitfähigkeit des Glasrandverbundes λ_{rv} – LOGARITHMISCH (Profil 3.2.12.1T ohne Kerndämmung, $U_g = 0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Eine Variation von λ_{rv} zeigte über einen weiten Bereich zwischen etwa $0,30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Größenordnung „Kunststoffe“) und $150 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Größenordnung „Aluminium“) nahezu keine Auswirkungen auf die minimale raumseitige Oberflächentemperatur $\theta_{si,min}$. Erst bei Werten unterhalb von ca. $0,15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ war ein deutlicher Effekt zu verzeichnen, signifikante Verbesserungen erst unterhalb von ca. $0,030 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Größenordnung „Dämmstoffe“)

Die Abhängigkeit des U_w -Wertes von λ_{rv} erwies sich als analog (Abb. 3.15).

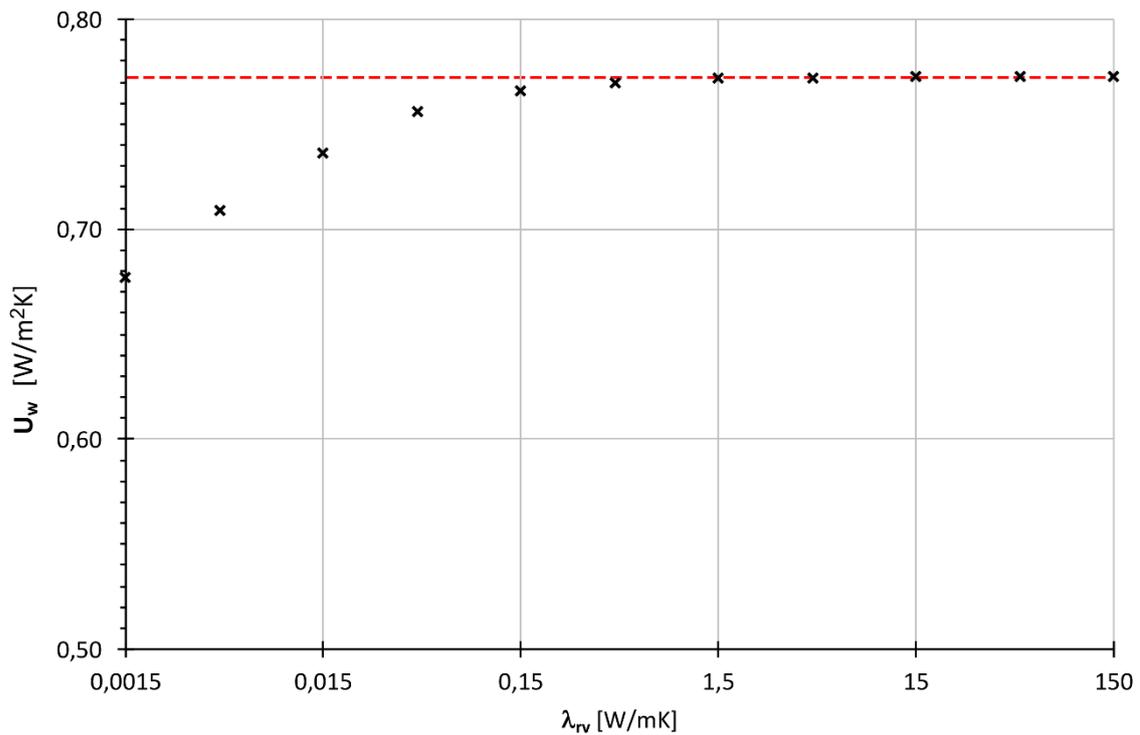


Abb. 3.15 Abhängigkeit des U_w -Wertes von der Wärmeleitfähigkeit des Glasrandverbundes λ_{rv}
- LOGARITHMISCH (Fenster B 1230 mm x H 1480 mm, Profil 3.2.12.1, $U_g = 0,42$ W/m²K).

Das Ersetzen von Glaslot durch ein alternatives Material mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,030 W/m·K oder weniger, das zugleich über Jahre ein Hochvakuum gewährleisten sowie die statischen und dynamischen Belastungen im Glasrandverbund überstehen kann, ist nach Auskunft der Industriepartner und unserer eigenen Einschätzung derzeit nicht verfügbar und auch für die nähere Zukunft nicht zu erwarten. Zur Optimierung des thermischen Bauteilverhaltens mussten daher andere Optionen verfolgt werden.

3.5.4 Außenseitige Wärmedämmung

Eine konstruktiv sehr einfache Maßnahme zur Verbesserung des Wärmeschutzes bietet die außenseitige Dämmung im Bereich des Glasrandverbundes, die im Falle des Ultralight-Fensters zum Beispiel durch Aufkleben eines profilhohen Dämmstreifens vorgenommen werden könnte (Abb. 3.16).

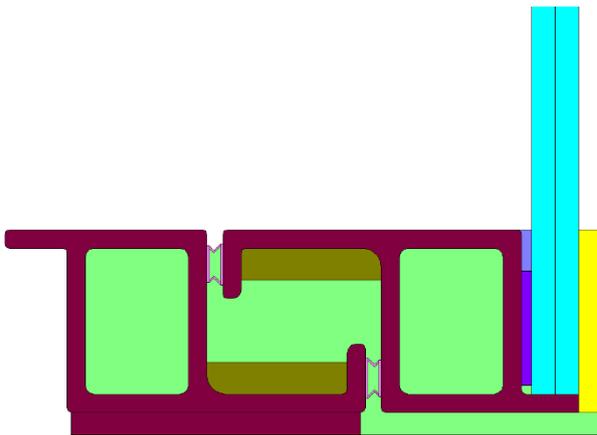


Abb. 3.16 THERM-Modell der Profilgeometrie 3.2.12.1T mit vorgesetzter Dämmschale WLG 030.

Durch diese Maßnahme wird die Ästhetik des Fensters stark beeinträchtigt und die Reinigung des Fensters von außen etwas erschwert, da in diesem Fall nicht mehr alle Komponenten des Flügelrahmens vertikal bündig mit der Fassadenebene abschließen. Dennoch sollte auch dieses Szenario untersucht werden, um die Effektivität einer vorgesetzten Dämmschale beurteilen zu können. Die Berechnungen wurden für eine Vakuumverglasung mit $U_g = 0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$ und zunächst für eine 5 mm starke Dämmschale (WLG 030) durchgeführt (Abb. 3.17).

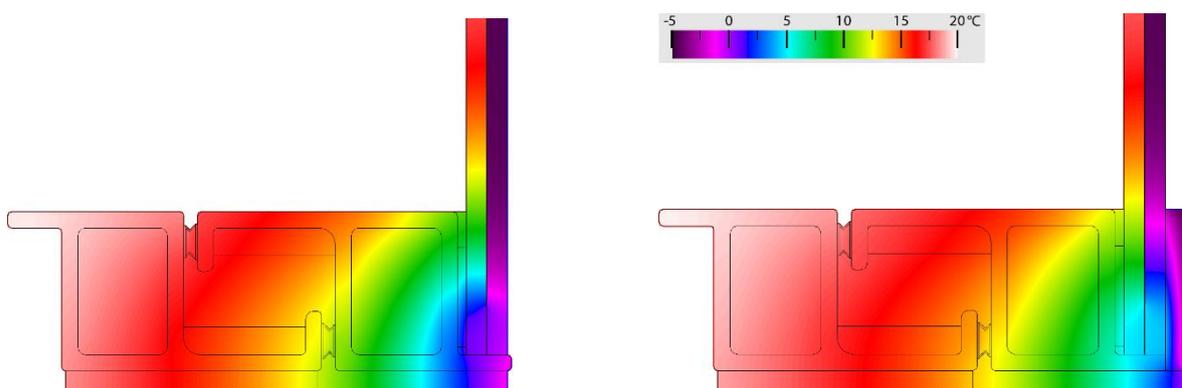


Abb. 3.17 Simulierter Temperaturverlauf (IR-Falschfarben) bei $\theta_e = -5 \text{ °C}$ und $\theta_i = 20 \text{ °C}$ (THERM) für die Profilgeometrie 3.2.12.1T ohne (links) und mit (rechts) vorgesetzter Dämmschale WLG 030, $U_g = 0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$.

In der IR-Falschfarbendarstellung wird deutlich, dass das thermische Bauteilverhalten durch die Dämmschale gerade im kritischen Bereich deutlich verbessert werden konnte. So errechnete sich die minimale raumseitige Oberflächentemperatur bei $\theta_e = -5\text{ °C}$ zu $12,1\text{ °C}$ verglichen mit $10,2\text{ °C}$ ohne Dämmschale. Auch der U_w -Wert konnte durch die Maßnahme um ca. 12% von $0,77\text{ W/m}^2\text{K}$ auf $0,68\text{ W/m}^2\text{K}$ gesenkt werden.

Im Folgenden wurde der Einfluss von Materialstärke d_{ds} und Wärmeleitfähigkeit λ_{ds} der Dämmschale genauer untersucht (Abb. 3.18).

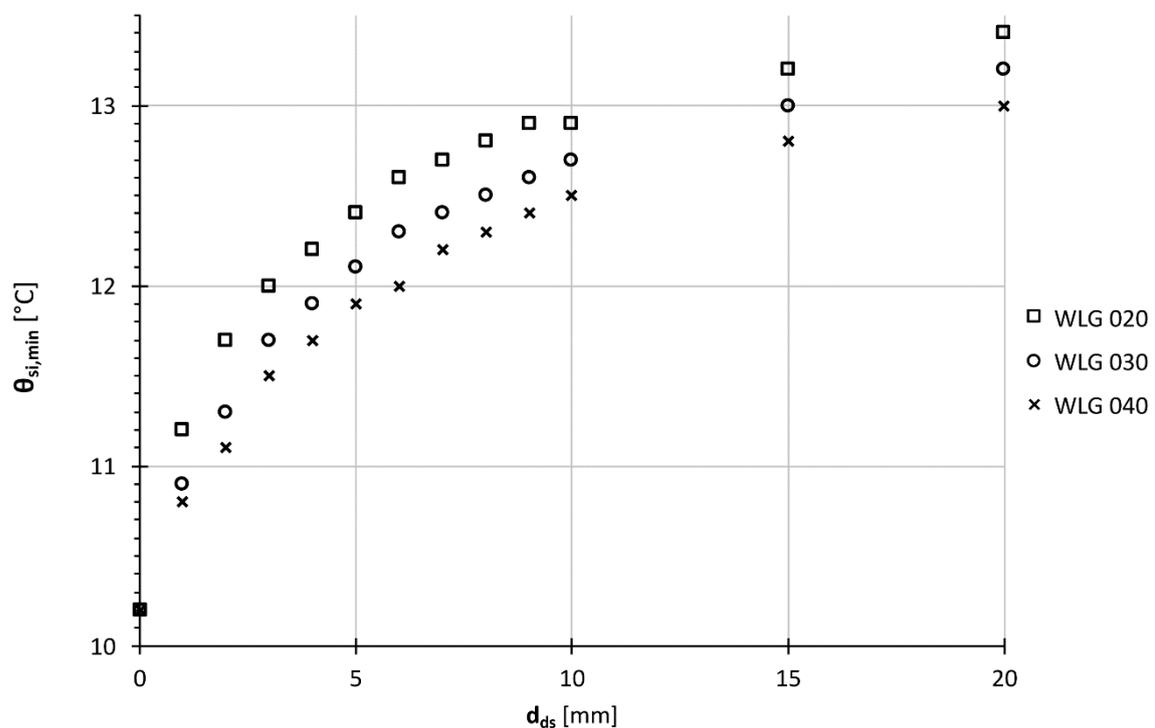


Abb. 3.18 Einfluss von Materialstärke und Wärmeleitfähigkeit einer vorgesetzten Dämmschale auf die minimale raumseitige Oberflächentemperatur $\theta_{si,min}$ bei $\theta_e = -5\text{ °C}$ (Profil 3.2.12.1T, $U_g = 0,42\text{ W/m}^2\text{K}$).

Es konnte festgestellt werden, dass schon die ersten Millimeter außenseitige Wärmedämmung einen stark positiven Effekt auf die raumseitigen Oberflächentemperaturen ausüben. Durch Nutzung von Dämmstoffen wie expandiertem Polystyrol mit Graphitpartikeln (WL032) oder auch Aerogelen (WL014) könnte ein selbstklebendausgerüsteter Dämmstreifen einfach nachträglich aufgebracht werden und raumseitig optimale Oberflächentemperaturen gewährleisten.

Die Berechnungen zeigten auch, dass der Vorsatz einer nur wenigen Millimeter starken Dämmschale eine signifikante Verbesserung des U_w -Wertes bewirkte (Abb. 3.19).

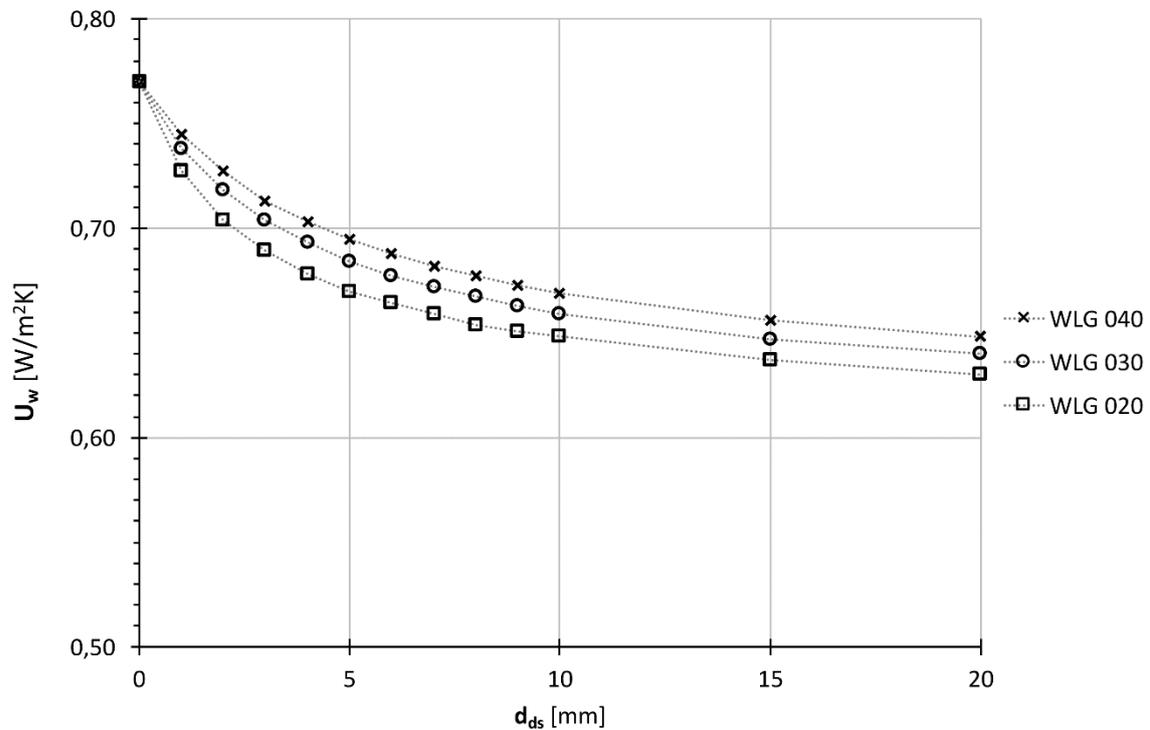


Abb. 3.19 Einfluss von Materialstärke und Wärmeleitfähigkeit einer vorgesetzten Dämmschale auf den U_w -Wert (Fenster B 1230 mm x H 1480 mm, Profil 3.2.12.1T, $U_g = 0,42$ W/m²K).

Der U_w -Werte flachen hingegen bei immer besseren und stärkeren Dämmungen schließlich ab, so dass U_w -Werte von ca. $0,6$ W/m²K auch mit aufbaustarken Dämmschalen der WLG 020 oder besser (Größenordnung Aerogel-Dämmstoffe oder Vakuumdämmungen) kaum unterschritten werden können. Die Möglichkeiten der Leistungsverbesserung durch eine vorgesetzte Dämmschale wurden in diesem Forschungsvorhaben nicht als Prototyp umgesetzt.

3.6 Fertigung neuer GFK-Profile

Nach Abschluss der thermischen und mechanischen Profilloptimierung wurde die FCT FiberConcept GmbH mit der Pultrusion von insgesamt 120 m GFK-Profil der neuen Geometrie 3.2.12.1T beauftragt (Abb. 3.20).

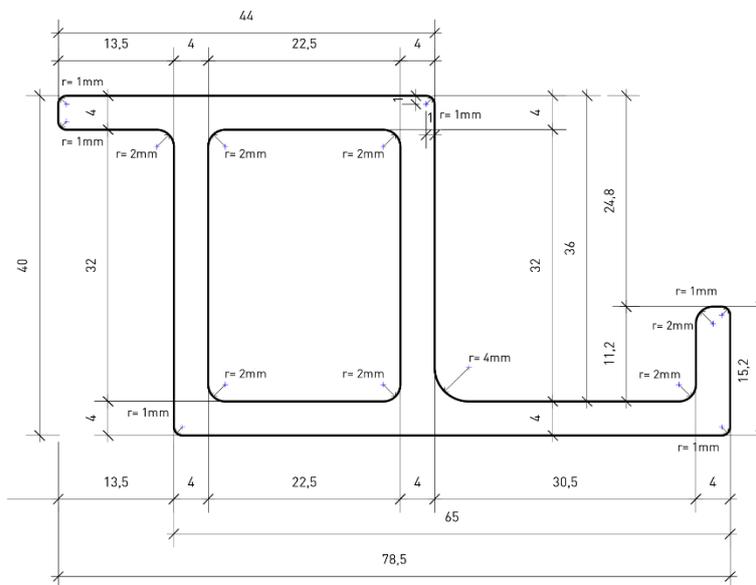


Abb. 3.20 Bemaßter Profilquerschnitt der Geometrie 3.2.12.1T zur Pultrusion.

Als Material der Profile wurde glasfaserverstärktes Polyesterharz gewählt, das über Beimischung von Aluminiumtrihydroxid (ATH) schwerentflammbar und selbstverlöschend eingestellt war. Der Werkstoff wurde in RAL 7032 (kieselgrau) eingefärbt, erscheint durch den hohen Glasfaseranteil jedoch leicht heller im Erscheinungsbild.

Aufgrund einer Überlastung der Produktionsstellen konnten die neuen Profile der Geometrie 3.2.12.1T nicht rechtzeitig fertiggestellt und geliefert werden, um innerhalb der Projektlaufzeit einen weiteren Fensterprototypen zu bauen und zu prüfen.

Die Profile stehen zukünftig für den Bau weiterer Prototypen zur Verfügung und sollen im laufenden Nachfolgeprojekt „VG-Fassade“ (SWD – 10.08.18.7-15.39) genutzt werden, um z.B. die Konzeption von GFK-Holz-Hybridfenstern oder den Einsatz als Zusatzprofil in Pfosten-Riegelfassaden zu untersuchen (Abb. 3.21).

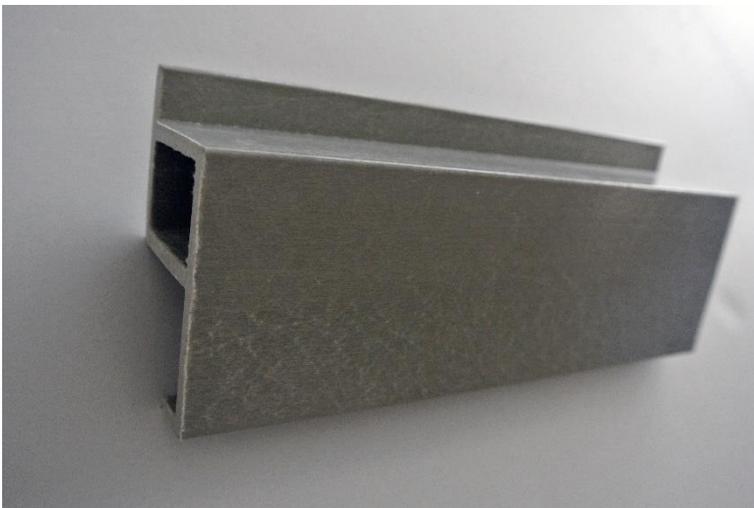
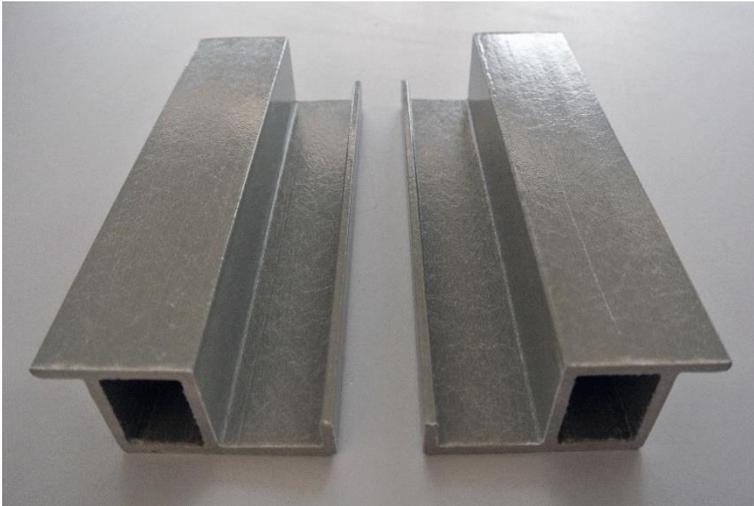


Abb. 3.21 Pultrudierte GFK-Profile mit der verbesserten Geometrie 3.2.12.1T.

4 Vakuumverglasungen im Bestandsbau

4.1 Problemstellung und Beispielobjekt

Um die ehrgeizigen Ziele der Energiewende zu erreichen, ist es besonders wichtig, auch im Bestand die energetische Sanierung weiter voranzutreiben. Aufgrund des geringen Gewichts und der geringen Aufbaustärke von Vakuumverglasungen, können diese gerade im Baubestand und sogar bei der Sanierung denkmalgeschützter Gebäude wertvolle Beiträge leisten. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass der Austausch von Zweifach- und insbesondere alter Einfachverglasungen durch Vakuumglas große Auswirkungen auf den Wärmedurchgang und das Feuchtemanagement des gesamten Bauteils mit sich zieht.

Die optimalen Sanierungsmaßnahmen und insbesondere der korrekte Einsatz von Dichtungssystemen wurden beispielhaft an einem ausgemusterten Bestandsfenster untersucht. Es handelte sich hierbei um ein Holz-Verbundfenster mit zwei Einfachverglasungen und luftgefülltem Scheibenzwischenraum (Abb. 4.1).



Abb. 4.1 Innen- (links) und Außenansicht (rechts) des Altbaufensters vor der Sanierung.

Das Bestandsfenster wies folgende Eckdaten auf:

- Äußere Abmessungen: BxHxT = 708 mm x 878 mm x 80 mm
- Verglasung: 2 Scheiben á 3 mm mit einem luftgefüllten SZR von 29 mm
- Rahmen: Fichtenholz massiv, Stärke des Blendrahmens 61 mm
- Dichtungen: eine Dichtebene

Ausschlaggebend für die Wahl des Objektes waren zwei Hauptfaktoren: Der relativ komplexe Aufbau des alten Verbundfensters machte es möglich, die Lösung vielfältiger Dichtprobleme und bauphysikalischer Anforderungen exemplarisch aufzuzeigen.

Durch die Verbundbauweise mit Holzrahmen verfügte das Fenster außerdem bereits über einen für Altbaufenster vergleichsweise niedrigen U_w -Wert. Es sollte untersucht werden, ob auch bei Fenstern dieser Art signifikante energetische Einsparungen durch den Einbau von Vakuumglas erreicht werden können.

4.2 Berechnung des U_w -wertes nach DIN EN ISO 10077-1

Zunächst wurde der U_g -Wert der Verglasung näherungsweise nach dem Verfahren der DIN EN ISO 10077-1 berechnet. Hierbei gilt:

$$U_g = \left(\frac{1}{U_{g1}} - R_{si} + R_s - R_{se} + \frac{1}{U_{g2}} \right)^{-1}$$

mit

U_{g1}	Wärmedurchgangskoeffizient der außenseitigen Verglasung
U_{g2}	Wärmedurchgangskoeffizient der raumseitigen Verglasung
$R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$	Wärmedurchlasswiderstand raumseitige Oberfläche aus Tabelle A.1
$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$	Wärmedurchlasswiderstand außenseitige Oberfläche aus Tabelle A.1
$R_s = 0,186 \text{ (m}^2\text{K)/W}$	Wärmedurchlasswiderstand Zwischenraum, aus Tabelle C.1 für $d(\text{Luftschicht}) = 20 \text{ mm}$

Die U_g -Werte der einzelnen Scheiben errechnen sich nach

$$U_{gn} = \left(R_{se} + \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{si} \right)^{-1}$$

Mit $d = 3 \text{ mm}$ und λ (Floatglas) = $1,00 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ folgt

$$U_{g1} = U_{g2} = \left(0,04 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} + \frac{0,003 \text{ m}}{1,00 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})} + 0,13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right)^{-1} = 5,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

und damit $U_g = 2,8 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Der Wärmedurchgangskoeffizient U_w des gesamten Fensters errechnet sich nach

$$U_w = \frac{U_g \cdot A_g + U_f \cdot A_f + \Psi_g \cdot l_g}{A_g + A_f}$$

mit

$A_g = 0,310 \text{ m}^2$ Flächenanteil der Verglasung

$A_f = 0,323 \text{ m}^2$ Flächenanteil des Rahmens

$l_g = 2,25 \text{ m}$ äußere Gesamtumfangslänge der Verglasung

Ψ_g längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient

Anhand des von DIN EN ISO 10077-1 Diagramm D.3 zur näherungsweise Betrachtung von Fensterrahmen (Nadelholz) wurde $U_f = 1,7 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ berechnet. Für den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten wurde in Orientierung an DIN EN ISO 10077-1 Anhang E.3 ein Wert von $\Psi = 0,05 \text{ W}/\text{mK}$ angenommen.

Aus diesen Werten ergab sich für das Fenster vor der energetischen Sanierung ein Wert von $U_w = 2,4 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

Auch wenn die Berechnung nach der DIN EN ISO 10077-1 mehrere Näherungen beinhaltet, erlaubt sie es, die Effektivität einer energetischen Sanierung mit Vakuumglas abzuschätzen und Trends aufzuzeigen. Im Folgenden wurde die Abhängigkeit des U_w -Wertes vom U -Wert der neu eingesetzten inneren Scheibe U_{g2} untersucht (Abb. 4.2).

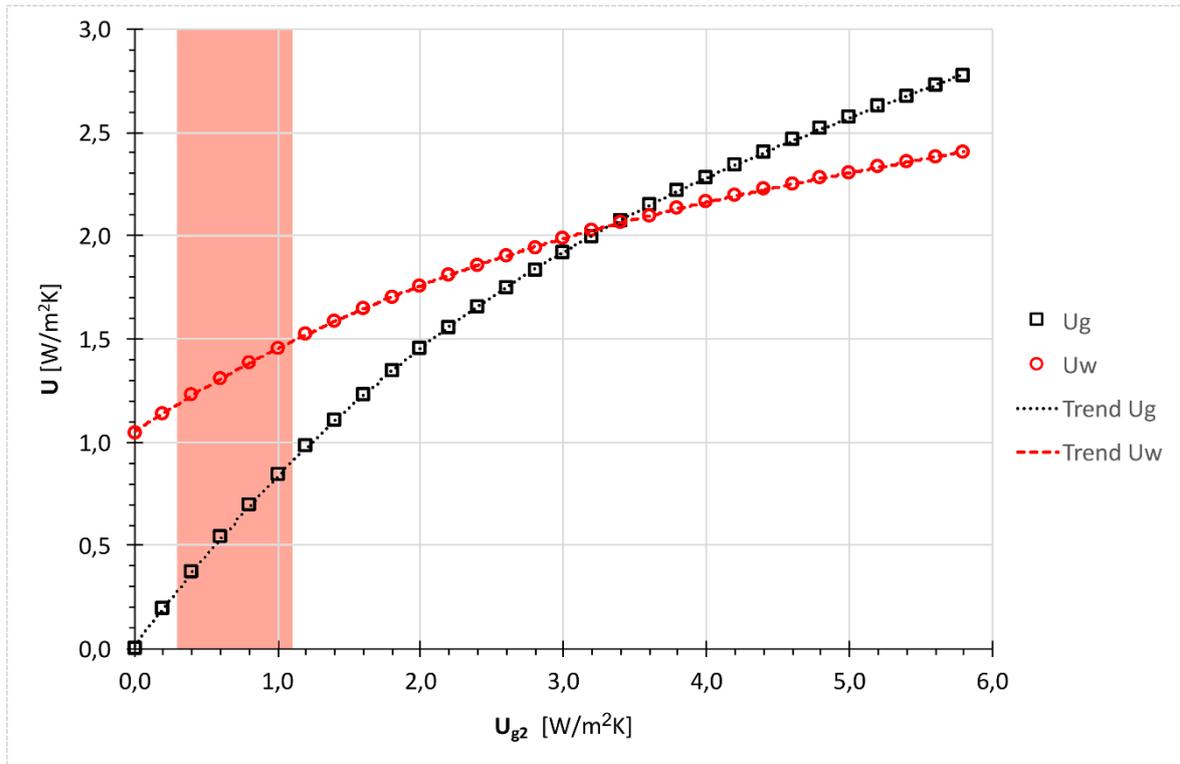


Abb. 4.2 Abhängigkeit von U_g und U_w des Altbau Fensters vom U -Wert der inneren Scheibe U_{g2} berechnet nach DIN EN ISO 10077-1; Außenmaße des Fensters B 708 mm x H 878 mm.

Der rot hinterlegte Bereich in Abb. 4.2 bezeichnet den U_g -Bereich derzeitig und in absehbarer Zukunft verfügbarer Vakuumverglasungen. Schon bei Austausch der raumseitigen Scheibe durch ein Vakuumverglas mit $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Pilkington Spacia) sind große energetische Einsparungen möglich, und der U_w -Wert des Gesamtfensters kann von 2,4 auf ca. $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ reduziert werden (-38%). Gleichzeitig sind der Reduzierung des U_w -Wertes im konkret betrachteten System Grenzen gesetzt: Auch die besten wahrscheinlich in den nächsten Jahren verfügbaren Vakuumverglasungen können zwar den U_g -Wert noch weiter reduzieren; der U_w -Wert des Fensters wäre aber nicht in gleichem Maße niedriger als bei der in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Sanierung mit $U_{g2} = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Synergy).

Der Grund hierfür liegt in dem hohen Rahmenanteil des relativ kleinen Fensters und in den Anteilen der Fensterkomponenten am Gesamtwärmedurchlass (Abb. 4.3).

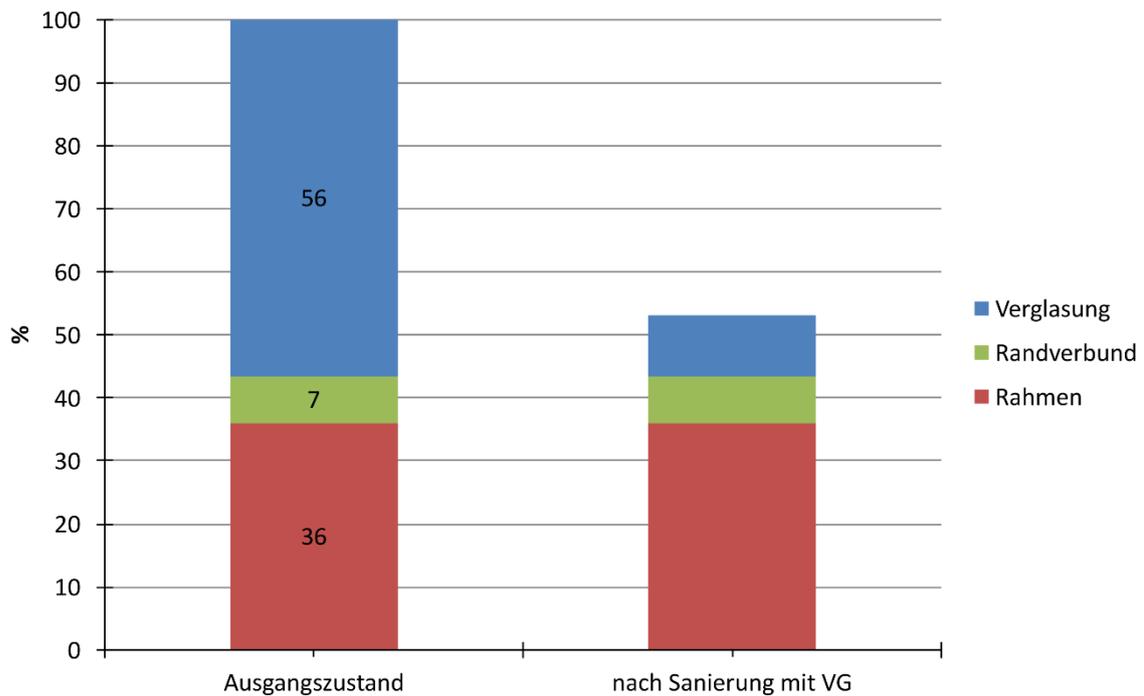


Abb. 4.3 Anteile der nach DIN EN ISO 10077-1 abgeschätzten anteiligen Wärmeströme des Bestandfensters vor und nach der Sanierung mit Vakuumglas.

Während Wärmeverluste durch die Verglasung das thermische Bauteilverhalten des Fensters vor der Sanierung dominieren, wird durch Verbesserung des U_g -Wertes der Rahmenanteil immer höher. Um U-Werte um $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ oder darunter zu erreichen, müsste entsprechend auch der Rahmen nachgedämmt werden.

4.3 Simulation des thermischen Bauteilverhaltens

Es wurde außerdem eine thermische Bauteilsimulation unter den Randbedingungen der DIN 4108-2 durchgeführt (Abb. 4.4). Wie rechts in der Abbildung gut sichtbar, war die kälteste raumseitige Stelle des Fensters vor der Sanierung die Verglasung. Der 63 mm starke Rahmen aus Fichtenholz mit $\lambda = 0,13 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ besaß einen relativ guten U-Wert von $U_f = 1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, verglichen mit $U_w = 2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ für die Verglasung.

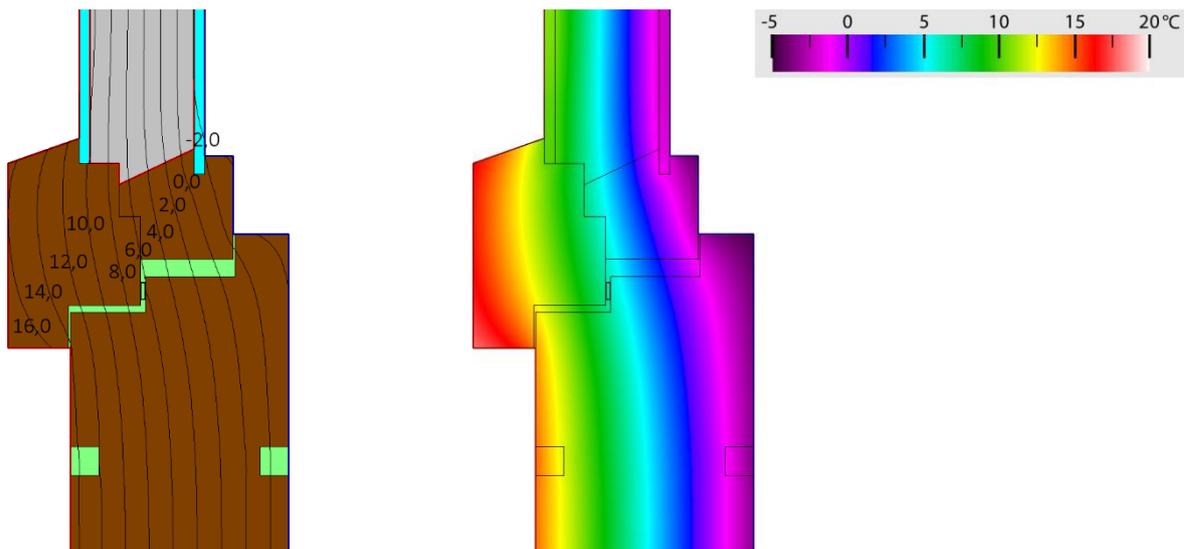


Abb. 4.4 Altbaufenster im Ausgangszustand, Darstellung der Isothermen bei -5 °C außen, 20 °C innen (links) und Temperaturverlauf in IR-Falschfarben (rechts).

Problematisch war weiterhin der Verlauf der 10 °C -Isotherme durch den Luftraum zwischen Blend- und Flügelrahmen des Verbundfensters. Das Fenster verfügte nur über eine zentrale Dichtebene, so dass warme Raumluft in die Konstruktion eindringen und zwischen den Rahmen kondensieren konnte.

Auch in der IR-thermografischen Darstellung wurde deutlich, dass die raumseitige Scheibenfläche die kälteste innenliegende Komponente Fensters war. Bei sehr niedrigen Außentemperaturen oder hoher Feuchtigkeit der Raumluft konnte es an der gesamten Scheibeninnenseite zum Anfall von Kondensat kommen.

Die thermische Simulation des Fensters mit THERM 7.4 und WINDOW 7.4 ergab für den Ausgangszustand des Altbaufensters einen U_w -Wert von $2,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Dieser Wert lag damit etwas niedriger als der nach DIN EN ISO 10077-1 berechnete U_w -Wert, was mit Sicherheiten des Näherungsverfahrens zu erklären ist.

4.4 Sanierungsmaßnahmen

Die innen liegende Scheibe (3 mm Einfachverglasung) des Altbau-Verbundfensters wurde durch eine 2x4 mm Scheibe Vakuumglas ($U_g = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$) ausgetauscht. Neue Dichtebenen wurden eingefügt und die vorhandenen Dichtungen komplett erneuert.

Die Nachrüstung sollte möglichst schnell und einfach mit angemessenem Kostenaufwand durchzuführen sein. Aus diesem Grund wurde soweit möglich auf selbstklebende Dichtungen gesetzt, die keine Abbindezeiten zwischen den Arbeitsschritten erforderten und flexibel an die meisten Situationen angepasst werden konnten. Überdies sollte das äußere Erscheinungsbild des alten Holzfensters so wenig wie möglich beeinträchtigt werden.

Durch die geringe Größe des Fensters resultierte ein sehr hoher Rahmenanteil von 51%. Da der Holzrahmen in der Sanierung beibehalten werden soll, lag hierin eine Limitierung der durch den Austausch der Verglasung erreichbaren U_w -Werte.

4.5 Anforderungen an das Fenster

Die bauphysikalischen Anforderungen an ein Fenster lassen sich nach Bauteilebenen von außen nach innen kategorisieren:

- Wetterschutzebene dauerhaft wind- und schlagregendicht, diffusionsoffen
- Funktionsebene wärmedämmend und schallreduzierend
- Raumbene luft- und dampfdiffusionsdicht

Primäre Anforderungen an das Fenster sind in folgenden Norm- und Regelwerken spezifiziert:

- Minimierung von U_w EnEV 2014
Bei Ersetzen von Verglasungen oder verglasten Flügelrahmen sind die maximalen Werte von $U_w = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ einzuhalten.
- Windlast DIN EN 12210
- Schlagregendichtheit DIN EN 12208
- Luftdurchlässigkeit DIN EN 12207

U-Wert und Wärmebrücken

Im Ausgangszustand besass das Verbundfenster aus zwei nicht beschichteten Scheiben mit circa 20 mm Luftzwischenraum (Aufbau 3/25/3) einen U-Wert von $U_g = 2,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ (berechnet nach DIN EN ISO 10077-1). Der 63 mm starke Rahmen aus Fichtenholz ($\lambda = 0,13 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) besaß einen U-Wert von $U_f = 1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die thermische Schwachstelle des Fensters war somit die Glasfläche.

Durch den Austausch einer Einfachverglasung (3 mm, U_g ca. $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$) gegen Vakuumglas (2x4 mm, $U_g = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$) verschoben sich die Wärmebrücken des Fensters weg von der Glasfläche.

Die potenziellen thermischen Schwachstellen am sanierten Altbaufenster waren:

- VG-Scheibenrandverbund mit einem λ -Wert von ca. $1,0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Transmission)
- Spalt zwischen Blend- und Flügelrahmen (Konvektion)
- Massivholzrahmen mit U_f -Wert von ca. $1,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (Transmission)

Feuchtemanagement

Es gilt der Grundsatz: „Innen dichter als außen!“. Das bedeutet, Feuchtigkeit im Bauteil musste die Möglichkeit haben, dieses nach außen hin zu verlassen.

Luftdichtigkeit

Es war nicht Ziel der Sanierungsmaßnahmen, ein vollkommen luftdichtes Fenster zu konstruieren. Über die gesamte Gebäudehülle musste die Mindestluftwechselzahl $n_{50} = 0,5 \text{ h}^{-1}$ gewährleistet sein.

4.6 Problembereiche und Ausgangszustand

Anschluss Öffnungsflügel / Blendrahmen (Holz auf Holz)

Das Fenster verfügte über eine umlaufende Schlauchdichtung aus Silikon in Position (a), die in eine gefräste Nut eingesteckt war (Abb. 4.5).

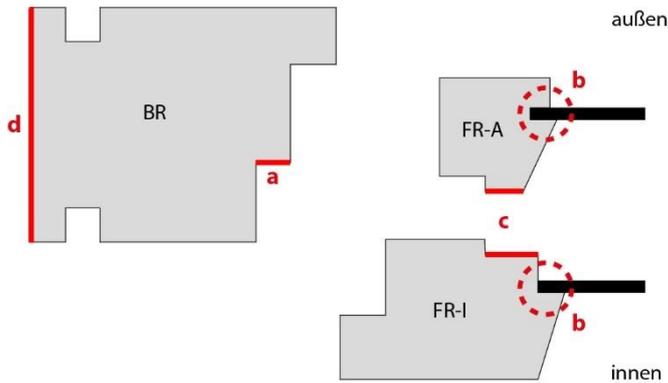


Abb. 4.5 Blendrahmen (BR), äußerer Flügelrahmen (FR-A) und innerer Flügelrahmen (FR-I), schematisch.

Glasfalzbereich Flügelrahmen (Glas auf Holz)

Mit einem Glaseinstand von ca. 8 mm wurden beide Scheiben von überlackiertem Fensterkitt gehalten, der gleichzeitig als Dichtmasse diente (b).

Anschluss äußerer / innerer Flügelrahmen (Holz auf Holz)

Im Ausgangszustand lagen die beiden Flügelrahmen des Verbundfensters an den Flächen (b) innerhalb der Fertigungstoleranzen aufeinander (c). Eine dedizierte Abdichtung des Scheibenzwischenraums lag nicht vor.

Anschluss Wetterschutzschiene

Die metallene Wetterschutzschiene war mit einer Liniendichtung gegen den Flügelrahmen abgedichtet. Diese Dichtung war mittlerweile leicht versprödet.

Baukörperanschluss (Holz auf z.B. Mauerwerk)

Außen seitlich waren auf jeder Seite des Blendrahmens (d) je zwei Metallklammern angebracht, mit denen das Fenster in eine Fensteröffnung geklemmt werden konnte.

4.7 Maßnahmen zur weiteren Abdichtung

Anschluss Öffnungsflügel / Blendrahmen (Holz auf Holz)

Die umlaufenden Dichtungslinien zwischen Öffnungsflügel und Blendrahmen gewährleisteten die Abgrenzung des Raumklimas zum Außenklima. An Dichtungen zur raumseitigen Abdichtung wurden folgende Ansprüche gestellt:

- luftdicht
- wasserdampfdiffusionshemmend (Dampfbremse)

Die vorhandene Dichtung in Position (a) wurde durch eine selbstklebende Profildichtung (Omega) aus Silikon ersetzt (Abb. 4.6). Mit dieser Dichtung war es möglich, variable Spaltmaße von 1 bis 8 mm abzudichten, was in diesem Bereich des Rahmens aufgrund der Beschläge erforderlich war.

Eine zusätzliche raumseitige Abdichtung (a') erfolgt durch einen 1,6 mm starken selbstklebenden Elastikpuffer auf Basis von Polyurethan (3M Bumpon®). Dieses Material wird unter anderem zur akustischen Dämpfung eingesetzt und ist als Bahnenware erhältlich, die leicht passend zugeschnitten werden kann. Die Dichtebenen (a) und (a') gewährleisteten so im Verbund eine hohe Luftdichtheit und Wasserdampfdiffusionshemmung. So wurde die Gefahr von Kondensatbildung im Bauteil minimiert.

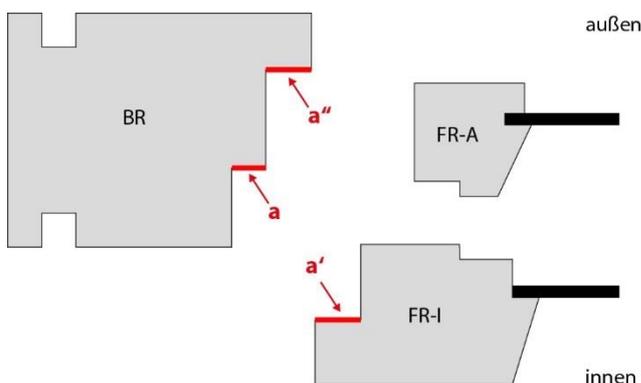


Abb. 4.6 Lage der neuen umlaufenden Dichtungen im Fensterrahmen.

Nach außen hin musste eine teils exponierte Dichtung in Position (a'') folgende Anforderungen erfüllen:

- dauerhaft UV- und witterungsbeständig
- winddicht
- schlagregendicht
- elastisch über weiten Temperaturbereich
- wasserdampfdiffusionsoffen oder schwach wasserdampfdiffusionshemmend

Zusätzlich lagen Blendrahmen und Öffnungsflügel in dieser Ebene sehr dicht aneinander, so dass eine Dichtung mit minimaler Stärke gewählt wurde. Die gewählte selbstklebende Profildichtung (Rechteck) aus EPDM-Elastomer erfüllte diese Anforderungen und konnte bis auf unter 1 mm komprimiert werden. Vor dem Auftragen der selbstklebenden Dichtungen wurde der lackierte Rahmen in diesem Bereich leicht angeraut und mit Isopropanol gereinigt.

Glasfalzbereich im Flügelrahmen - Glas auf Holz

An diese Verbindung wurden die folgenden Anforderungen gestellt:

- sichere Fixierung der Vakuumverglasung
- wasserdampfdiffusionshemmend zum Wohnraum hin
- luftdicht

Fensterkitt und Scheibe der raumseitigen Verglasung wurden zunächst entfernt. Zur Aufnahme der breiteren Vakuumverglasung wurde der innere Flügelrahmen umlaufend mit einer Oberfräse um 14 mm breiter ausgefräst. Der größere Glaseinstand war notwendig, um den Randverbund der Vakuumverglasung (ca. 12 mm) optisch zu verdecken und den Wärmeschutz in diesem Bereich zu verbessern (Abb. 4.7).

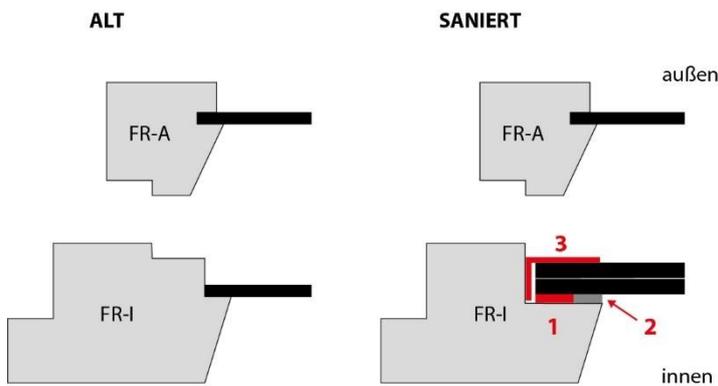


Abb. 4.7 Originalzustand (links) und vorgenommene Sanierungsmaßnahmen im Glasfalzbereich (rechts).

Zur Erfüllung der oben genannten Anforderungen wurden zwei verschiedene Systeme eingesetzt:

Die Fixierung der Vakuumverglasung erfolgte in Position (1) mit einem doppelseitigem VHB-Klebeband aus dem Bereich des Structural Glazing. Hierzu wurde zunächst die Klebefläche am Flügelrahmen angeschliffen, mit Isopropanol gereinigt und mit einem Holzprimer für poröse Oberflächen bestrichen. Die Klebeflächen der Glasscheibe wurden ebenfalls mit Isopropanol entfettet und gereinigt. Nach Einpassen der Verglasung wurde die Klebung mit ca. 20 kg Anpressdruck verfestigt. Die neue Scheibe wurde so durch das VHB-Klebeband sicher gehalten.

Zum Wohnraum hin wurde die Fuge zwischen Glas und Rahmen (2) umlaufend mit einer hybriden Klebe-/Dichtmasse abgedichtet, um die Luftdichtigkeit und insbesondere den Wasserdampfdiffusionswiderstand zu erhöhen. Um die chemische Kompatibilität mit dem acrylbasierten VHB-Klebeband zu gewährleisten, wurde ein neutralvernetzendes MS-Polymer

gewählt, das ohne Primer verarbeitet werden kann. Durch die weiße Farbgebung blieb der optische Eindruck vom Innenraum her nahezu unverändert.

Eine Glasklemmleiste oder zusätzliches Aufbringen von Fensterkitt waren statisch nicht erforderlich und wurden somit unterlassen. Stattdessen wurde der Scheibenrand mittels eines transparenten Acrylat-Klebebandes mit einem L-Profil (19,5 auf 11,5 mm, 1,5 mm stark) aus weißem PVC-U elastisch verklebt. Durch diese Maßnahme sollte beim Betrachter der optische Eindruck einer Glasklemmleiste erzeugt werden. Aufgrund der größeren Systemstärke der neuen Vakuumglas-Scheibe (8 mm gegenüber 3 mm) ersetzte das PVC-Profil gleichzeitig die alte Kante (3) des inneren Flügelrahmens.

Verbesserungsbedarf bestehender Produkte

Die Effektivität und Einfachheit der angeführten Sanierungsmaßnahmen könnte durch maßgeschneiderte Produkte weiter erhöht werden.

Das eingesetzte Structural-Glazing-Klebeband eignet sich sehr gut für einen einfachen und schnellen Austausch der Verglasung, ist aber als Dichtebene zwischen Scheibenzwischenraum und Innenraum zu diffusionsoffen und anfällig gegen die Einwirkung von unter ungünstigen Bedingungen gebildetem Tauwasser, wenn dieses nicht regelmäßig entfernt wird. Im Versuchsfenster wurde daher zum Innenraum hin zusätzlich mit MS-Polymer als Dampfbremse abgedichtet. Dieses zusätzliche Material und der damit verbundene Arbeitsaufwand könnten eingespart werden, wenn das Klebeband an einer Kante mit einer Sperrschicht ausgerüstet wäre oder an einem Rand einen Streifen Material mit wesentlich höheren μ -Wert aufweisen würde.

Selbstklebende Dämmstreifen mit einer geringen Materialstärke von ca. 5 mm bei sehr geringer Wärmeleitfähigkeit könnten an thermischen Schwachstellen der Konstruktion gezielt aufgebracht werden, um den Wärmestrom zu minimieren und die Wärmebrücken in der Fensterkonstruktion zu beseitigen.

Öffnungsflügel - Holz auf Holz

Die Kontaktfläche der beiden Flügelrahmen wurde mit einer umlaufenden Dichtung ausgerüstet, welche die folgenden Anforderungen erfüllen musste:

- hoher Wasserdampfdiffusionswiderstand
- luftdicht
- geringe Materialstärke

Der luftgefüllte Scheibenzwischenraum sollte soweit möglich luftdicht gemacht werden, eine Trennung der beiden Flügelrahmen zur Reinigung jedoch weiterhin möglich bleiben. Erreicht wurde dies durch Aufbringen einer zugeschnittenen selbstklebenden Polyurethan-Matte in Position (c). Im Verbund der beiden Flügelrahmen wurde diese Dichtung durch den Anpressdruck auf die Kante (c') gepresst und schließt so weitgehend luftdicht ab (Abb. 4.8).

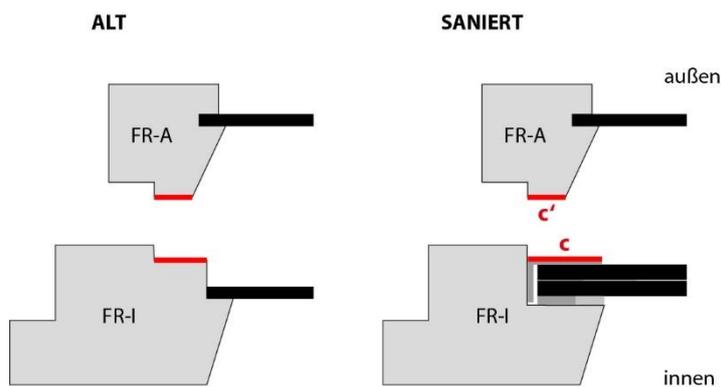


Abb. 4.8 Originalzustand (links) und neue Dichtflächen am Öffnungsflügel (rechts).

Wetterschenkel

Im Bereich des Wetterschenkels wurde zusätzlich eine Profildichtung auf den Flügelrahmen geklebt. Die beiden aufeinanderstoßenden Dichtprofile erhöhten so weiter die Luftdichtigkeit an dieser kritischen Stelle.

Anmerkung: Bei neueren Fenstern erfolgt die Abdichtung im Bereich der Wetterschutzschiene über gesteckte Flügelfalzdichtungen (siehe auch DIN 68121-1).

Baukörperanschluss - Holz auf z.B. Mauerwerk

Folgende Anforderungen wurden an den Baukörperanschluss gestellt:

- wind- und schlagregendicht
- wärmedämmend
- gute Anhaftung auf verschiedenen Untergründen
- ideal: nach außen hin abfallendes μ

Für Fensteranschlüsse sollten vorkomprimierte Dichtbänder der Beanspruchungsgruppe BG 1 eingesetzt werden (Richtlinien RAL-Montage). Es wurde ein Produkt der Firma Würth gewählt, das über unterschiedliche Kompressionsgrade des geschäumten Materials einen Gradienten der Wasserdampfdurchlässigkeit erreicht (Abb. 4.9).



Abb. 4.9 Vorkomprimierte Dichtbänder OTTOTAPE Trio-RAL (a) und Würth VKP Trio mit Kompressionsgradient (b) [Quellen: OTTOCHEMIE, Würth].

Der Blendrahmen konnte umlaufend mit einseitig selbstklebendem Kompriband beklebt, ausgerichtet und seitlich mit dem Baukörper verschraubt werden. Eine Aufklotzung des Fensters kann, je nach Größe und Gewicht, ebenfalls erforderlich sein.

Eine zusätzliche Abdichtung konnte abschließend über jeweils ein Fensterdichtband oder Bauanschlussband (BAB) innen und außen erfolgen. BAB/I ist diffusionsdicht, BAB/A diffusionsoffen ausgelegt, so dass in der Anschlussfuge vorhandene Feuchtigkeit nach außen abgegeben wird.

Übersicht über die eingesetzten Produkte

Anschluss	Anforderungen	Produkt	Material
BR an FR-A, außen	schlagregendicht winddicht	Ellen Schaum- Dichtungsband B 9 mm x H 4 mm	EPDM-Schaum
BR an FR-I, Mitte	luftdicht Dampfbremse	Elton B.V. Omega- Profildichtung B 9 mm x H 8 mm	SI
BR an FR-I, raumseitig	luftdicht Dampfbremse	3M Bumpon® Elastikpuffer H 1,6 mm	PUR-Elastomer
FR-A an FR-I	luftdicht Dampfbremse	3M Bumpon® Elastikpuffer H 0,8 mm	PUR-Elastomer
VG an FR-I	statisch luftdicht	3M B23F VHB-Tape B 10 mm x H 2,3 mm (+ 3M 2262H Primer für poröse Oberflächen)	Acrylschaum
VG an FR-I	Dampfbremse	3M 730 Hybrid Klebe- und Dichtmasse	MS-Polymer
BR an Baukörper	alle angeführten	z.B. Würth VKP Trio Kompriband	PUR-Schaum

Tab. 4.1 Bei der Sanierung des Altbaufensters eingesetzte Produkte.

4.8 FEM-Analyse des Wärmedurchgangs nach der Sanierung

Das VG-sanierte Verbundfenster wurde ebenfalls in THERM 7.4 modelliert, und zwar zunächst mit der tatsächlich verbauten Vakuumverglasung 2x4 mm VG mit $U_g = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Abb. 4.10).



Abb. 4.10 Saniertes Altbaufenster mit Vakuumglas $U_g = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$, Isothermen/IR bei $\theta_e = -5 \text{ °C}$.

Wie schon in der FEM-Simulation der Ultralight-Neubau fenster beobachtet, lagen die niedrigsten raumseitigen Oberflächentemperaturen an der Anschlussstelle VG-Flügelrahmen vor. Die Simulation lieferte $\theta_{si,min}$ von $11,9 \text{ °C}$ bei außen -5 °C und einen U_w -Wert von $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Dieser Wert war maßgeblich durch das thermische Bauteilverhalten des alten, unsanierten Holzrahmens bestimmt. Dies wurde rechnerisch bestätigt durch die Simulation des Fensters mit einer stärker dämmenden Vakuumverglasung ($U_g = 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ statt $0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$) in identischer Einbausituation (Abb. 4.11).



Abb. 4.11 Saniertes Altbaufenster mit Vakuumglas $U_g = 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ Isothermen bei $\theta_e = -5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Der Einsatz einer deutlich stärker dämmenden Vakuumverglasung mit $U_g = 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ erhöhte die minimale raumseitige Oberflächentemperatur $\theta_{si,min}$ nur minimal auf $12,1 \text{ }^\circ\text{C}$ bei außen $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, und auch der U_w -Wert konnte nur minimal von $1,2$ auf $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ reduziert werden.

Ein größerer Effekt wurde für den Einsatz einer Vakuumverglasung mit reduziertem Glasrandverbund (6 mm statt 12 mm) berechnet. Zwar konnte der U_w -Wert, bedingt durch den hohen Rahmenanteil, nicht signifikant verbessert werden, es wurde jedoch ein stark positiver Effekt auf die raumseitigen Oberflächentemperaturen beobachtet (Tab. 4.2).

Verglasung	U_g [W/m ² K]			U_w [W/m ² K] 708x878 mm	$\theta_{si,min}$ [°C] für $\theta_e = -5$ °C
	außen	innen	gesamt		
3 mm Floatglas Luftraum 3 mm Floatglas	5,8	5,8	2,8	2,2	10,2
3 mm Floatglas Luftraum 8 mm Vakuumglas Randverbund 12 mm	5,8	0,58	0,52	1,2 (-45%)	11,9
3 mm Floatglas Luftraum 8 mm Vakuumglas Randverbund 6 mm	5,8	0,58	0,52	1,2 (-45%)	13,2
3 mm Floatglas Luftraum 8 mm Vakuumglas besserer U_g	5,8	0,35	0,33	1,1 (-50%)	12,1

Tab. 4.2 Vergleich des mit THERM/WINDOW berechneten thermischen Bauteilverhaltens vor und nach der energetischen Sanierung mit Vakuumglas, umgesetzte Variante schattiert.

Mit der bereits während der Laufzeit des Forschungsvorhabens marktverfügbaren Vakuumverglasung mit $U_g = 0,58$ W/m²K (Synergy) konnte demnach durch einfache Maßnahmen das thermische Bauteilverhalten deutlich verbessert und dabei die optische Erscheinung des Fensters von außen erhalten werden. Für das betrachtete System stellte die Verglasung mit $U_g = 0,58$ W/m²K ein gutes Kosten-Nutzenverhältnis dar, da auch mit deutlich besseren Vakuumverglasungen keine größeren Optimierungen mehr erzielt werden können. Zukünftige Varianten mit reduziertem Glasrandverbund wären noch geeigneter für die energetische Altbausanierung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Eine genauere Analyse der im vorausgegangenen Projekt ULTRASLIM entwickelten Profilgeometrie für ein GFK-Neubaufenster mit Vakuumverglasung ergab Ansätze zur statischen und thermischen Optimierung des Fenstersystems.

Ausgehend von diesen Ergebnissen konnte das neue, verbesserte Profil 3.2.12.1 entwickelt werden, das höhere Anforderungen an Statik und Wärmeschutz erfüllt und dessen Einsatzbereich wesentlich erweitert. Das neue Profil ermöglicht auch die Realisierung verschiedener Öffnungsarten, was zu einer breiteren Akzeptanz von Fenstersystemen mit Vakuumglas führen kann.

Es soll an dieser Stelle die besondere Herausforderung erwähnt werden, die beiden Anforderungsfelder „optimaler Wärmeschutz“ einerseits sowie „minimale Profilansichten und Leichtbau“ andererseits zu vereinen, da diese oft gegensätzliche Lösungsstrategien nahelegen. Auch das neue, stärkere ULTRALIGHT-Profil ist schlanker als alle aktuellen PVC-Fensterprofile und bietet dabei einen guten Wärmeschutz. Dieser könnte ohne Weiteres verbessert werden, wenn Leichtbau und Ästhetik bei der Auslegung vernachlässigt würden: Durch die vollständige Überdeckung des Rahmens mit der Verglasung bei dem ULTRALIGHT-Fenster für Parallel-Ausstell-Öffnung würde eine noch weitere Vergrößerung der Profilhöhe direkt in noch geringeren U_w -Werten, die sich weiter dem U_g -Wert der Verglasung annähern, und höheren raumseitigen Oberflächentemperaturen resultieren. Es ist jedoch die Ansicht dieser Forschungsgruppe, dass das neu entwickelte System ULTRALIGHT die beiden Anforderungsfelder sinnvoll gewichtet. Weiterhin wurde gezeigt, dass durch das außenseitige Aufbringen einer Dämmschale geringer Stärke ein weiterer Weg offensteht, U_w -Wert und raumseitige Oberflächentemperaturen weiter zu verbessern. Diese Maßnahme erfordert keine Eingriffe in die Geometrie der pultrudierten GFK-Profile und könnte als zusätzliche gestalterische Variante des Fensters oder sogar nachträglich als energetisches „Upgrade“ angeboten werden.

Mit der Öffnungsart Dreh-Kipp konnte eine Alternative zum von der Forschungsgruppe favorisierten Parallel-Ausstellfenster realisiert werden, die ebenfalls über gute thermische Bauteileigenschaften verfügt. Mit dieser Entwicklung konnte dem Wunsch vieler Bauherren und Planer nach der Möglichkeit einer Öffnung nach innen – und damit einer einfach durchführbaren Reinigung vom Innenraum her - nachgekommen werden. Aber auch neu zu entwickelnde Beschläge auf Basis der hier gezeigten Systeme können die von innen her durchführbare Reinigung ermöglichen.

Anhand eines alten Verbundfensters aus den 1950er Jahren wurde der Austausch von Einfachverglasungen durch Vakuumglas untersucht. Beim Beispielobjekt konnte durch Auswechseln der raumseitigen und Erhalt der äußeren Scheibe der optische Eindruck von außen nahezu unverändert beibehalten werden. Die Sanierungsmaßnahme zeigte sich außerdem als schnell durchführbar. Obwohl die geringe Größe und der dadurch hohe Rahmenanteil des Beispielfensters ungünstig für das Erreichen niedriger U_w -Werte sind, konnte mit $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ein U_w -Wert erreicht werden, der die Anforderungen der EnEV 2014/2016 an Neubauten erfüllt und die Wärmeverluste durch das Fenster halbiert.

Derartige Eingriffe zur energetischen Fenstersanierung sind nicht losgelöst vom Kontext des konkreten Sanierungsprojektes und der vorhandenen Fensterart zu betrachten und zu lösen. Im gewählten Beispiel war vor der Sanierungsmaßnahme die kälteste raumseitige Oberfläche, an der bevorzugt mit Tauwasseranfall zu rechnen war, die Mitte der Verglasung. Nach der Sanierung verschob sich die kälteste Zone weg von der Scheibenmitte in Richtung des Glasrandverbundes. Ein Anfall von Tauwasser an dieser Stelle ist in der Regel wenig problematisch, da gelegentlich auftretendes Kondensat einfach abgewischt werden kann und alte Fenstersysteme Kondensatabläufe haben. Unter Berücksichtigung des baulichen Kontextes wäre jeder Sanierungsfall mit den physikalischen Eigenschaften zu prüfen und ein geeignetes, aufeinander abgestimmtes Paket an Sanierungsmaßnahmen festzustellen. In Bezug auf die Fenster ist es möglich, bereits über die Wahl geeigneter Dichtungen vielen bauphysikalischen Anforderungen zu begegnen (siehe Abschnitt 4.7). Ein einfaches Beispiel für einen weiteren Sanierungskontext wäre die Kombination der VG-Bestandfenstersanierung mit einer geeigneten Innendämmung der Außenwand sowie eine Untersuchung und Optimierung des Gebäudeanschlusses mit der Laibung.

6 Anhang - Werkstoffe in der FEM-Simulation

Werkstoff	Farbe THERM	λ [W/m·K]
Abstandshalter Two-Box-Modell Box 2		0,28
Aluminium		160
Edelstahl		17
Flintglas		1,40
Floatglas		1,00
Holz 500 kg/m ³		0,13 †
Holz 700 kg/m ³		0,18 †
Kompriband PUR		0,055
Kunststoff allgemein		0,25
Kunststoff Polysulfid		0,40
Kunststoff Silikon (ungefüllt)		0,35
UP-GF unidirektional		0,25 †
Wärmedämmung allgemein WLG 030		0,030
VHB-Tape (3M)		0,077

Tab. 6.1 Wärmeleitfähigkeiten und Farblegende der in der FEM-Simulation eingesetzten Werkstoffe.

7 Anhang – Verglasungen in WINDOW 7.4

Für die thermische Simulation der Fenster wurden Vakuumverglasungen der Firma Synergy in der Software „Berkeley Lab Window v7.4.6.0“ modelliert. Als Ausgangspunkt dienten die Daten in der International Glazing Database IGDB v48 und Angaben der Firma Synergy.

Kürzel	außenseitig		raumseitig		d [mm]
	IGDB#	d1 [mm]	IGDB#	d2 [mm]	
VG058-2x4	60007	4	60007	4	8,15
VG058-2x5	60006	5	60006	5	10,15
VG042-2x4	13501	4	60004	4	8,15
VG042-2x5	13500	5	60005	5	10,15
VG035-2x4	60004	4	60004	4	8,15
VG035-2x5	60005	5	60005	5	10,15

Tab. 7.1 Modellierung der Synergy-Verglasungen zugrunde gelegte Glasarten (IGDB v48).

In der technischen Ausführung wird der U_g -Wert von Vakuumverglasungen maßgeblich durch die Qualität der zur *vacuum gap* (Schichten 2 und 3, Abb. 7.1) hin aufgetragenen low-E-Beschichtungen bestimmt. Hierbei ist das Herstellungsverfahren, und darin insbesondere die erforderliche Temperatur zum Verschweißen der beiden Scheiben zur VG-Verglasung mit Glaslot, ausschlaggebend dafür, welche Beschichtungen eingesetzt werden können.

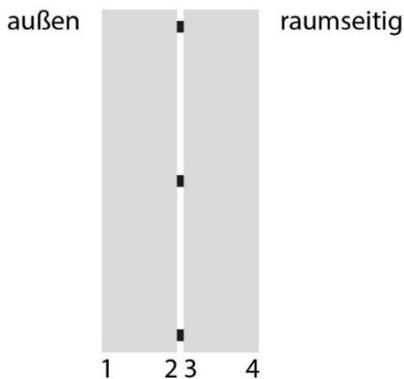


Abb. 7.1 Lage der low-E-Beschichtungen in den modellierten Vakuumverglasungen.

Nach Rücksprache des Herstellers Synergy können derzeit oder in naher Zukunft durch Variation der low-E-Beschichtung U_g -Werte zwischen 0,35 und 0,58 W/m²K erreicht werden. Die entsprechenden Verglasungen wurden jeweils in den Stärken 2x4 und 2x5 mm mit der Software WINDOW 7.4 modelliert (Tab. 7.2).

Kürzel	Emissionsgrad				U_g [W/m ² K]
	1	2	3	4	
VG058-2x4	0,840	0,130	0,130	0,840	0,586
VG058-2x5	0,840	0,130	0,130	0,840	0,585
VG042-2x4	0,840	0,840	0,030	0,840	0,418
VG042-2x5	0,840	0,840	0,030	0,840	0,417
VG035-2x4	0,840	0,030	0,030	0,840	0,351
VG035-2x5	0,840	0,030	0,030	0,840	0,351

Tab. 7.2 Mit WINDOW 7.4 ermittelte U_g -Werte (Scheibenmitte) verschiedener Synergy-Verglasungen.

8 Ergebnisse der Differenzklimaversuche

Die Differenzklimaversuche wurden durch die Firma Josko (Kopfing, Österreich) an zwei Prototypen des Ultralight-Fensters (Geometrie 3.2.10, Rahmenmaterial Prototyp 1 GFK, Rahmenmaterial Prototyp 2 Hartholz) durchgeführt. Beide Fenster verfügten über ein Stockaußenmaß von 1000 mm x 1000 mm. Nach Konditionierung der Klimabedingungen wurde die Oberflächentemperatur an 21 Messpunkten bestimmt (Abb. 8.1, Tab. 8.1).

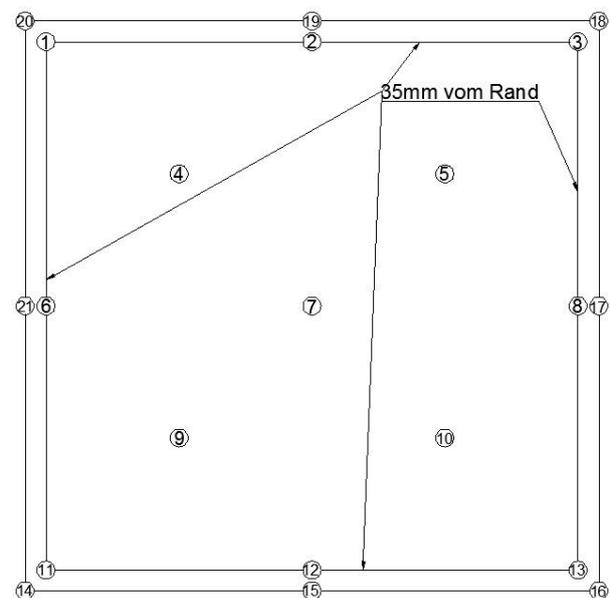


Abb. 8.1 Einbau der Ultralight-Fenster am Differenzklimastand der Fa. Josko (links) und Lage der raumseitigen Messpunkte für die Oberflächentemperatur (rechts).

		Klima innen		Klima außen
		T	ϕ	T
Tag 1	Einbau			
Tag 9	Konditionierung	20 °C	40%	20 °
Tag 12	Start Prüfung	23 °C	40%	0 °C
Tag 14	Start Prüfung	23 °C	40%	-5 °C
Tag 31	Konditionierung	20 °C	40%	20 °C
Tag 55	Start Prüfung	23 °C	40%	-10 °C
Tag 71	Ende	Verlust Vakuum		

Tab. 8.1 Prüfverlauf der Differenzklimaversuche.

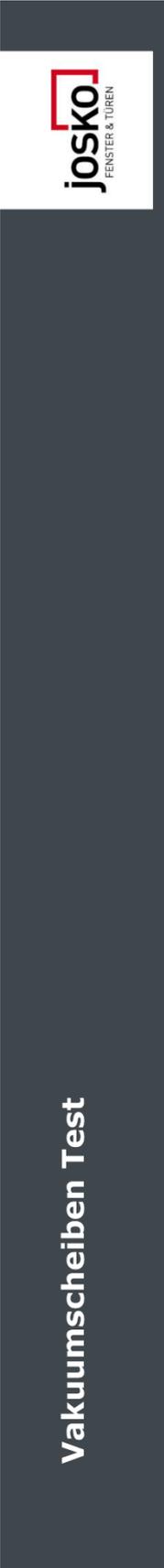
Vakuumscheiben Test



Innen 23° Außen 0° Versiegelt

Holz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	17,8	18,8	17,7	21,6	21,6	19,9	21,5	19,8	22	21,7	16,5	19,3	16,9	10,6	15	9,9	15,7	14,1	15,5	13,4	15
	18	19	17,8	21,8	21,6	20	21,6	19,5	22	21,6	16,5	19,3	17	9,7	14,1	9,7	15,2	13,6	14,8	12,6	15,8
	17,5	18,9	17,7	21,7	21,8	20	21,6	19,8	21,8	21,8	16,4	19,2	17,1	11,2	14,9	9,6	15,2	13,7	15	12,6	15,5
	18	18,9	17,5	21,9	21,9	20,1	21,6	19,9	22	21,7	16,7	19,1	16,9	9,9	14,1	9,9	15	13,7	14,9	12,4	15,6
	18	19,2	18,2	22,4	22,2	20,4	22	20,2	22,1	22,2	16,9	19,5	17	10,6	14,2	10,2	15,8	14,1	15,5	12,8	15,9
	17,9	19,0	17,8	21,9	21,8	20,1	21,7	19,8	22,0	21,8	16,6	19,3	17,0	10,4	14,5	9,9	15,4	13,8	15,1	12,8	15,6

GFK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	16,7	18,2	16,5	21,5	21,4	18	21	18,9	21,4	21,5	14,2	18,8	15,6	6,3	12,8	8,8	13,8	10	13,6	9,5	13
	17,2	18,6	16,6	21,9	21,8	18,6	21,6	19	22,1	21,9	14,8	19	15,7	7	14,2	8,7	13,5	10,7	14,1	10,3	13,3
	16,9	18,1	16,1	21,4	21,4	18	21,2	18,8	21,3	21,3	14,2	18,2	15,5	6,7	13,4	8,8	13,3	9,5	13,8	9,5	13,1
	17,3	18,6	16,7	22	21,8	18,5	21,5	18,8	21,7	21,7	14,3	18,8	15,7	7,4	13,5	8,8	13,3	10,2	13,8	9,9	13
	17,5	18,5	16,6	21,6	21,4	18	21,9	18,6	21,6	21,4	14,2	18,2	15,3	6,6	12,8	8,4	13,5	10,3	13,8	10,2	13,3
	17,1	18,4	16,5	21,7	21,6	18,2	21,4	18,8	21,6	21,6	14,3	18,6	15,6	6,8	13,3	8,7	13,5	10,1	13,8	9,9	13,1



Innen 23° Außen -5° Versiegelt

Holz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
16	17,8	16,6	16,6	21,5	21,3	19,2	21,1	18,7	21,5	21,1	14,9	17,9	15,1	7,8	11,9	7,7	13,5	11,4	12,7	11	13,3	
16,4	17,9	16,2	21,4	21,4	19	21,4	19	21,4	19	21,8	21,4	14,9	18,1	15,2	7,6	11,8	6,3	13,1	11	12,7	9,1	13,3
16,4	17,6	16,4	21,4	21,4	19,3	21,1	18,5	21,5	21,1	14,8	18,2	14,9	7,3	11,4	5,7	12,8	11	12,4	9,4	13		
16,7	18,1	16,9	21,8	21,8	19,3	21,3	18,9	21,7	21,5	15,1	18,6	15,4	7,7	12,4	6,5	13,6	11,6	13,1	9,9	13,5		
16,5	17,6	16,2	21,3	21,3	19,2	21	18,6	21,4	21,3	14,8	17,9	14,9	6,9	11,5	5,3	12,7	11	12,7	8,8	12,9		
16,4	17,8	16,5	21,5	21,4	19,2	21,2	18,7	21,6	21,3	14,9	18,1	15,1	7,5	11,8	6,3	13,1	11,2	12,7	9,6	13,2		

GFK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
16,7	18	15,5	21,8	21,7	17,7	21,2	17,8	21,5	21,5	13,4	17,8	14,7	4,2	12,3	6,4	11,5	8	12,1	7,4	11,3		
16	16,9	14,8	21,2	20,9	17	20,4	17,7	21	20,8	12,4	17,1	13,7	3,4	11,3	5,9	11,1	7,7	11,6	6,9	10,9		
15,6	17,2	14,8	21,5	21,3	17,2	21	17,8	21,2	21,1	12,7	17,7	13,8	3,3	11,1	4,7	11	7,1	11,2	6,6	10,7		
15,8	17	14,6	21,1	20,9	16,8	20,4	17,5	21	20,8	12,5	17,1	13,6	3,2	11,5	5,2	11,2	7	11,9	7,4	11,1		
15,3	17,1	14,6	21,1	20,9	17	20,5	17,6	21	21	12,6	17,5	13,6	2,7	10,9	4,8	10,6	6,8	11,3	6,5	10,6		
15,9	17,2	14,9	21,3	21,1	17,1	20,7	17,7	21,1	21,0	12,7	17,4	13,9	3,4	11,4	5,4	11,1	7,3	11,6	7,0	10,9		

Vakuumscheiben Test



Innen 23° Außen -10° Versiegelt

Holz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	15,8	17,2	15,3	21,2	21	18,4	20,5	17,8	21,2	20,8	14,1	17	13,6	3,3	9,4	2,8	10,1	8,3	10,5	6,9	11,3
	15,1	16,8	15,3	21,1	21	18,1	20,6	17,8	21	20,7	13,3	16,3	13,3	5	9,5	2,6	10	8,3	11	6,7	12
	14,8	16,5	14,6	20,6	20,6	17,7	19,9	17,7	20,8	20,2	13,1	16,5	13,7	4,5	9,7	2,7	9,9	8,3	10,5	7,1	11,3

	15,2	16,8	15,1	21,0	20,9	18,1	20,3	17,8	21,0	20,6	13,5	16,6	13,5	4,3	9,5	2,7	10,0	8,3	10,7	6,9	11,5
--	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	-----	-----	------	-----	------	-----	------

GFK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	14,5	16,4	13,6	21,2	21	16,1	20,5	17,2	20,9	20,7	11,3	16,2	12	2,6	9,3	2,4	8,8	4,7	9,2	3,7	8,7
	14,6	15,9	13,2	21,1	21	16	20,7	17	21	20,8	11,2	16,4	11,8	2,8	9,5	2,6	8,9	5,1	8,8	3,9	9,1
	14,2	16,1	13,3	21	21,1	16,3	20,8	16,8	21,1	20,7	11	16,6	12,1	3	9,3	2,7	8,7	5,1	8,9	3,7	9

	13,2	14,7	12,9	18,9	18,9	15,8	18,8	16,3	19,5	19,3	12,3	16,0	12,9	4,9	10,2	4,3	10,4	8,3	11,1	7,4	11,7
--	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------

Vakuumscheiben Test



Vergleich:

Vergleich 0° zu -10° Oberflächentemperatur

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Holz	-2,6	-2,1	-2,7	-0,9	-1,0	-2,0	-1,3	-2,1	-1,0	-1,2	-3,1	-2,7	-3,4	-6,1	-4,9	-7,2	-5,4	-5,5	-4,5	-5,9	-4,0

GFK	-4,0	-3,7	-3,6	-2,8	-2,6	-2,4	-2,6	-2,6	-2,1	-2,3	-2,0	-2,7	-1,9	-3,2	-4,4	-3,1	-1,9	-2,7	-2,5	-1,4
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Vergleich 0° zu -5° Oberflächentemperatur

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Holz	-1,5	-1,2	-1,3	-0,4	-0,4	-0,9	-0,5	-1,1	-0,4	-0,5	-1,7	-1,1	-1,9	-2,9	-2,7	-3,6	-2,2	-2,6	-2,4	-3,1	-2,4

GFK	-1,2	-1,2	-1,6	-0,3	-0,4	-1,1	-0,7	-1,1	-0,5	-0,5	-1,6	-1,2	-1,7	-3,4	-1,9	-3,3	-2,4	-2,8	-2,2	-2,9	-2,2
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

9 Anhang – Bericht FEM-Berechnungen IB-Kramer

Projekt: Forschungsprojekt GFK-Fenstersystem "Ultralight"

Auftraggeber: FH Dortmund
Fachbereich Architektur
Emil-Figge-Str. 40
44227 Dortmund

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Markus Kramer

Einleitung:

Im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojekts zur Entwicklung eines Fensterprofils aus Glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) mit extrem schmaler Ansichtsbreite wurde der Unterzeichner beauftragt, Berechnungen zur Ermittlung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der gewählten Profilkonstruktion durchzuführen. Das Konzept des Fenstersystems beruht auf der Idee, für den Blendrahmen, wie für den Flügel die gleiche Profilgeometrie zu verwenden. Als Verglasung soll eine Vakuum-Isolierverglasung verwendet werden.

Für die GFK-Profile sollen unidirektionale Profile, welche im Pultrusionsverfahren hergestellt werden zum Einsatz kommen. Die Verglasung wird mittels doppelseitiger Klebebänder am GFK-Profil befestigt. Die Auslegung der Verklebung, wie auch der Verglasung sind nicht Gegenstand des vorliegenden Auftrags, werden aber zur umfassenden Betrachtung aller Effekte mit im Berechnungsmodell generiert.

Es soll ein außenöffnendes Senk-Klapp-Wendefenster entwickelt werden. Zu den Beschlägen gibt es bislang keine abschließende Entscheidung. Für die Berechnungen wird ein recht einfaches System mit einem Verriegelungspunkt verwendet. Es werden verschiedene Öffnungszustände unter Winddruck- und Windsogbeanspruchungen untersucht. Als Einsatzbereich wurden Gebäudehöhen bis maximal 18,0m in der Windzone 3 im Binnenland definiert.

Die Berechnungen werden mit der Methode der Finiten Elemente mit dem Programm ANSYS durchgeführt. Es wurden keine Versuche an Kleinproben zur Ermittlung der notwendigen Materialkennwerte durchgeführt, sondern es werden auf Literaturrecherche basierende, realistische Werte verwendet, die von jedem qualifizierte Hersteller zu erreichen sind.

Aufgrund des relativ geringen E-Moduls im Vergleich mit der Festigkeit des gewählten Werkstoffes werden zunächst nur die Verformungen des Systems als Bemessungskriterium herangezogen. Um eine gebrauchstaugliche Ausführung zu gewährleisten, dürfen sowohl der Flügel, insbesondere im geöffneten Zustand, als auch der Blendrahmen keine zu großen Verformungen aufweisen. Die Verglasung wird in jedem Fall als aussteifendes Element mit herangezogen, die Kraftübertragung erfolgt ausschließlich über die Verklebung, der Eigengewichtsabtrag auch über eine Klotzung.

Diese Dokumentation beinhaltet die ersten Berechnungsergebnisse vom 04.11.2014, sowie die abschließenden Ergebnisse an einer optimierten Profilgeometrie.

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Definierte Lastfälle

- LF01:Winddruck
 - LF02:Windsog
 - LF03:Winddruck/Windsog
- } im offenen Zustand
- im geschlossenen Zustand,
- ein Verriegelungspunkt unten

Lastfall	maximale Verschiebung [mm]					
	Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 6,3mm)			Verglasung 2x4mm (Ersatzscheibendicke 5mm)		
	Glasscheibe	Flügel	Blendrahmen	Glasscheibe	Flügel	Blendrahmen
LF01	10,43	7,98	0,04	16,51	8,69	-
LF02	19,88	14,83	0,24	32,72	16,74	-
LF03D	3,82	0,026	0,27	7,23	0,028	0,27
LF03S	9,87	0,99	0,31	17,81	1,22	-

Tabelle 1: Profilvariante 1 vom 04.11.2014; Maximale Verschiebungen in Krafrichtung (senkrecht zur Glasoberfläche)

Lastfall	maximale Verschiebung [mm]			
	Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 6,3mm)		Verglasung 2x4mm (Ersatzscheibendicke 5mm)	
	Glasscheibe	Flügel	Glasscheibe	Flügel
LF01	7,02 (-32,6%)	4,23 (-46,9%)	11,36 (-31%)	4,63 (-46,7%)
LF02	13,9 (-30%)	7,06 (-52,3%)	23,35 (-28,6%)	7,89 (-52,8%)
LF03D	3,63 (-4,97%)	0,066 (+153%)	7,04 (-2,6%)	0,067 (+139%)
LF03S	7,99 (-19%)	0,69 (-30,3%)	14,11(-20,7%)	0,85 (-30,3%)

Tabelle 2: Profilvariante 2 vom 23.06.2015; Maximale Verschiebungen in Krafrichtung (senkrecht zur Glasoberfläche) und die prozentuale Veränderung im Vergleich zur Profilvariante 1

Bewertung der Ergebnisse für die Profilvariante 1 vom 04.11.2014:

Die Verformungen des Blendrahmens sind aufgrund der relativ vielen Anbindepunkte an den Rohbau (10 Punkte gleichmäßig verteilt über den Umfang des Fensters) unkritisch klein.

Im geöffneten Zustand weisen die Flügelprofile mit einer Verformung des freien Randes von ca. 1,5cm einen relativ großen Wert auf. Die mittragende Wirkung der Verglasung wird an der etwas kleineren Verformung beim Einsatz der dickeren und damit schwereren Verglasung erkennbar. Es ist allerdings zu beachten, dass hier die volle Windlast angesetzt wurde. Inwieweit dies ein realistischer Ansatz für die Gebrauchstauglichkeit ist, muss diskutiert werden. Normalerweise wird ein außenöffnendes Fenster nicht bei Sturm geöffnet werden, so dass für diesen Anwendungsfall evtl. mit einer Beschränkung auf z.B. Windstärke 6 Bft gearbeitet werden kann.

Im geschlossenen Zustand unter Winddruck sind die Verformungen unkritisch, da ein kontinuierlicher Kontakt zum Blendrahmen besteht. Allerdings kommt es bei diesem Lastfall zu einer Verdrehung des Flügelprofils infolge der Verklebung mit der Verglasung (s. Abb. 30 im weiteren). Dies führt je nach Ausführung der Dichtung möglicherweise zu einer leichten Öffnung der äußeren Dichtebene, so dass insbesondere über den oberen Fensterrand Wasser in das Profil eindringen könnte. Dieses Problem könnte durch die Verwendung geeigneter, dauerhaft elastischer Dichtungsprofile gelöst werden.

Kritischer ist hier die Verformung des Flügelprofils unter Windsog im geschlossenen Zustand zu sehen. Die Fuge von 1,2 mm lässt sich sicher nicht mehr dauerhaft schließen. Diese Verformung entsteht allerdings nur, da z.Zt. eine recht einfache Beschlagstechnik mit nur einem Verriegelungspunkt modelliert wurde. Ein moderner Umlaufbeschlag mit mehreren Verriegelungspunkten zum Blendrahmen könnte hier Abhilfe schaffen.

Bewertung der Ergebnisse für die Profilvariante 2 vom 23.06.2015:

Die aktuelle Profilgeometrie vom 23.06.2015 zeigt im geöffneten Zustand (LF01 u. LF02; Tabelle 2) deutlich kleinere Verschiebungen als die Profilvariante 1. Die maximale Verschiebung von ca. 1,5cm bei der Profilvariante 1 ist bei der Profilvariante 2 um ca. 50% kleiner und beträgt jetzt 0,789cm.

Unter Winddruck im geschlossenen Zustand kommt es bei der Profilvariante 2 zu etwas größerer Verdrehung des Flügelprofils (s. Abb.55 im weiteren) als bei der Variante 1. Da die Werte der maximalen Verschiebung in der Größenordnung eines Hundertstels mm liegen, kann die eventuelle Eindringung des Wassers in das Profil auf die gleiche Weise wie bei der Profilvariante 1 verhindert werden.

Die Verformung des Flügelprofils unter Windsog im geschlossenen Zustand (LF03S) ist bei der Profilvariante 2 um ca. 30% kleiner als bei der Variante 1 und die maximale Verschiebung des Flügelprofils beträgt 0,85mm.

CAD - Modell:

Das 3D CAD-Modell des Fensters wurde anhand der 2D PDF Skizze mithilfe des Programms Solidworks aufbereitet.

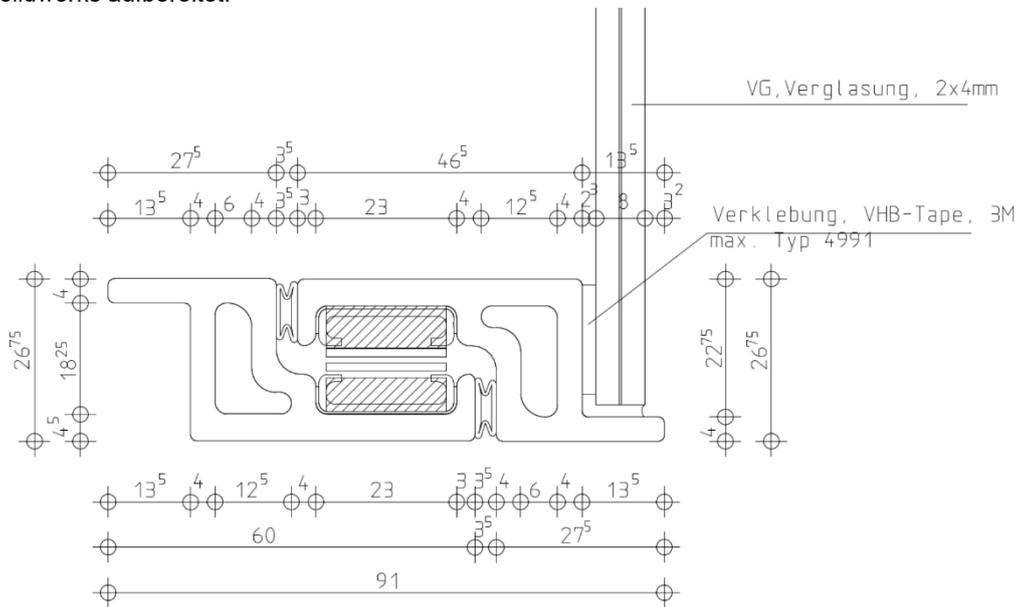
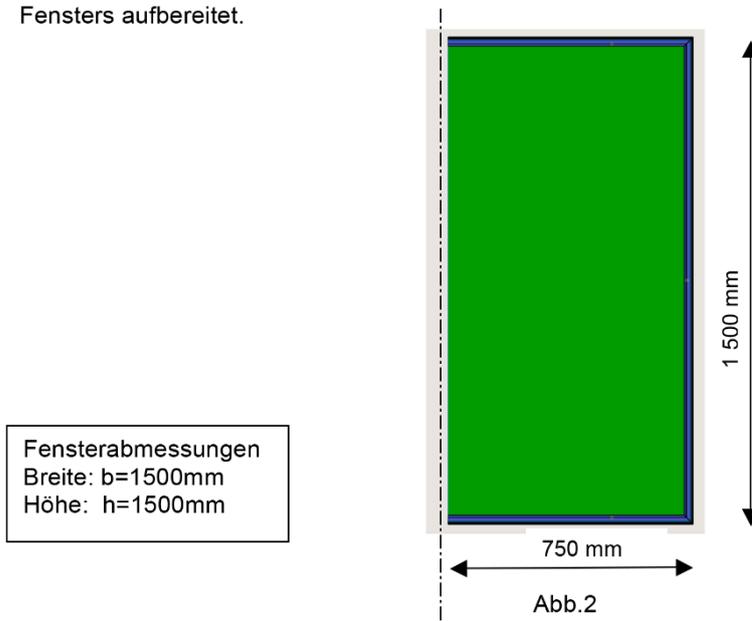


Abb.1 Fensterquerschnitt

Aufgrund der uniaxialen Symmetrie des Fensters, der Lagerung (Beschlag und Befestigung des Blendrahmens) und Belastung bei den untersuchten Lastfällen, kann in der statischen Berechnung nur eine Hälfte des Fensters betrachtet werden. Daher wurde das CAD-Modell von einer Hälfte des Fensters aufbereitet.



Die Einzelteile des Fensters sind im CAD-Modell entweder als Solid- (Flügel, Blendrahmen, Verklebung) oder als Flächenbauteile (Glasscheibe) modelliert. Die Bauteile Flügel, Verklebung und Glasscheibe sind anschließend in eine Baugruppe eingebaut, damit in der FEM-Analyse ihre Zusammenwirkung berücksichtigt werden kann.

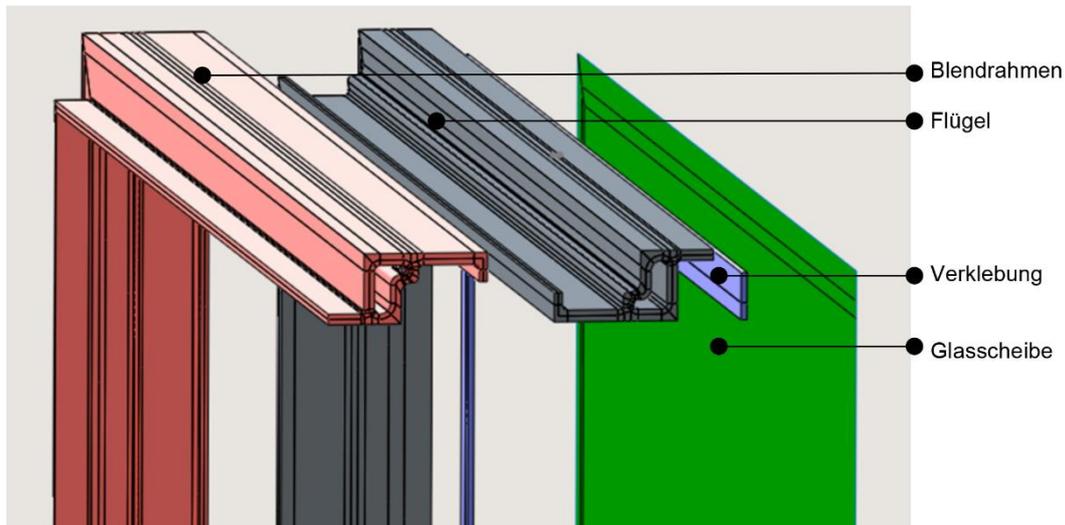


Abb.3 Zusammensetzung des CAD-Modells

FEM – Modell und Analyse:

Im FEM-Programm Ansys V.14.5 wurde das FEM-Modell anhand des CAD-Modells aufgebaut und eine lineare Finite-Elemente-Analyse durchgeführt.

Idealisierungen im FEM-Modell:

Vernetzung:

Die Vernetzung der Geometrie erfolgte mit 22 960 Hexaeder- Blendrahmen und 3 010 Shell-Elementen.

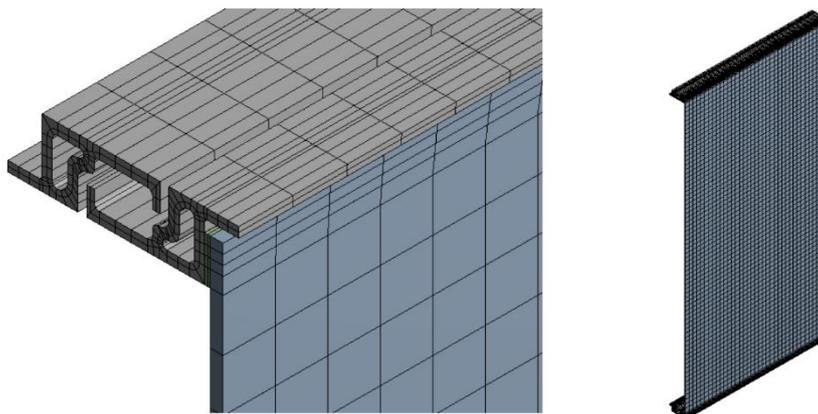


Abb.4 FE- Netz

Ersatzscheibendicke

Die Vakuumisolierglasscheibe mit Dicken von 2x4mm bzw. 2x5mm wurde als Schalenelement mit einer Ersatzscheibendicke d^* modelliert.

Die Ersatzscheibendicke d^* wurde wie folgt ermittelt:

Verglasung 2x4mm

$$t_1 = 4 \text{ mm}$$

$$t_2 = 4 \text{ mm}$$

$$d_{2x4}^* = (4^3 + 4^3)^{1/3} = 5 \text{ mm}$$

Verglasung 2x5mm

$$t_1 = 5 \text{ mm}$$

$$t_2 = 5 \text{ mm}$$

$$d_{2x5}^* = (5^3 + 5^3)^{1/3} = 6,3 \text{ mm}$$

Symmetrierandbedingungen:

An den Elementknoten in der Symmetrieebene (yz-Ebene) wurden folgende Verschiebungen (T) bzw.-Rotationen (R) verhindert:

Solidelemente:

$$T_x=0$$

Schalenelemente:

$$T_x=0$$

$$R_y=0, R_z=0$$

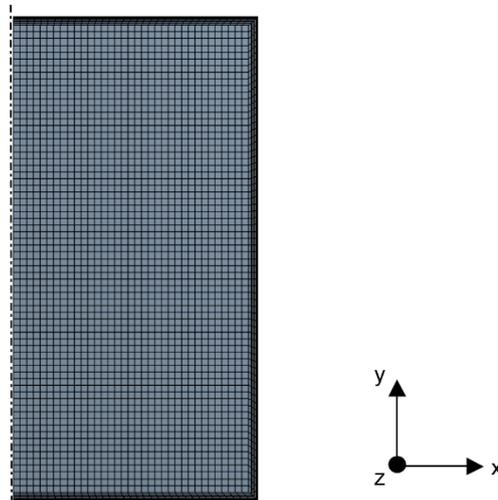


Abb.5 Randbedingungen

Materialdaten:

Unidirektionaler GFK (Flügel- und Blendrahmenprofile)

Bei einem unidirektionalen GFK sind die mechanischen Materialeigenschaften Elastizitätsmodul E , Schubmodul G und Querdehnzahl M von dem Faservolumenanteil F , dem Orientierungswinkel der Faser α und der Art der Matrix abhängig. Der Werkstoff ist stark anisotrop, gekennzeichnet durch einen hohen E -Modul in Faserrichtung, die der Längsrichtung der Fensterprofile entspricht, und dem geringeren E -Modul quer zur Faserrichtung.

Zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Flügel- und Blendrahmenprofilen wurde die Excel-Anwendung LamiCens (entwickelt von Prof. Dr.-Ing. Herbert Funke in der Zusammenarbeit mit R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH) verwendet.

Nach Eingabe von angenommenen Kennwerten:

Unidirektionales Glasgewebe 220g/m²

Matrix: L1000/EPH294

Faservolumenanteil: $F=70\%$

wurden mit LamiCens folgende Ergebnisse ermittelt:

Elastizitätsmodul in Faserrichtung: $E_{0^\circ} = 50\,000\text{ N/mm}^2$
 Elastizitätsmodul quer zur Faserrichtung: $E_{90^\circ} = 22\,000\text{ N/mm}^2$
 Querdehnzahl in Faserrichtung $\mu_{0^\circ} = 0,157$
 Querdehnzahl quer zur Faserrichtung $\mu_{90^\circ} = 0,07$
 Schubmodul $G_{0^\circ}=G_{90^\circ} = 5\,260\text{ N/mm}^2$
 Laminatgewicht: $261,3\text{g/m}^2$
 Laminatdicke: $0,12\text{mm}$
 Aus diesen zwei Werten wurde die Dichte des Werkstoffs umgerechnet.
 Dichte: $\rho=2\,177\text{kg/m}^3$

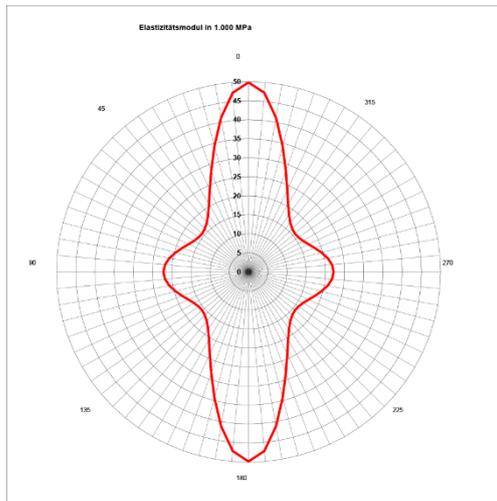


Abb.6 E- Modul [1000 MPa]

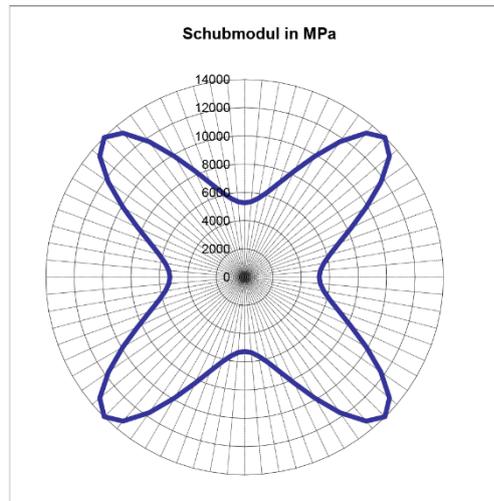


Abb.7 Schubmodul [MPa]

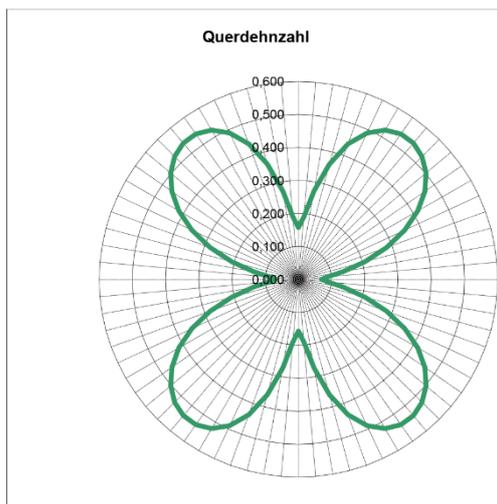


Abb.8 Querdehnzahl [-]

Zu den Abb.6-8 werden in einem Polarkoordinatensystem die Werkstoffkennwerte E-modul, Schubmodul und Querdehnzahl in Abhängigkeit von dem Orientierungswinkel der Faser dargestellt. Der Winkel von 0° bzw. 90° entspricht den Werkstoffkennwerten des GFKs in der Längsrichtung der Glasfaser bzw. quer zur Faserrichtung.

VakuumisoliertglasElastizitätsmodul: $E = 70\,000\text{ N/mm}^2$ Querdehnzahl $\mu = 0,3$ Dichte: $\rho = 2\,500\text{ kg/m}^3$

Da das Vakuumisoliertglas aus 2x4mm bzw. 2x5mm mit einer Ersatzscheibendicke von 5mm bzw. 6,3mm modelliert wurde, wurde im FEM-Modell der Wert der Dichte entsprechend angepasst, damit das Eigengewicht der Glasscheibe der Realität entspricht.

Ersatzscheibendicke 5mm (Verglasung 2x4mm=8mm)

Dichte: $\rho = 2\,500 \cdot 8/5 = 4\,000\text{ kg/m}^3$

Ersatzscheibendicke 6,3mm (Verglasung 2x5mm=10mm)

Dichte: $\rho = 2\,500 \cdot 10/6,3 = 3\,968\text{ kg/m}^3$ Verklebung:Elastizitätsmodul: $E = 3\,500\text{ N/mm}^2$ Querdehnzahl $\mu = 0,45$ Dichte: $\rho = 720\text{ kg/m}^3$ **Lastannahmen:**

In der FEM-Analyse wurde die Windeinwirkung in Form von äußerem (weiter im Text Winddruck) und innerem (weiter im Text Windsog) Druck auf das eingebaute Fenster analysiert. Das Eigengewicht des Fensters wird automatisch berücksichtigt.

Windlast:

Die Windlast wurde als Flächenlast unter Annahme folgender Einflussfaktoren ermittelt:

Windzone 3, Binnenland

Gebäudehöhe: 0m-18m

Staudruck (resultierend aus der Windzone und Gebäudehöhe): $q_p = 0,95\text{ kN/m}^2 = 0,00095\text{ N/mm}^2$ Teilsicherheitsbeiwert: $\gamma = 1,5$ Eigenlast:Teilsicherheitsbeiwert bei ungünstiger Wirkung: $\gamma_{G,dst} = 1,1$ Teilsicherheitsbeiwert bei günstiger Wirkung: $\gamma_{G,stb} = 0,9$ **Lastfälle:**

LF01: Winddruck im offenen Zustand

Aerodynamischer Beiwert für den Winddruck: $c_{pe,1} = 1,1$ Windeinwirkung: $w = q_p \times c_x \times \gamma = 0,00095 \times 1,1 \times 1,5 = 0,001568\text{ N/mm}^2$

LF01: Winddruck im offenen Zustand

Aerodynamischer Beiwert für den Winddruck: $c_{pe,1}=1,1$

Windeinwirkung am Flügel: $w = q_p \times c = 0,00095 \times 1,1 = 0,001045 \text{N/mm}^2$

Belastung am Blendrahmen: $F_{AX} = -138\text{N}$, $F_{Ay} = -264\text{N}$, $F_{BX} = 266\text{N}$, $F_{cX} = -1\,374\text{N}$

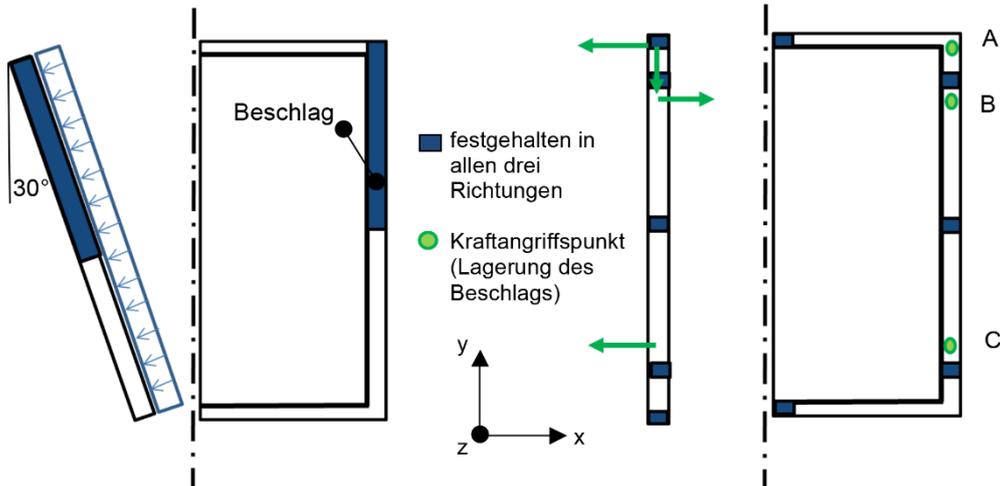


Abb.9 Randbedingungen Flügel

Abb.10 Randbedingungen Blendrahmen

LF02: Windsog im offenen Zustand

Aerodynamischer Beiwert für den Windsog: $c_{pe,1}=-2,5$

Windeinwirkung am Flügel: $w = q_p \times c = 0,00095 \times (-2,5) = -0,002375 \text{N/mm}^2$

Belastung am Blendrahmen: $F_{AX} = 612\text{N}$, $F_{Ay} = -264\text{N}$, $F_{BX} = -415\text{N}$, $F_{cX} = 2\,135\text{N}$

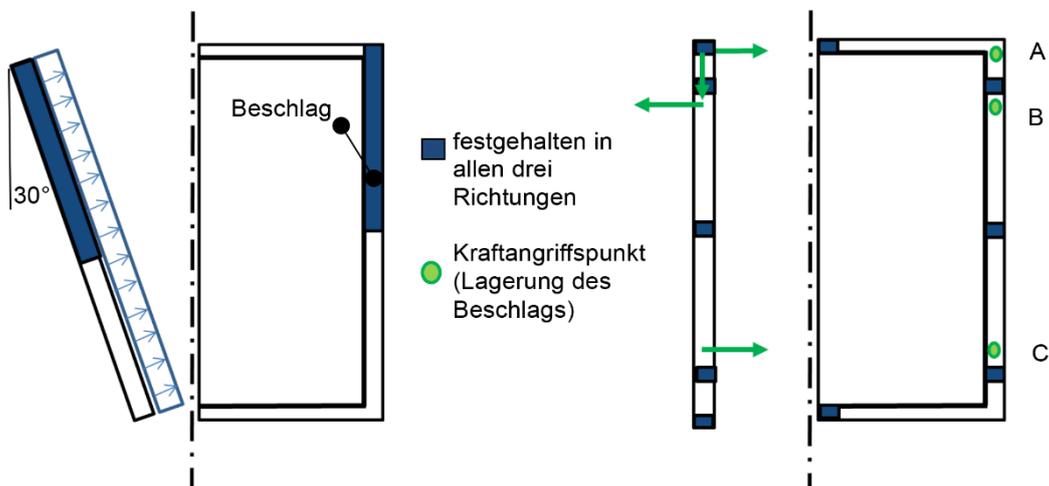


Abb.11 Randbedingungen Flügel

Abb.12 Randbedingungen Blendrahmen

LF03: Winddruck/Windsog im geschlossenen Zustand

Aerodynamischer Beiwert für den Winddruck: $c_{pe,1}=1,0$

Windeinwirkung am Flügel: $w = q_p \times c = 0,00095 \times 1,0 = 0,00095 \text{ N/mm}^2$

Belastung am Blendrahmen: $w = 0,00095 \text{ N/mm}^2$, $F_{Ay} = -304 \text{ N}$

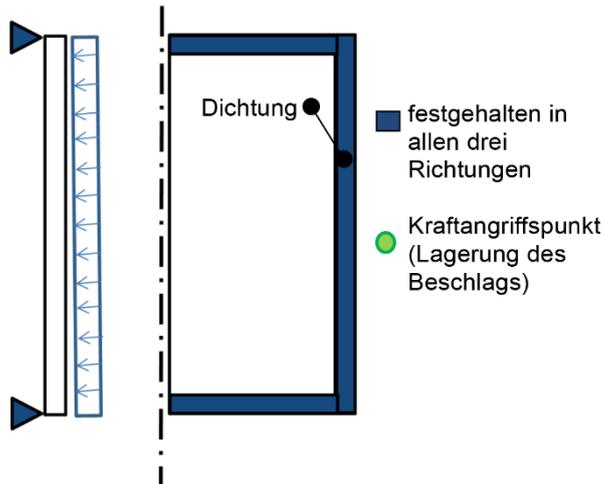


Abb.13 Randbedingungen Flügel

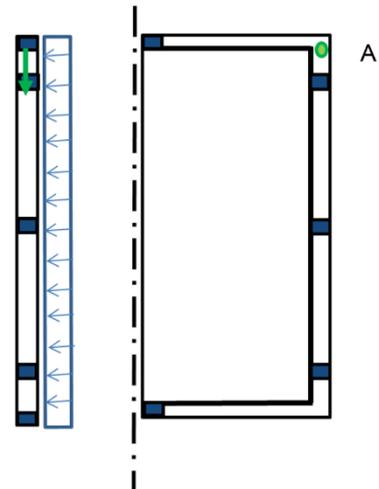


Abb.14 Randbedingungen Blendrahmen

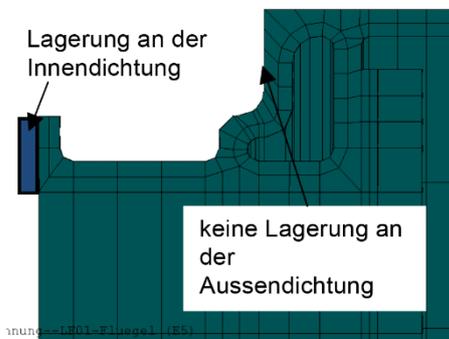


Abb.15 Lagerung des Flügels an der Dichtung

Durch das Verdrehen des Querschnitts hebt der Flügel vom Blendrahmen an der Aussendichtung ab (siehe Abb.30), deswegen wird beim Lastfall LF03 Winddruck im geschlossenen Zustand der Flügel nur an der Innendichtung gelagert.

Aerodynamischer Beiwert für den Windsog: $c_{pe,1} = -1,7$

Windeinwirkung: $w = q_p \times c = 0,00095 \times (-1,7) = 0,001615 \text{ N/mm}^2$

Belastung am Blendrahmen: $F_{Ax} = 523 \text{ N}$, $F_{Ay} = -2\,924 \text{ N}$, $F_{Cx} = 713 \text{ N}$, $F_{Dx} = 453 \text{ N}$, $F_{Dy} = 2\,620 \text{ N}$

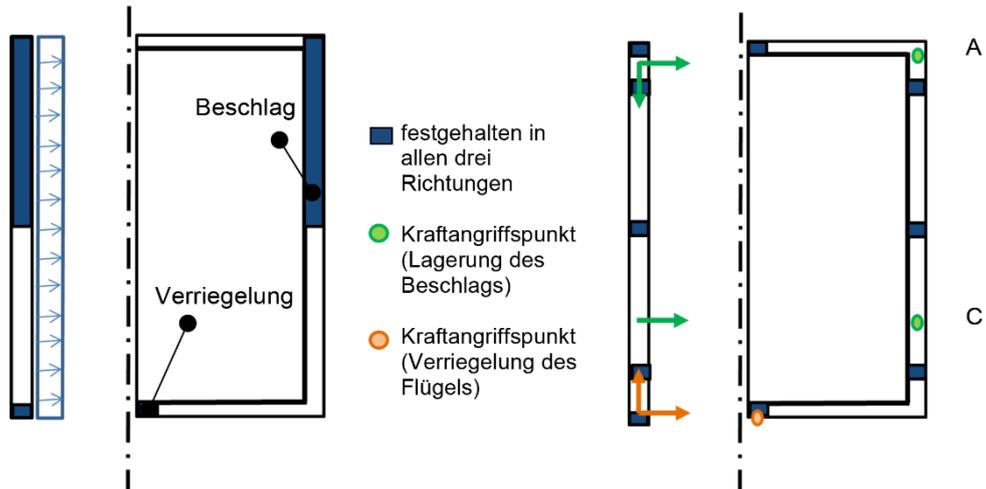


Abb.16 Randbedingungen Flügel

Abb.17 Randbedingungen Blendrahmen

Befestigung des Blendrahmens:

Der Blendrahmen wird an fünf Punkten (eine Fensterhälfte) befestigt, um eine ausreichende Steifigkeit zu erzielen. Durch die Erhöhung der Anzahl der Befestigungspunkte des Blendrahmens von zwei auf fünf (eine Hälfte des Fensters), wurde zusätzlich eine höhere Steifigkeit des Blendrahmens erzielt.

Beschlag:

Die Beschlagsgeometrie wird im FE- Modell nicht generiert sondern es werden die Kräfte aus dem Flügel auf den Beschlag ermittelt und dann auf den Blendrahmen angesetzt. Es wird der Schwingfensterbeschlag 21882 des Herstellers IPA (Abb.18) zugrunde gelegt. Der dargestellte Öffnungswinkel von 30° entspricht dem offenen Zustand des Fensters wie in den Lastfällen LF01 und LF02.

C-11



SCHWINGFENSTERBESCHLÄGE

FÜR TOP WENDE-FENSTER 180°

IPA NR. 21874-82 M/EINSTELLBARER REIBUNG



1/2 SATZ

EINSTELLBARE REIBUNG

BESTELLN.R.											
IPA NR.	MATERIAL		OBERFL.		STANDARDVERPACKUNG (SATZ PRO KANTEN)		A MM	B MM	INNENRAHMEN MM	SCHRAUBE	GEWICHT (UND KG) SATZ
	STAHL	OHNE SPEZIFIKATION	VERZINKT	STANDARDVERPACKUNG (SATZ PRO KANTEN)							
21874	1	0	21	1	18	534	535-634	3,5 & 4,0	1,1		
21875	1	0	21	1	18	634	635-734	3,5 & 4,0	1,3		
21876	1	0	21	1	18	734	735-834	3,5 & 4,0	1,5		
21877	1	0	21	1	18	834	835-934	3,5 & 4,0	1,7		
21878	1	0	21	1	18	934	935-1034	3,5 & 4,0	1,9		
21879	1	0	21	1	18	1034	1035-1134	3,5 & 4,0	2,1		
21880	1	0	21	1	18	1134	1135-1234	3,5 & 4,0	2,3		
21881	1	0	21	1	18	1234	1235-1334	3,5 & 4,0	2,5		
21882	1	0	21	1	18	1334	1335-1434	3,5 & 4,0	2,7		

- EINSTELLBARE REIBUNG
- VERDECKTLIEGENDER BESCHLAG
- DREHT 170° VOR DER FASSADE
- DREHT FREI VOR GARDINE UND RAHMEN
- WIRD MIT KANTENGETRIEBEN MIT ROLLZAPFEN IPA NR. 23151-70 ODER KANTENGETRIEBEN MIT PILZKOPF-ZAPFEN IPA NR. 23051-70 BENUTZT
- ELOXIERTES ALUMINIUMPROFIL

RETTUNGSÖFFNUNG:
500 MM AB IPA NR. 21877
600 MM AB IPA NR. 21879

KINDER- UND PUTZSICHERUNG SIEHE ABSCHNITT D.

Abb.18

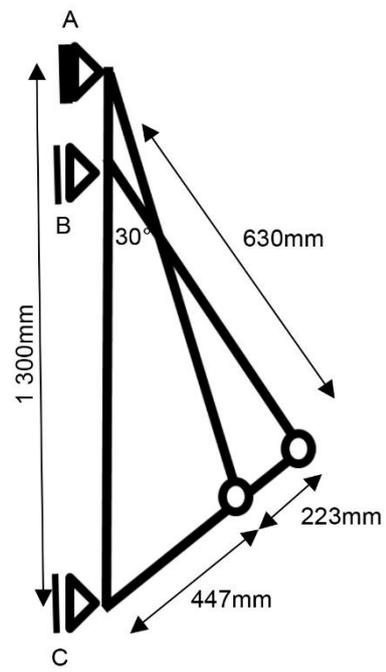
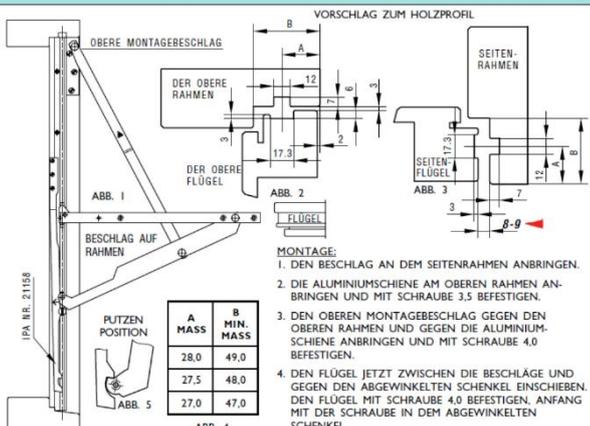


Abb.19

C-12



MONTAGEANLEITUNG



IPR NR. 21158

ABB. 1

ABB. 2

ABB. 3

ABB. 4

ABB. 5

MONTAGE:

- DEN BESCHLAG AN DEM SEITENRAHMEN ANBRINGEN.
- DIE ALUMINIUMSCHIENE AM OBEREN RAHMEN ANBRINGEN UND MIT SCHRAUBE 3.5 BEFESTIGEN.
- DEN OBEREN MONTAGEBESCHLAG GEGEN DEN OBEREN RAHMEN UND GEGEN DIE ALUMINIUMSCHIENE ANBRINGEN UND MIT SCHRAUBE 4.0 BEFESTIGEN.
- DEN FLÜGEL JETZT ZWISCHEN DIE BESCHLÄGE UND GEGEN DEN ABGEWINKELTEN SCHENKEL EINSCHIEBEN DEN FLÜGEL MIT SCHRAUBE 4.0 BEFESTIGEN, ANFANG MIT DER SCHRAUBE IN DEM ABGEWINKELTEN SCHENKEL.
- DER FLÜGEL KANN BIS ZU JEDER POSITION GEÖFFNET WERDEN. BEI GRÖßEREN ÖFFNUNGEN KANN DIE REIBUNG MIT DEN SCHRAUBEN IN DEN Gleitschienen EINGESTELLT WERDEN. REIBUNG MUSS IN BEIDEN SEITEN DIE GLEICHE SEIN. BITTE NOTIEREN, DASS DER FLÜGEL NICHT GEGEN KRÄFTIGE WINDE UND ANDERE BEEINFLUSSUNGEN GESICHERT IST.
- DIE KINDER- UND PUTZSICHERUNG IPR NR. 21158 WIRD AN DER LINKEN SEITE MIT SCHRAUBE 3.5 MONTIERT. SEHE ABB. 1.
- BEIM PUTZEN BITTE PUTZSICHERUNG NUR IN OBERE POSITION, BITTE SEHEN SIE ABB. 5. UNTERE POSITION IST NUR FÜR LÜFTUNGSPOSITION VORGESEHEN.

BEDIENUNGSANLEITUNG:

- DAS FENSTER ÖFFNEN, BIS DER KINDER- UND PUTZSICHERUNG VON SELBST EINRASTET.
- DAS FENSTER ETWA 2 CM SCHLIESSEN, DEN SICHERUNGSAARM (ABB. 1) IN RICHTUNG DES PFEILS BIEGEN UND DAS FENSTER GLEICHZEITIG ÖFFNEN.
- DAS FENSTER RASTET AUTOMATISCH IN DIE PUTZSICHERUNG UND WIRD GEMASS PUNKT 2 WIEDER FREIGEMACHT.

WARTUNG:
DIE BESCHLÄGE DÜRFEN NICHT ÜBERSTRICHEN WERDEN. DIE FUNKTION SOLLTE VON ZEIT ZU ZEIT GETESTET WERDEN. BEI DER MONTAGE DIE BEWEGLICHEN METALLTEILE, UNTER MEHRFACHER BEWEGUNG, MIT OIL SCHMIEREN. KÜNFTIG DIE BESCHLÄGE MINDESTENS ZWEIFMAL JÄHRLICH SCHMIEREN. DIE ALUMINIUMSCHIENEN DÜRFEN NICHT GESCHMIERT WERDEN. SIEHE ABSCHNITT H.

WICHTIG: BEI DER FERTIGUNG UND DEM EINSETZEN DES FENSTERS MUSS DIE SEITENRAHMEN GERADE UND PARELLEL SEIN. DIES IST NOTWENDIG, DARIT DIE GLEITER IN DER ALUMINIUMSCHIENEN UNBEHINDERT BEWEGT WERDEN KÖNNEN.

DIE IN ABB. 4 ANGEGBENEN MASSE SETZEN VORAUSS, DASS DIE DICHTUNGSLISTE AUF DEM FLÜGEL MONTIERT IST.

IPR NR.	INNEN RAHMEN MM	BESCHLAG-LÄNGE MM	HÖCHSTGEWICHT KG
21874	535-634	534	45
21875	635-734	634	45
21876	735-834	734	45
21877	835-934	834	45
21878	935-1034	934	45
21879	1035-1134	1034	45
21880	1135-1234	1134	45
21881	1235-1334	1234	45
21882	1335-1434	1334	45

DEN LÄNGST MÖGLICHEN BESCHLAG VERWENDEN

Abb.20

Dokumentation der Ergebnisse, Querschnitt vom 04.11.2014:

Fensterflügel

LF01: Winddruck im offenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 6,3mm)

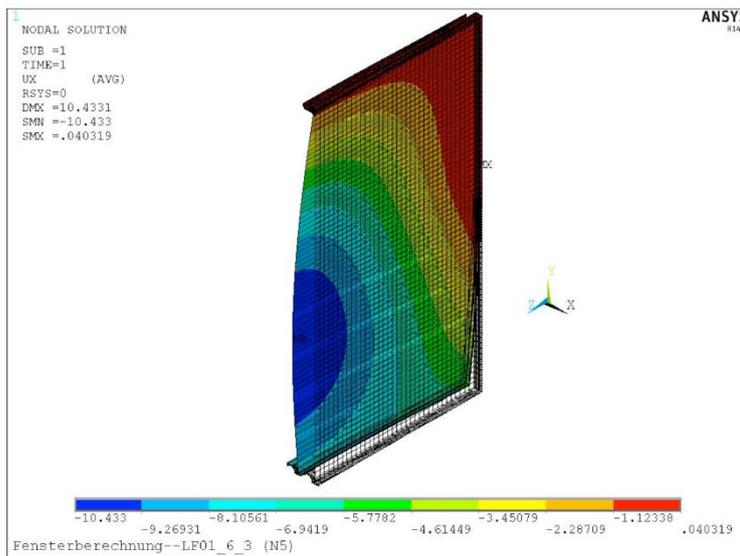


Abb.21 Verschiebung in x- Richtung [mm]

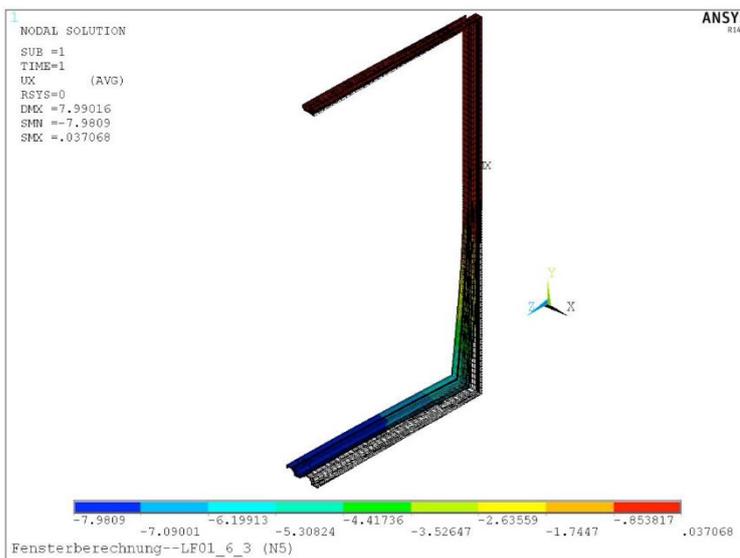


Abb.22 Verschiebung in x- Richtung [mm]

LF01: Winddruck im offenen Zustand; Verglasung 2x4mm (Ersatzscheibendicke 5mm)

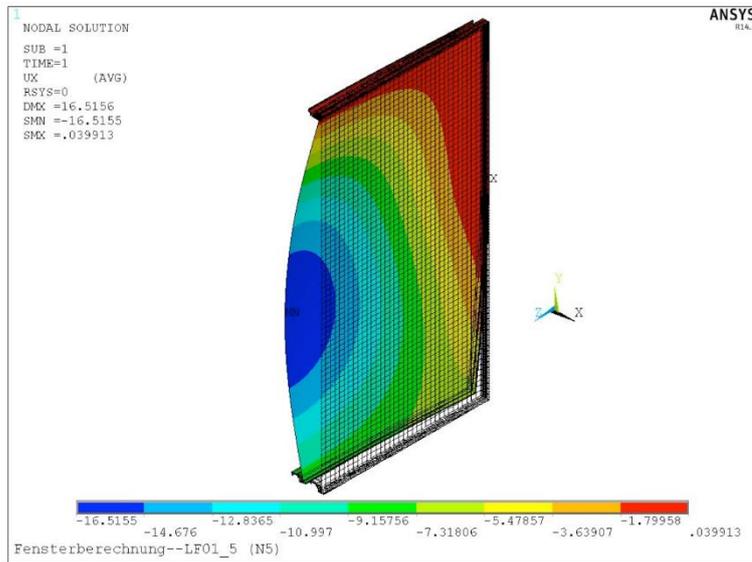


Abb.23 Verschiebung in x-Richtung [mm]

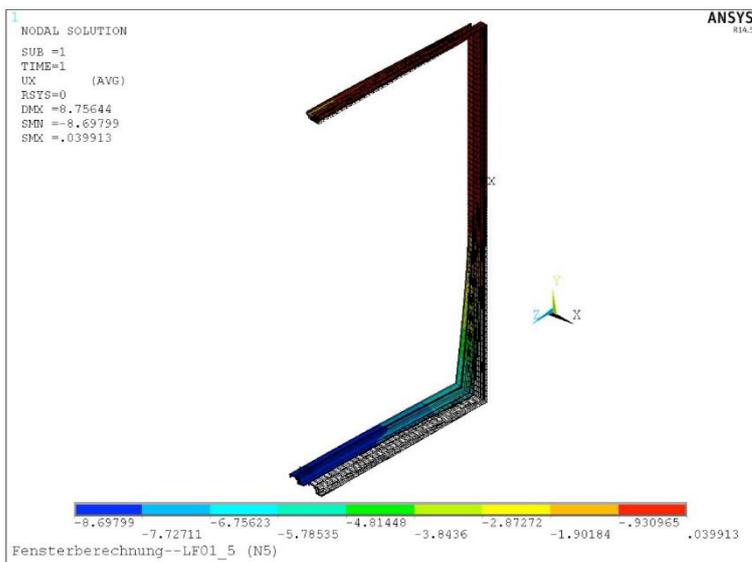


Abb.24 Verschiebung in x-Richtung [mm]

LF02: Winddsog im offenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 6,3mm)

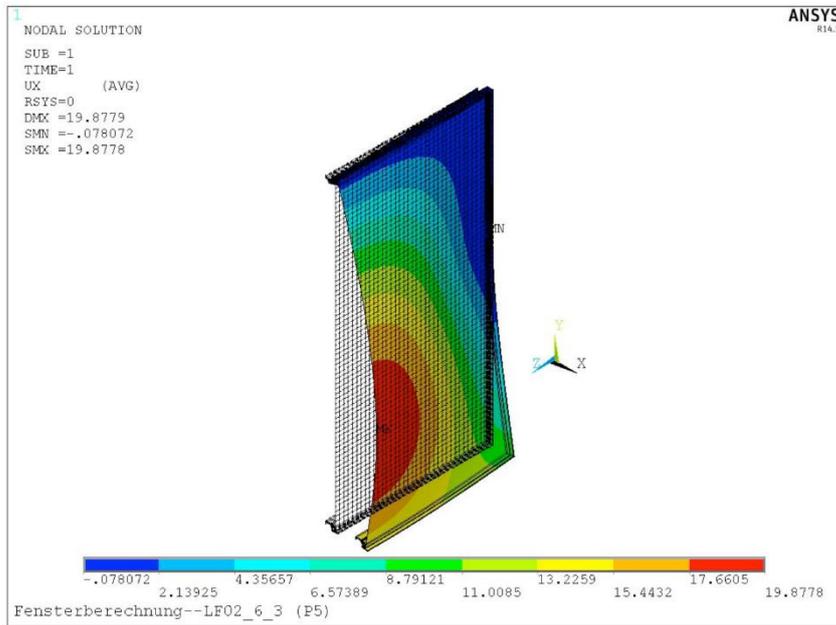


Abb.25 Verschiebung in x- Richtung [mm]

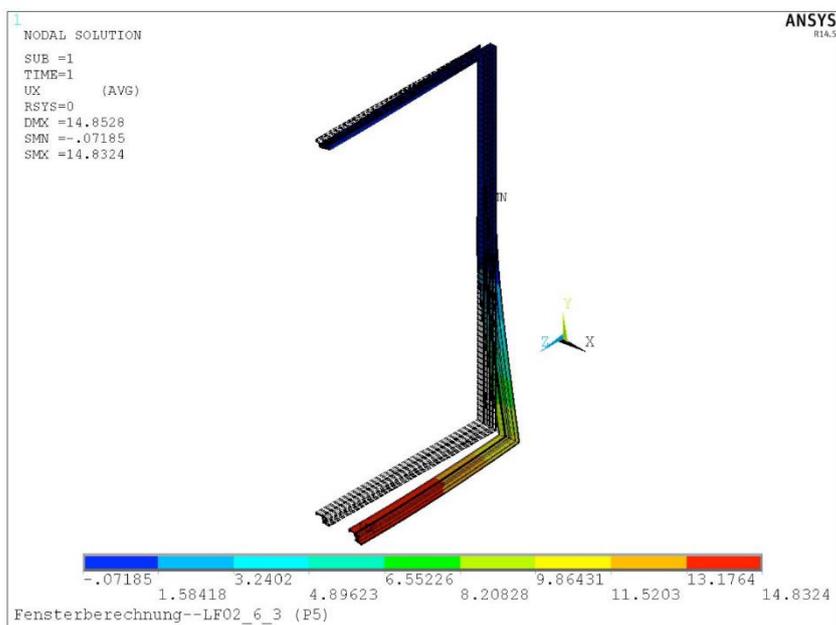


Abb.26 Verschiebung in x- Richtung [mm]

LF02: Windsog im offenen Zustand; Verglasung 2x4mm (Ersatzscheibendicke 5mm)

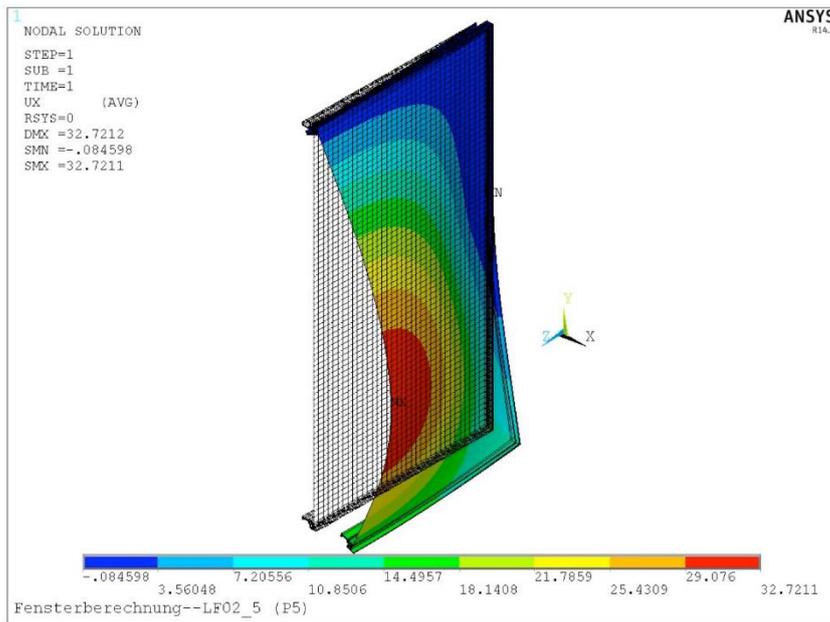


Abb.27 Verschiebung in x-Richtung [mm]



Abb.28 Verschiebung in x-Richtung [mm]

LF03D: Winddruck im geschlossenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 6,3mm)

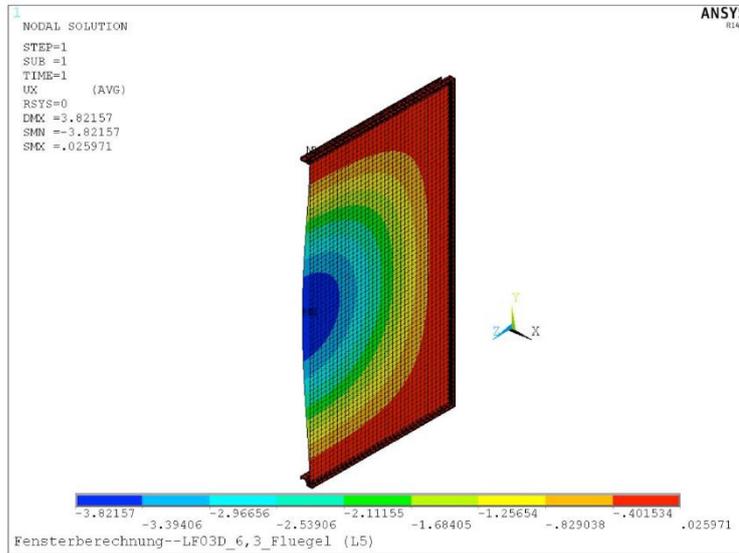


Abb.29 Verschiebung in x-Richtung [mm]

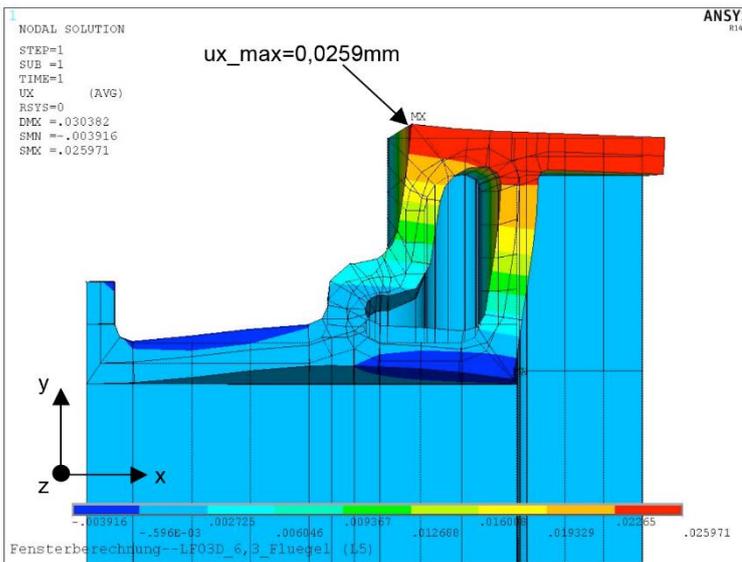
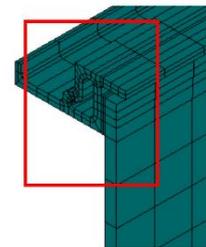


Abb.30 Verschiebung in x-Richtung; Verformungsfaktor 100



Durch das Verdrehen des Querschnittes hebt der Flügel an der Außendichtung vom Blendrahmen ab.

LF03D: Winddruck im geschlossenen Zustand; Verglasung 2x4mm (Ersatzscheibendicke 5mm)

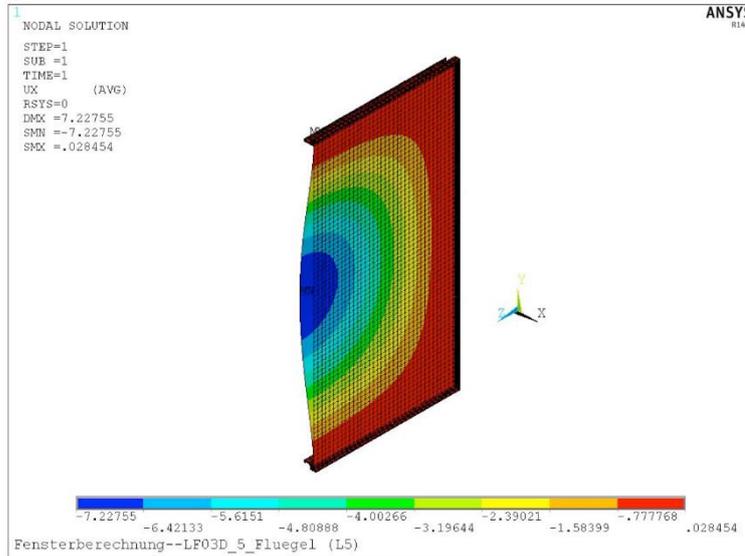


Abb.31 Verschiebung in x-Richtung [mm]

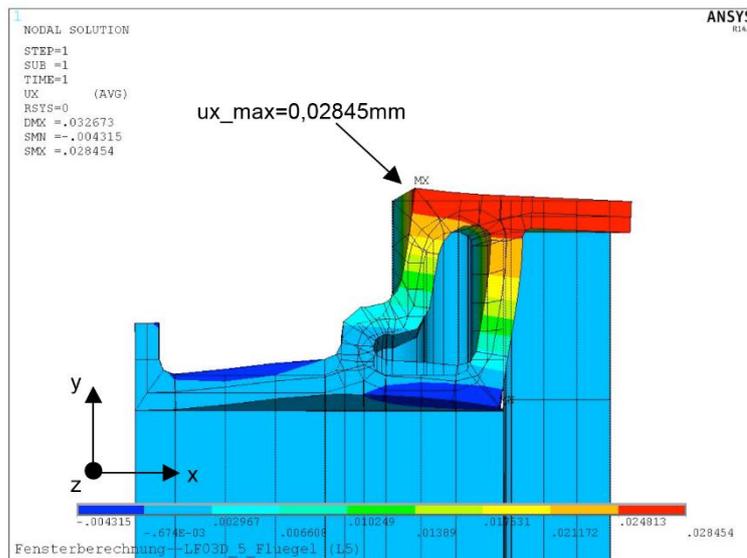
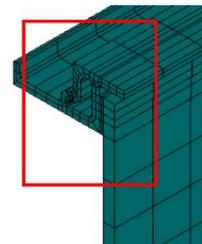


Abb.32 Verschiebung in x-Richtung [mm]; Verformungsfaktor 100



Durch das Verdrehen des Querschnittes hebt der Flügel an der Außendichtung vom Blendrahmen ab.

LF03S: Windsog im geschlossenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 6,3mm)

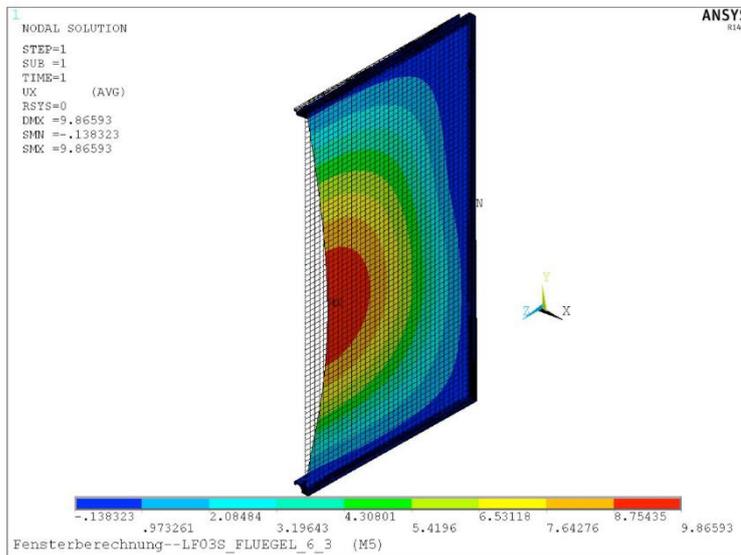
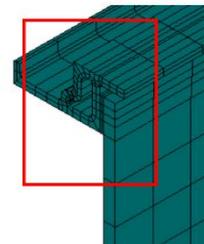


Abb.33 Verschiebung in x-Richtung [mm]



Abb.34 Verschiebung Verformungsfaktor 10 [mm]



Durch das Verdrehen des Querschnittes hebt der Flügel an der Außendichtung vom Blendrahmen ab.

LF03S: Windsog im geschlossenen Zustand; Verglasung 2x4mm (Ersatzscheibendicke 5mm)

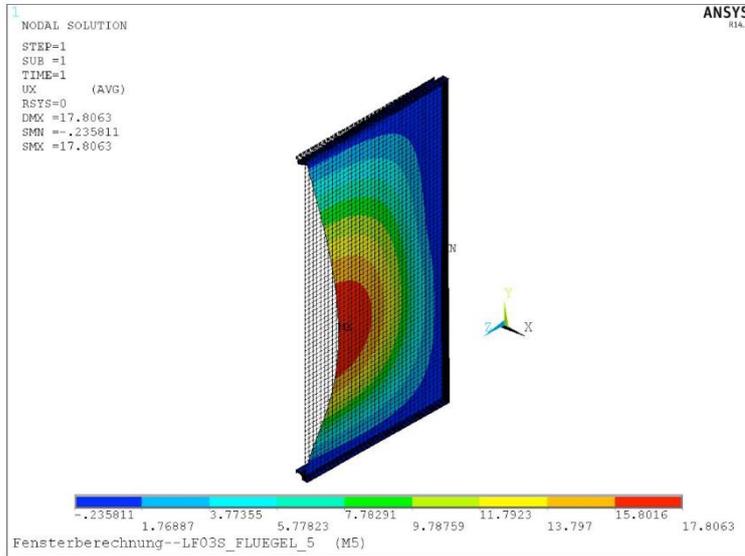
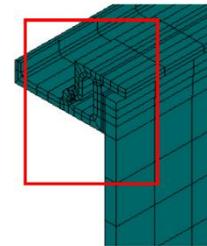


Abb.35 Verschiebung Verformungsfaktor 10 [mm]



Abb.36 Verschiebung Verformungsfaktor 10 [mm]



Blendrahmen:

LF01: Winddruck im offenen Zustand



Abb.37 Verschiebung Verformungsfaktor 100 [mm]

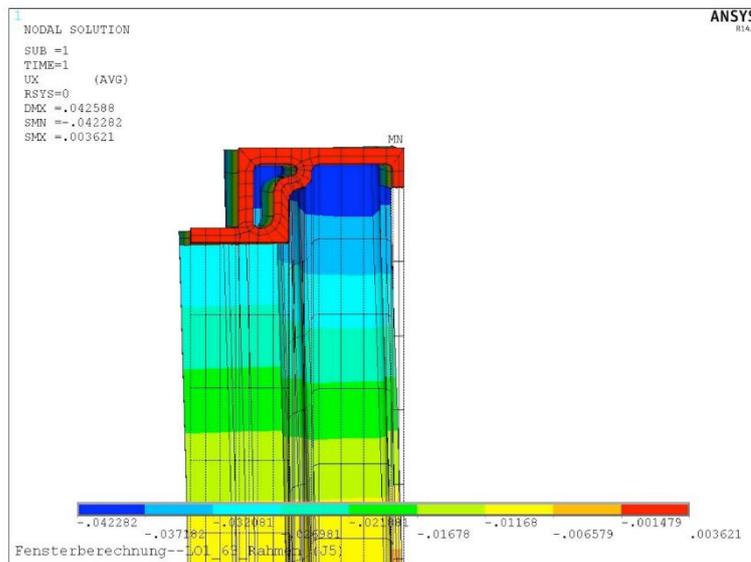


Abb.38 Verschiebung Verformungsfaktor 100 [mm]

An der Stelle der Einleitung der Quer- und Längskraft (siehe den Kraftangriffspunkt A unter „Randbedingungen“) zeigt der Blendrahmen die maximale Verschiebung. An den anderen zwei Punkten (B und C) wird die Querkraft in der unmittelbaren Nähe des Befestigungspunkts aufgebracht, wodurch kleinere Verformungen auftreten.

LF02: Windsog im offenen Zustand



Abb.39 Verschiebung in x-Richtung [mm]

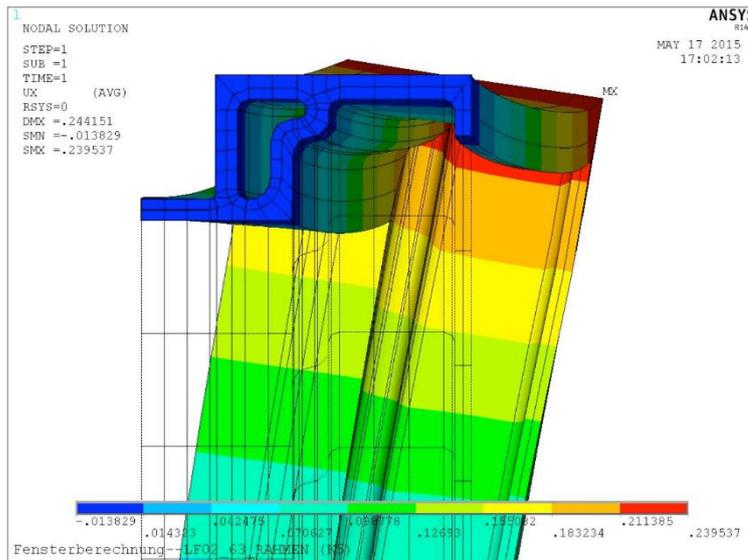


Abb.40 Verschiebung in x-Richtung [mm]

An der Stelle der Einleitung der Quer- und Längskraft (siehe den Kraftangriffspunkt A unter „Randbedingungen“) zeigt der Blendrahmen die maximale Verschiebung. An den anderen zwei Punkten (B und C) wird die Querkraft in der unmittelbaren Nähe des Befestigungspunkts aufgebracht, wodurch kleinere Verformungen auftreten.

LF03D: Winddruck im geschlossenen Zustand

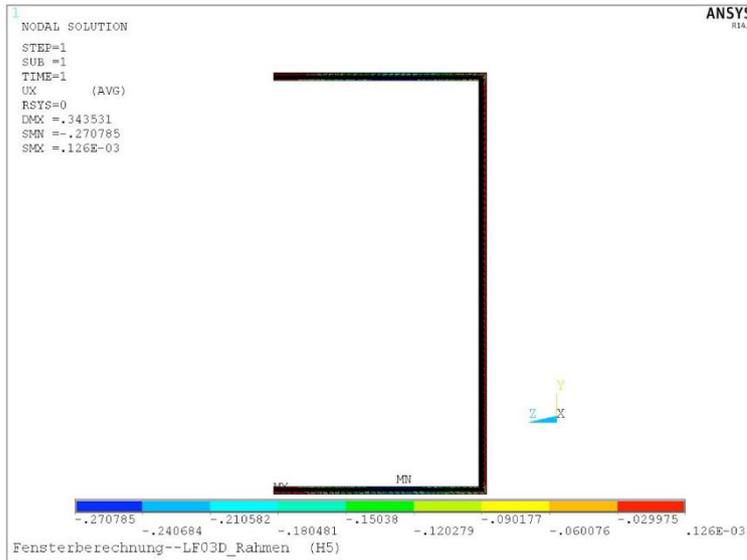


Abb.41 Verschiebung in x-Richtung [mm]

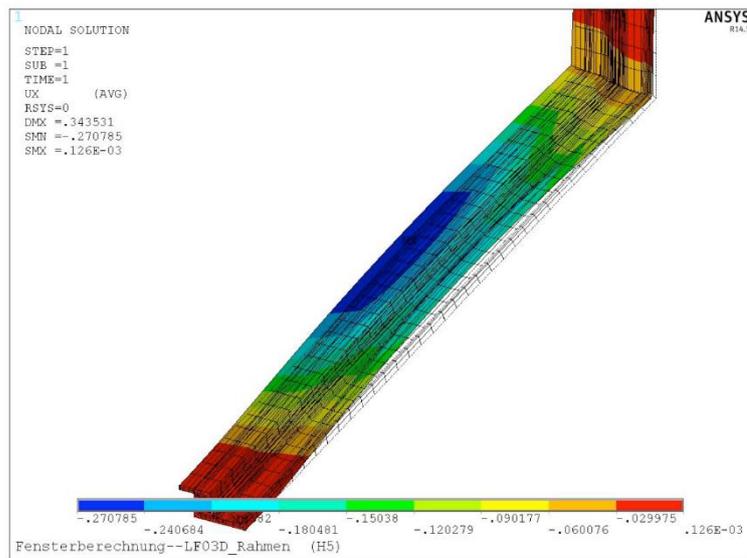


Abb.42 Verschiebung [mm]

Die maximale Verschiebung im Blendrahmen tritt im horizontalen Profil auf, im Bereich wo keine Befestigung vorhanden ist.

LF03S: Windsog im geschlossenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 6,3mm)



Abb.43 Verschiebung [mm]

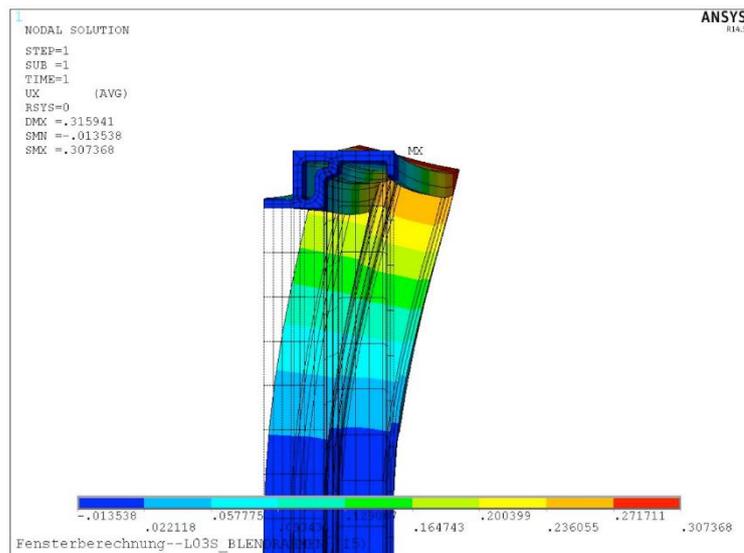


Abb.44 Verschiebung Faktor 100[mm]

An der Stelle der Einleitung der Quer- und Längskraft (siehe den Kraftangriffspunkt A unter „Randbedingungen“) zeigt der Blendrahmen die maximale Verschiebung. An den anderen zwei Punkten (B und C) wird die Querkraft in der unmittelbaren Nähe des Befestigungspunkts aufgebracht, wodurch kleinere Verformungen auftreten.

Ergebnisse optimierter Querschnitt

CAD – Modell vom 23.06.2015:

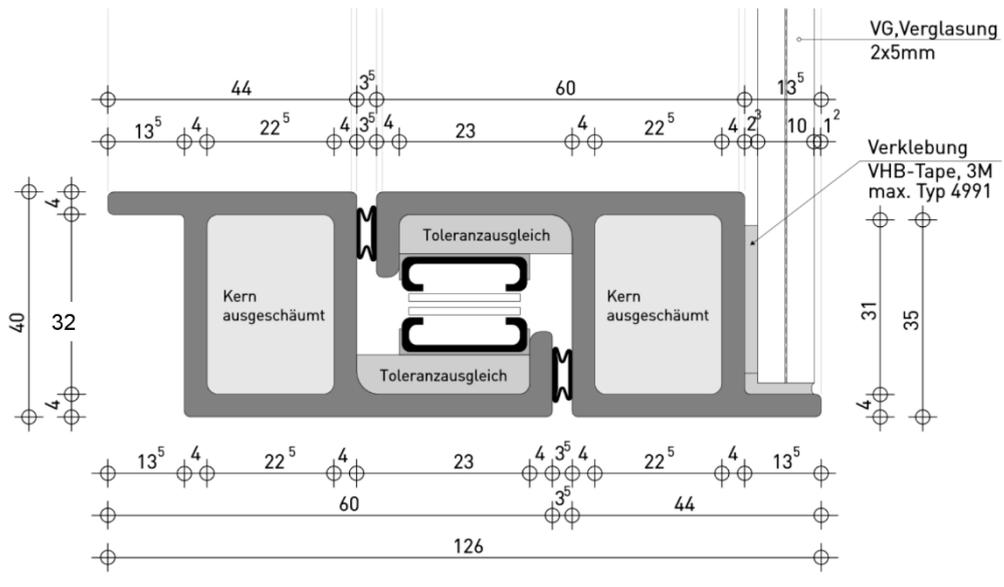


Abb.45 Fensterquerschnitt der Profilvariante 2

Anhand der PDF-Skizze der Profilvariante 2 wurde das Berechnungsmodell aufgebaut und die FEM-Analyse durchgeführt auf die gleiche Weise wie vorher im Dokument für die Ausgangsvariante beschrieben.

Dokumentation der Ergebnisse der Profilvariante 2:

Fensterflügel

LF01: Winddruck im offenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 6,3mm)

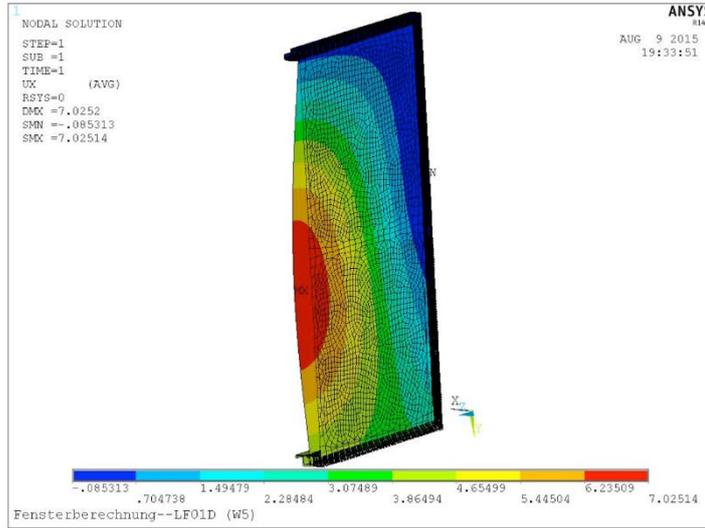


Abb.46 Verschiebung in x-Richtung [mm]

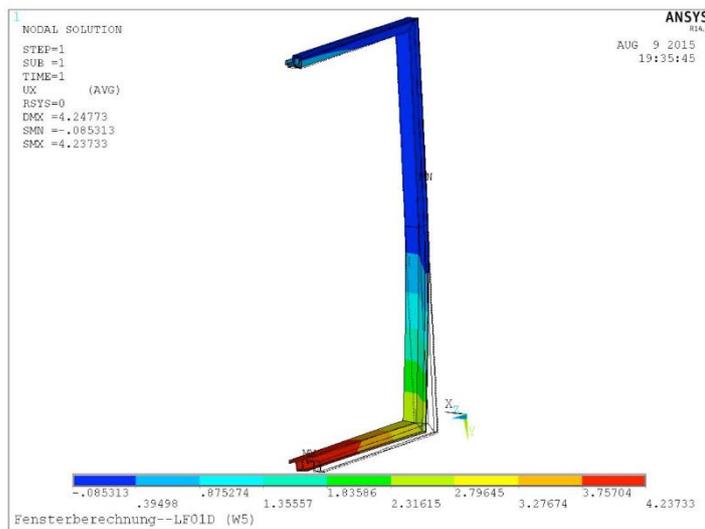


Abb.47 Verschiebung in x-Richtung [mm]

LF01: Winddruck im offenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 5mm)

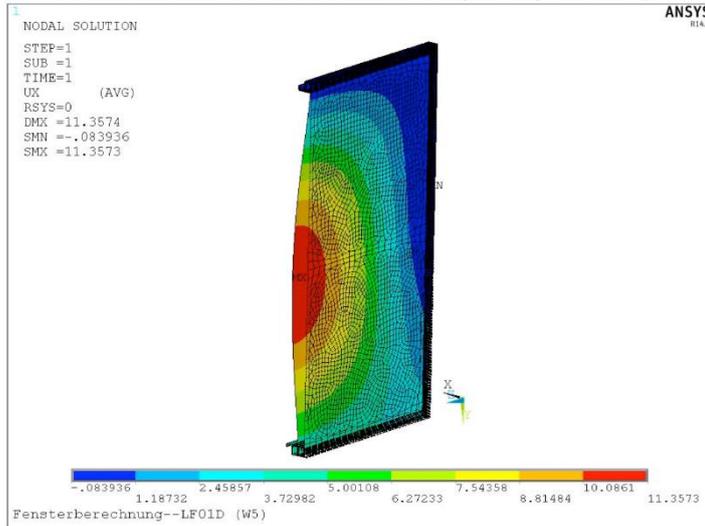


Abb.48 Verschiebung in x-Richtung [mm]

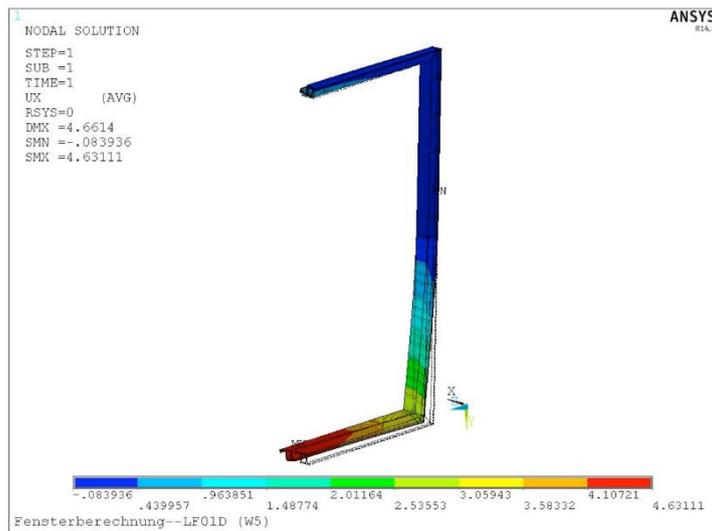


Abb.49 Verschiebung in x-Richtung [mm]

LF02: Windsog im offenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 6,3mm)

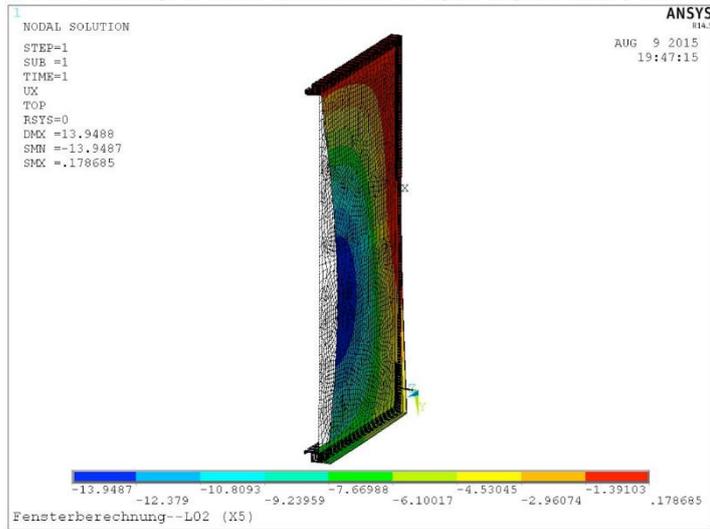


Abb.50 Verschiebung in x-Richtung [mm]

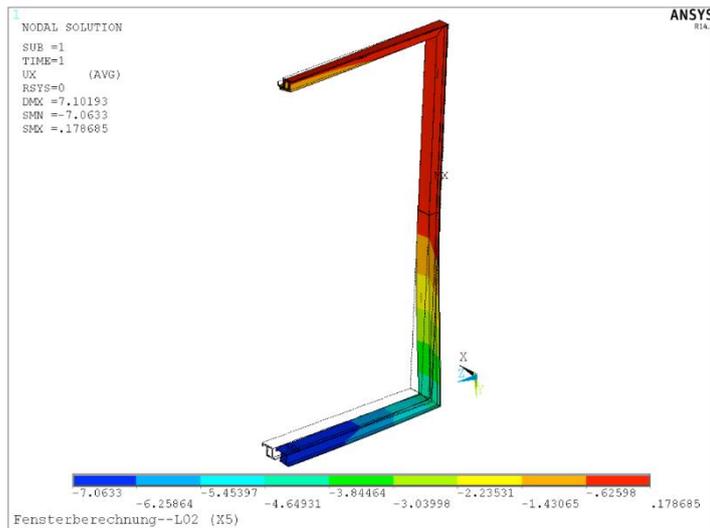


Abb.51 Verschiebung in x-Richtung [mm]

LF02: Windsog im offenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 5mm)

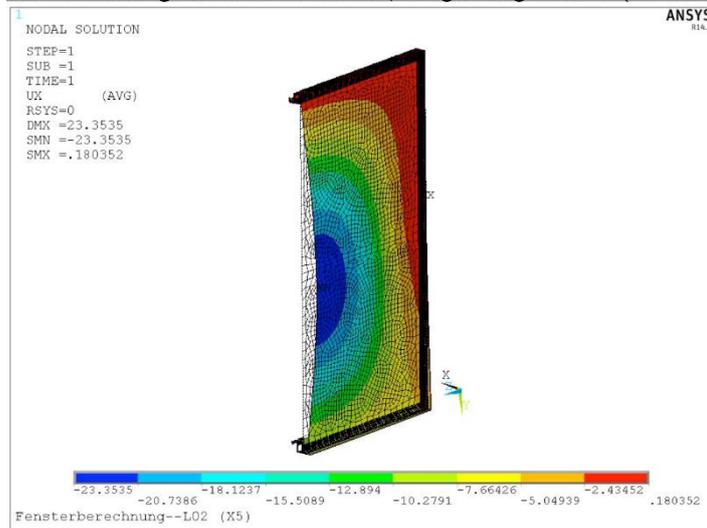


Abb.52 Verschiebung in x-Richtung [mm]

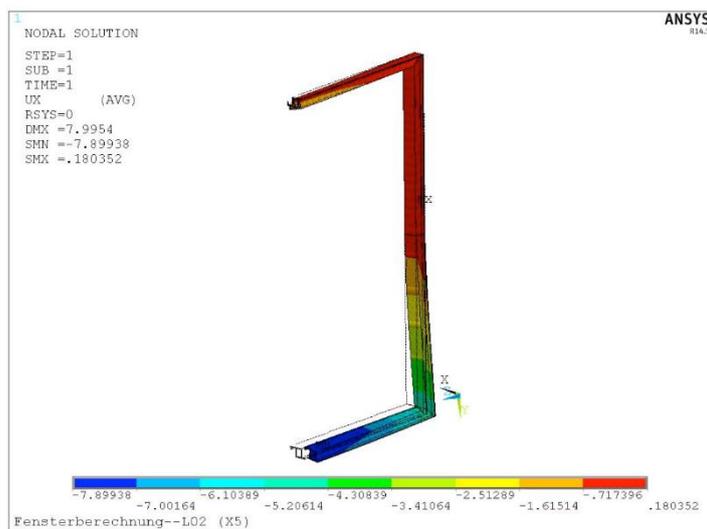


Abb.53 Verschiebung in x-Richtung [mm]

LF03D: Winddruck im geschlossenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 6,3mm)

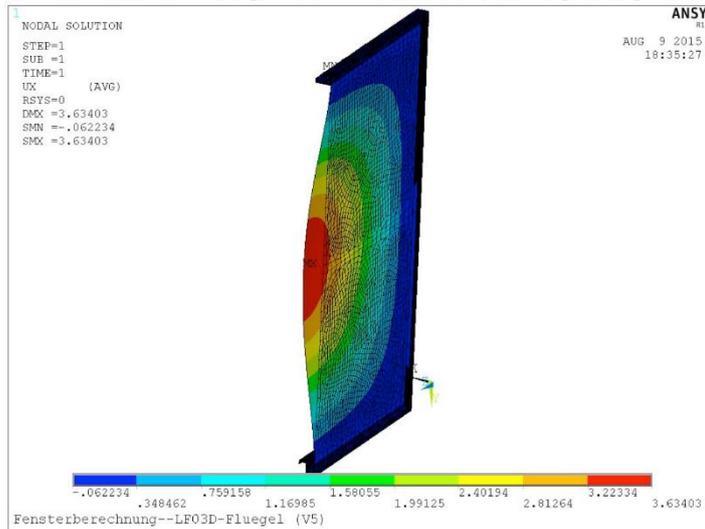
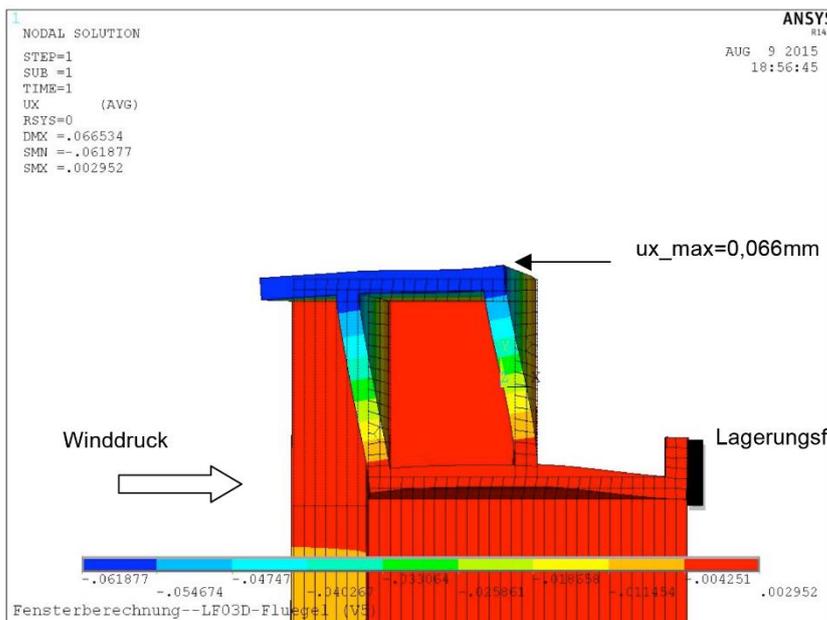


Abb.54 Verschiebung in x-Richtung [mm]



Durch das Verdrehen des Querschnittes hebt der Flügel an der Außendichtung vom Blendrahmen ab.

Abb.55 Verschiebung in x Richtung Verformungsfaktor 100 [mm]

LF03D: Winddruck im geschlossenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 5mm)

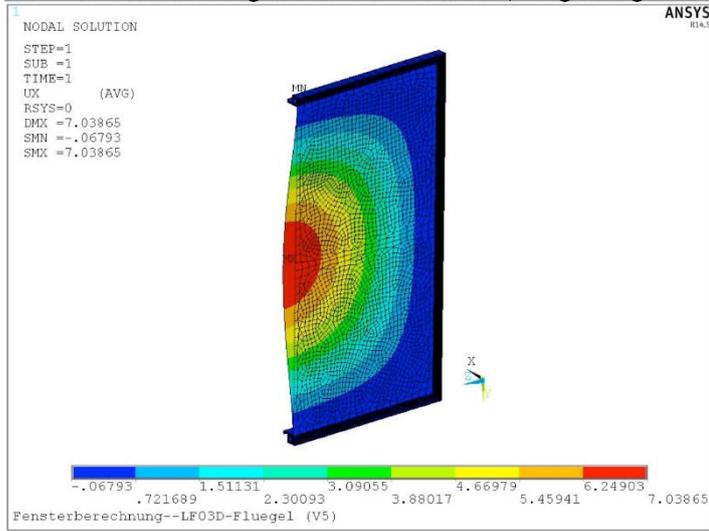


Abb.56 Verschiebung in x-Richtung [mm]



Abb.57 Verschiebung in x-Richtung [mm]

Durch das Verdrehen des Querschnittes hebt der Flügel an der Außendichtung vom Blendrahmen ab.

LF03S: Windsog im geschlossenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 6,3mm)

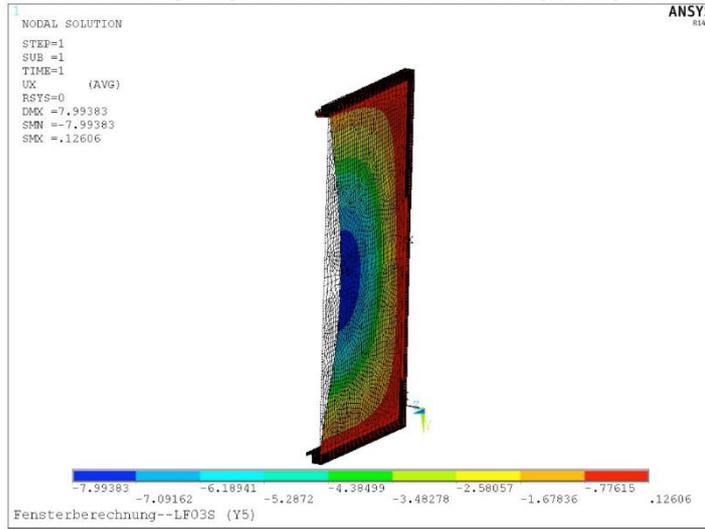


Abb.58 Verschiebung in x-Richtung [mm]

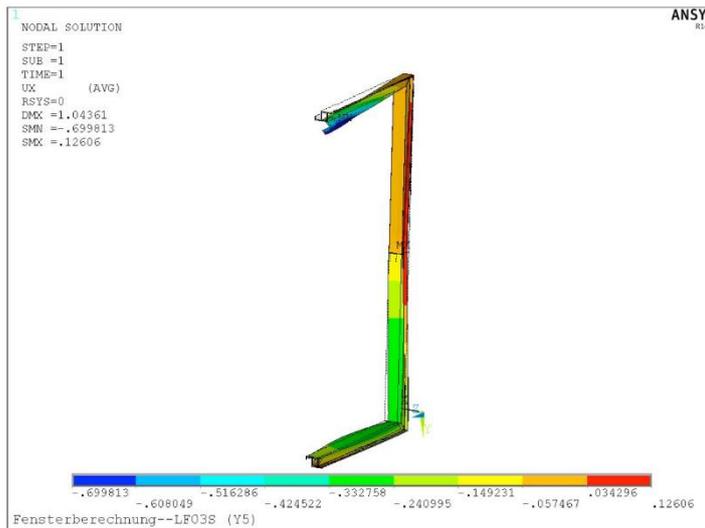


Abb.59 Verschiebung in x-Richtung [mm]

LF03S: Windsog im geschlossenen Zustand; Verglasung 2x5mm (Ersatzscheibendicke 5mm)

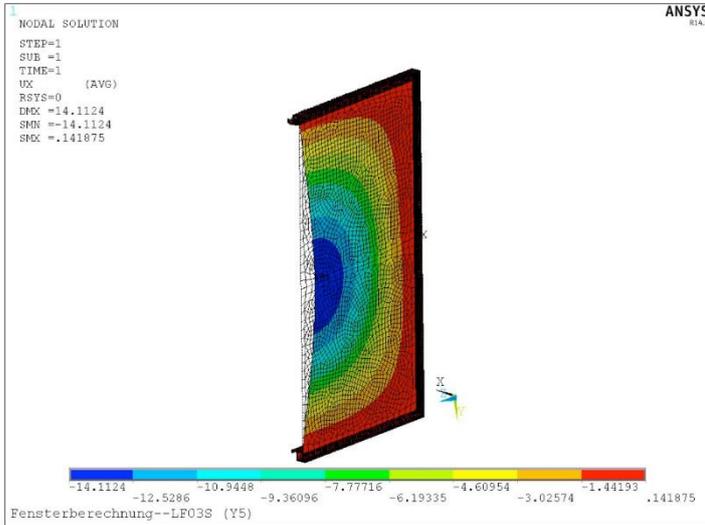


Abb.60 Verschiebung in x-Richtung [mm]



Abb.61 Verschiebung in x-Richtung [mm]

10 Anhang - Fotos Displays und Messeauftritte



Abb. 10.1 ULTRALIGHT-Neubau auf der „glasstec 2014“ in Düsseldorf.



Abb. 10.2 ULTRALIGHT auf der „BAU 2015“ in München: Messedisplays Neubau und Altbau (oben), Besuch der Ministerin BMUB am 19. Januar 2015.

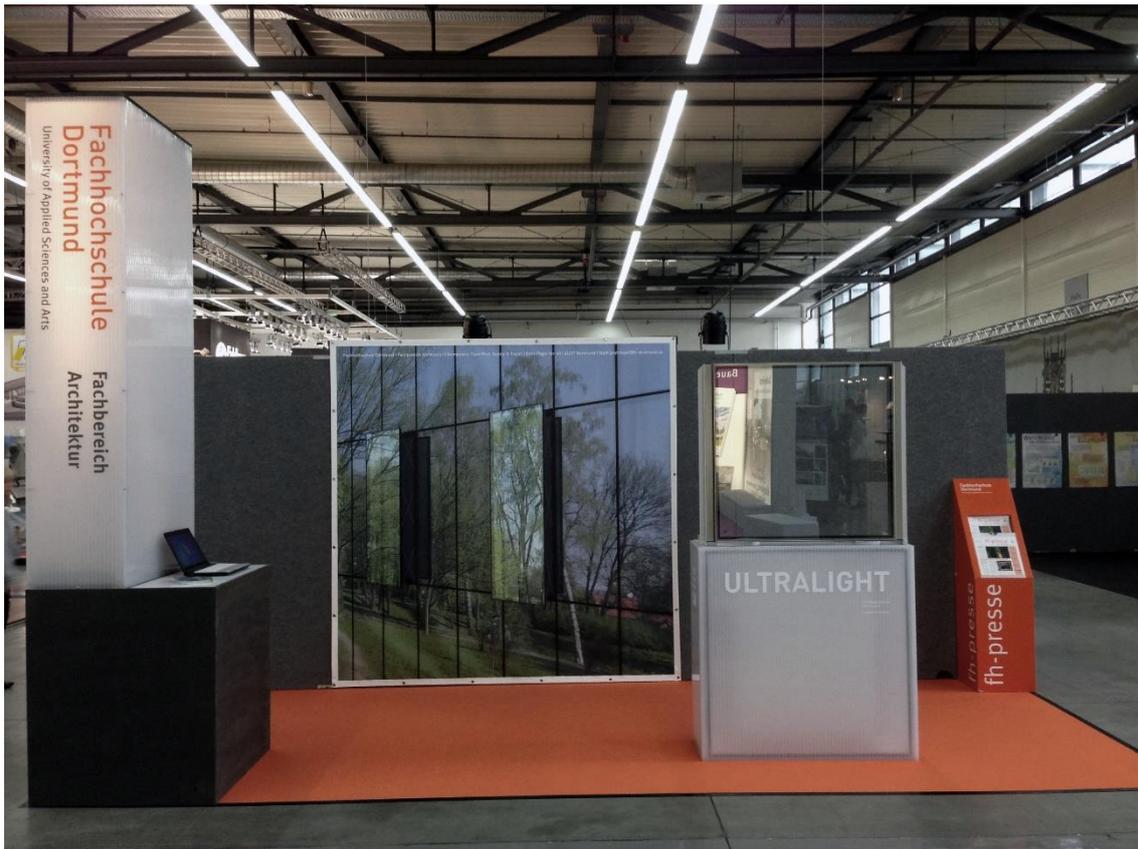


Abb. 10.3 ULTRALIGHT-Neubau auf der „Bauen und Wohnen 2015“ in Münster.

11 Literatur

Normen und Richtlinien

- [1] SCHETTLER-KÖHLER, H.P.: Die neue Energieeinsparverordnung
2. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin Wien Zürich 2014
- [2] DIN 1055-4: 2005-03 Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten
- [3] DIN 4108-2: 2013-02 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2:
Mindestanforderungen an den Wärmeschutz
- [4] DIN 4108-3:2014-11 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3:
Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise
für Planung und Ausführung
- [5] DIN 68121-1: 1993-09 Holzprofile für Fenster und Fenstertüren; Maße,
Qualitätsanforderungen
- [6] DIN EN 12207:2000-06 Fenster und Türen - Luftdurchlässigkeit - Klassifizierung
- [7] DIN EN 12208:2000-06 Fenster und Türen - Schlagregendichtheit - Klassifizierung
- [8] DIN EN 12210:2013-04 Fenster und Türen - Widerstandsfähigkeit bei Windlast -
Klassifizierung
- [9] DIN EN ISO 13788:2013-05 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen
und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer
Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren
- [10] DIN EN ISO 10077-1:2010-05 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und
Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 1: Allgemeines
- [11] DIN EN ISO 10077-2:2012-06 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und
Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 2: Numerisches
Verfahren für Rahmen
- [12] DIN EN ISO 6946:2008-04 Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und
Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren

Auswahl relevanter Veröffentlichungen von Herrn Prof. Armin D. Rogall

- [13] Bauwesen der Zukunft, neue Technologien
Nachhaltige Wirtschaft, ökologisch, ökonomisch und sozial.
15. Veyhl-Meeting, Veyhl 24.09.2009
- [14] Technologien und Innovationen in Bauwesen. Zukunftstechnologien in der Gegenwart.
Innovationsforum FUCON Stuttgart 14.05.2009

- [15] Bauwesen der Zukunft, neue Technologien
Nachhaltige Wirtschaft, ökologisch, ökonomisch und sozial.
15. Veyhl-Meeting, Veyhl 24.09.2009
- [16] Kunststoffprodukte am Bau, Verwendung und Verwertung.
Experten Workshop BBR, Bonn 11.11.2009
- [17] Bauen mit faserverstärkten Kunststoffen. Aktuelle Forschungsergebnisse.
Workshop der Forschungsinitiative ZukunftBau des Bundesministeriums für Verkehr,
Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Düsseldorf 09.08.2010
- [18] Innovationen in der Fenster- und Fassadentechnik. Profile aus GFK.
Forum „Intelligentes Bauen“, Internationale Baumesse BAU 2011 München 18.01.2011
- [19] Energieeffiziente Sanierung im Wohngebäudebestand
Forschungsbericht 2011 FH Dortmund, 19.12.2011
- [20] Zukunftstechnologien – schon heute nutzbar
Forschungsinitiative ZukunftBau, Baufachmesse DEUBAU 2012, Essen 12.01.2012
- [21] Architektur der Zukunft: zu wenig | zu viel | zu kompliziert
Detail research Round Table & Symposium „Ressourceneffizienz: Material & Produkte“.
ILEK der Universität Stuttgart, 19.07.2012
- [22] Manipulation Architektur - die II. Energiewende.
Forum „The Future of Building“, Internationale Baumesse BAU 2013, München
18.01.2013
- [23] Ressourceneffizienz gestalten.
Forum „Zukunft Bau - Praxis Altbau“, Internationale Baumesse BAU 2013, München
19.01.2013

Auswahl anderer relevanter Veröffentlichungen zum Thema Vakuumglas:

- [24] PILKINGTON DEUTSCHLAND AG: Pilkington Spacia Vakuumverglasung
Produktinformation, Stand 2014
- [25] PILKINGTON DEUTSCHLAND AG: unveröffentlichte Kommunikation
- [26] BEIJING SYNERGY VACUUM GLAZING TECHNOLOGY CO., LTD.: World Pioneer of
Vacuum Glazing. Produktinformation, Stand 2015
- [27] COLLINS, R.E.; FISCHER-CRIPPS, A.C.; TANG, J.-Z.: Transparent evacuated insulation
In: Solar Energy 49 (5), S. 333–350, 1992
- [28] SIMKO, T.M.; BECK, F.A., COLLINS, R.E., ARASTEH, D.: Edge conduction in vacuum
glazing. In: THERMAL ENVELOPES VI (Heat Transfer in Fenestration II - Principles), S.
601–611, 1994
- [29] GLASER, SIEGFRIED ET AL.: Vakuum-Isolierglas (VIG) / Forschungsbericht BMWi,
Projektträger PtJ, Förderkennzeichen 0327366 A bis G, 2007
- [30] GLASER, SIEGFRIED ET AL.: Hochwärmedämmende Fenster- und Fassadensysteme
(HWFF) / Forschungsbericht BMWi, Projektträger PtJ, Förderkennzeichen 0327654
Abis H, 2011
- [31] GLASER, SIEGFRIED ET AL.: Produktionstechniken für Vakuum-Isolierglas (ProVIG) /
Forschungsbericht BMWi, Projektträger PtJ, Förderkennzeichen 0327419 A bis G, 2012
- [32] HOHENSTEIN, HELMUT: Market Study of the Global Vacuum Glass Status in Practise /
Marktstudie, Marl 2014