

Vakuumglas-Kastenfenster: Performance-Monitoring in Sanierungsprojekten

VAMOS

U. Pont, M. Schuss,
M. Wölzl, P. Schober,
K. Hauer, J. Haberl, Ch. Lux

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

29/2023

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Vakuumglas-Kastenfenster: Performance-Monitoring in Sanierungsprojekten

VAMOS

Senior Scientist Dipl.Ing. Dr.techn. Ulrich Pont,
Assoc. Prof. DDI. Dr.techn. Matthias Schuss,
Univ.Ass. Dipl.Ing. Magdalena Wölzl, BSc.
Technische Universität Wien

Dipl. (Htl) Ing. Peter Schober, DI (FH) Karin Hauer,
Ing. Jakob Haberl, Dr. Christian Lux
Holzforschung Austria

Wien, September 2022

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	9
2	Abstract	11
3	Ausgangslage	13
	3.1. Grundlegende Motivation	13
	3.2. Das Kastenfenster	16
	3.3. Einordnung des Projektes VAMOS in den Kanon von F&E-Projekten zu Vakuumglasfenstern 20	
4	Projekthalt	22
	4.1. Grundlegenden Fragestellungen im Projekt VAMOS.....	22
	4.2. Das Projektkonsortium	23
	4.3. Methodik (Arbeitspaketbezogene Vorgangsweise).....	24
5	Ergebnisse	31
	5.1. Untersuchte Kastenfenster und Objekte	31
	5.1.1. Schloss Puchberg	32
	5.1.2. Villa Wassermann	35
	5.1.3. TU Wien	37
	5.1.4. Stift Wilhering.....	38
	5.1.5. Ursulinenplatz 4.....	40
	5.1.6. Amt der Tiroler Landesregierung.....	42
	5.2. Simulations-basiertes Testen virtueller Prototypen	44
	5.2.1. Eingabedaten	44
	5.2.2. (Ergebnis-)Indikatoren.....	46
	5.2.3. Durchgeführte Wärmebrückensimulationen	47
	5.3. Labortests physischer Prototypen (Gebrauchstauglichkeitstests)	51
	5.3.1. Bedienkräfte, Luftdurchlässigkeit, Schlagregendichtheit und Windwiderstandsfähigkeit.....	51
	5.3.2. Schallschutz	55
	5.3.3. Stoßfestigkeit.....	85
	5.3.4. Einbruchhemmung	93
	5.3.5. Vakuumglas im Differenzklima	98
	5.4. Performance Monitoring der Kastenfenster unter realen Bedingungen	108
	5.4.1. Übersicht des Monitoringsystems und der Testobjekte	108
	5.4.2. Ergebnisse des kontinuierlichen Monitorings	112
	5.5. Leitfaden	128
	5.5.1. Anwendungsfall 1: Vakuumglas im Außenflügel	128
	5.5.2. Anwendungsfall 2: Vakuumglas im Innenflügel	129
	5.5.3. Zusammenfassung: Vakuumglas im Außen- oder im Innenflügel?	131

6	Schlussfolgerungen	132
7	Ausblick und Empfehlungen	134
8	Verzeichnisse	135
9	Anhang	145
	9.1. Data Management Plan (DMP)	145

1 Kurzfassung

Das Projekt VAMOS (das Akronym steht für „Vakuumglas-Kastenfenster: Performance - Monitoring in Sanierungsprojekten“) befasst sich mit der Sanierung von Kastenfenstern mittels dem innovativen Glasprodukt Vakuumglas. Dazu wurden für unterschiedliche Kastenfenstertypologien (z.B. Pfostenstock-Kastenfenster, Leistenpfostenstock-Kastenfenster, Rahmenpfostenstock-Kastenfenster, Doppelrahmenstock-Kastenfenster) und unterschiedlich intensive Interventionsgrade (von „kosmetischen“, minimalinvasiven Maßnahmen bis zur kompletten Fensterrekonstruktion/Neuerrichtung) Sanierungsvarianten für Kastenfenster unter Verwendung von Vakuumglas konzipiert, mittels Labormessungen und Simulationsuntersuchungen evaluiert und optimiert, konstruiert und in realen Einbausituationen eingebaut, sowie einem detaillierten und umfassenden (Performance-) Monitoring unterzogen. Die hierbei observierten Aspekte waren die für die Bewertung der Fensterperformance wesentlichen Aspekte wie z.B. Oberflächentemperatur an kritischen Punkten, relative Luftfeuchtigkeit (und damit Kondensat-Neigung bzw. Taupunkte), sowie weitere objektive und subjektive Performancekriterien. Österreichweit (sowie im D-A-Ch-Bereich) handelt es sich mit diesen Maßnahmen und Bemühungen um die ersten, umfassend wissenschaftlich begleiteten Fenstersanierungs-Realisierungen / Demonstrationen mit Vakuumgläsern in (zum Teil denkmalnahen, d.h. baukulturell sensiblen) Bestandsobjekten bzw. Sanierungen.

Unter dem Begriff Vakuumgläser (bzw. Vakuumisolierverglas) versteht man landläufig zweischalige Glaskonstruktionen, die einen evakuierten Zwischenraum besitzen. Solche Gläser haben durch den weitestgehenden Entfall (bzw. Minimierung) der Wärmetransportmechanismen Wärmeleitung („Conduction“) und Konvektion („Convection“) eine ausgezeichnete thermische Performance (U_g -Werte von $0,4 - 0,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Jedoch erfordern solche Gläser durch ihre spezielle Konstruktionsform (Wärmebrücken durch Randverbund und Abstandhalter) beim Einsatz in Bestandskonstruktionen auch eine detaillierte Planung und Bewertung (z.B. Risikoabschätzung des Kondensationsrisikos). Im Sondierungsprojekt VIG-SYS-RENO (vergleiche Endbericht des FFG-Projektes Nr. 845225), welches die Basis dieses kooperativen F&E-Projekts darstellt, konnte die prinzipielle Anwendbarkeit von Vakuumgläsern in Kastenfenstern bewiesen werden, jedoch damals durch die zeitlichen und wirtschaftlichen Randbedingungen noch keine Umsetzung unter Realbedingungen bewerkstelligt werden. Gerade eine solche ist aber erforderlich, um letztlich über die wahren Potentiale und einzugehenden Risiken beim Einsatz von Vakuumgläsern entscheiden zu können.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Vorprojekten VIG-SYS-RENO, MOTIVE und FIVA wurden für unterschiedliche Kastenfenstertypen und unterschiedliche Einbausituationen zunächst Sanierungsvarianten konzipiert. Diese Konstruktionen wurden einer rigorosen Testreihe sowohl virtueller, wie auch physischer Natur unterzogen, um dann eine Entscheidung für einen entsprechenden Bau und einen entsprechenden Einbau zu treffen. Knackpunkte bei solchen Bemühungen sind unter anderem in der Frage kumuliert, ob die Vakuumgläser auf der Innen- oder auf der Außenseite des jeweiligen Kastenfensters zu montieren sind, bzw. wie die Rahmen-Geometrien und Anschlussdetails auszusehen haben. Diese Frage muss grundsätzlich vor dem Spiegel der architektonischen Erscheinungsform (die in den meisten Fällen als erhaltenswerte Priorität zu betrachten sein wird) und den Performance-Implicationen untersucht werden. Dies wurde für die im Projekt untersuchten und

modifizierten Fenster vorgenommen. Darüber hinaus wurden zahlreiche Testserien hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit und bauphysikalischer Performance (Hygrothermische Performance, Akustische Performance) durchgeführt.

Bei den Demonstrationen unter Realbedingungen wurden in sechs Gebäuden jeweils geeignete Fenster ausgewählt. In der Mehrzahl der Fälle wurden jeweils Test-Fenster (zumeist 2 mit unterschiedlicher Konfiguration des Vakuumglases innen bzw. außen) und Kontroll-Fenster (i.d.R. ein Fenster im Originalzustand ohne Modifikation) bestimmt, die alle mit weitestgehend identem, auf die jeweilige Situation zugeschnittenem Monitoring Equipment ausgestattet wurden. Die Modifikationen der Fenster waren sowohl in der Einsatzebene des Vakuumglases (Innen/Außenflügel) wie auch in den jeweiligen Randbedingungen (vorherrschendes Mikroklima, Nutzung der Räumlichkeiten, Einbausituation der Fenster, Typ des Kastenfensters) verschieden. In einem Fall wurden alle Fenster des Bauwerks durch einen Wunsch der Bauherren bei der tatsächlich stattfindenden Bauwerkssanierung mit einer Vakuumglasausstattung getauscht, so dass kein Kontrollfenster vorhanden war. Bei dem Monitoring wurden unterschiedliche Detaillierungsgrade durchgeführt (die als „Standard“ und „detailliert“ bezeichnet wurden). Um auch subjektive Einschätzungen und Beobachtungen zu erfassen, wurde auch auf andere Datenerfassungsmaßnahmen, wie dem Protokollführen hinsichtlich Auftretens von Kondensat, zurückgegriffen.

Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass trotz der – im Vergleich zu „neuen“, spezifisch auf die Charakteristika des Vakuumglases hin optimierte Fenster (vergleiche Endbericht des Forschungsprojektes FIVA unter www.nachhaltigwirtschaften.at) – nicht ganz optimalen bauphysikalischen Randbedingungen hinsichtlich Überdeckung der Wärmebrücke Glasrandverbund, es kaum zu negativen Einflüssen durch die Integration des Vakuumglases kommt. Vielmehr zeigt sich eine signifikante Reduktion des Wärmeverlustes durch das jeweilige Fenster. Es muss an dieser Stelle aber darauf hingewiesen werden, dass ein Einsatz der Vakuumgläser in Kastenfenstern allein schon durch die Vielzahl an Parametern (Material von Wand und Fenstergewände, Position der Flügel relativ zu Innen- und Außenoberfläche, Vorhandensein von Dichtungen oder nicht, unterschiedliche Temperatur- und Feuchtebelastungen durch verschiedene Außenklima sowie unterschiedliche Innenraumnutzungen, Vorhandensein von Heizsystemen, etc.) detailliert hochbautechnisch und baukonstruktiv mit entsprechendem Fachpersonal (Bauphysik, Holz- und Fensterbau, Tischlerhandwerk, Architekt) zu planen ist, um eine dauerhafte Konstruktion einerseits und stark reduzierte Wärmeverluste unter Beibehaltung der attraktiven Hochleistungskonstruktion „Kastenfenster“ andererseits sicherzustellen. Das Projekt hat gezeigt, dass Kastenfenster unter Verwendung von Vakuumglas zu wärmetechnisch guter Performance im Spiegel der Reduktion von Wärme und damit der Vermeidung von Emissionen und Energieverbrauch optimiert werden können. Die Ergebnisse des Projektes wurden in diesem Bericht, in zahlreichen Publikationen, sowie in einer rudimentären Entscheidungshilfe für interessierte Stakeholder zusammengestellt.

2 Abstract

The project VAMOS („Vakuumglas-Kastenfenster: Performance-Monitoring in Sanierungsprojekten“ which more or less corresponds in „Vacuumglas-Casement-Windows: Performance – Monitoring in building retrofit projects“) focused on the thermal retrofit of casement windows via implementation of vacuum glazing products. Toward this end, different casement window typologies, such as “Alt-Wiener-Kastenfenster” and “Wiener Kastenfenster” as well as different degrees of retrofit intervention were considered. These different degrees included minimal-invasive restoration but also ranged until total reconstruction and replacement of the old casement window by a facsimile. These different retrofit modes resulted in construction concepts, which were evaluated both virtually via building performance simulation tools and as full-scale mock-ups within laboratory test-beds. Moreover, the retrofitting approaches were applied to real casement windows of case study buildings, in part being of historic value due to their building history. The idea behind was to study the different retrofit concepts in real life buildings, and subjected to real-life conditions. To be able to evaluate the different retrofit concepts later on, the test sites were equipped with comprehensive monitoring equipment, tailored to capture performance data such as surface temperature at critical points, dry-bulb temperature indoor, in interstitial spaces, and outdoor, and levels of air humidity and thus dew point temperatures (to assess condensation risk). Moreover, subjective and objective performance criteria were collected utilizing comfort and condensation assessment by the building occupants. To the knowledge of the authors, this venture can be considered a pioneering one, given that no other casement window retrofit effort has been conducted so far that includes both the implementation of vacuum glazing products and accompanying scientific monitoring. Moreover, the present project might be also the first in Austria that implements vacuum glass panes in windows of historically relevant buildings and thus the sensitive building stock.

By vacuum glazing products regularly two parallel glass panes are understood that feature a small, evacuated interstitial gap, a vacuum tight edge seal, and a set of distance pillars to keep the parallel positioning of the panes against the air pressure from outside. Due to the minimizing of conductive and convective heat transfer, such glass products feature very good thermal insulation at very small system thickness. The U_g -values of such glass panes can be found to be between 0.4 and 0.6 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Due to the thermal bridges caused by the edge seal and the distance pillar grid, such glass products require an in-depth planning and evaluation (e.g. risk assessment toward condensation risk). In the previous exploratory project VIG-SYS-RENO, which also forms the basis of the present project, a proof of concept was delivered that illustrated the principle possibility and suitability of vacuum glass as mean of retrofit for casement windows. However, due to time and economic restraints of this project no real-life performance inquiry could be done at that time. However, such a real-life performance assessment is a crucial condition sine qua non to consider potential and risk of vacuum-glass based window retrofit.

Thus, building upon the findings of the previous projects VIG-SYS-RENO, MOTIVE, and FIVA, different casement window typologies and different construction specifics of casement windows were examined, and tailored retrofit solutions utilizing vacuum glass products were envisioned. These construction solutions were subjected to a rigorous series of test and analysis runs, both virtually via suitable simulation tools and physically via prototype testing in the laboratory. As a result, decisions toward the development of solutions for the specific

window typology could be made. Typical crucial aspects of such retrofit concepts encompass the question, if vacuum glass should be applied to the inner or the outer layer of the casement window system, or the question, how frame geometries and connection joints have to be designed. These questions need to be worked upon under consideration of the architectural appearance, which, in most cases, may not be affected by the implementation of vacuum glass or any other retrofit measure. Moreover, performance aspects pertaining to building physics need to be considered as well. These questions were answered for the case study windows within the project. Furthermore, a wide range of laboratory and simulation-assisted evaluations were conducted to explore performance aspects of the windows (e.g. air tightness, tightness against wind-driven rain, hygro-thermal performance, acoustics, etc...).

Six demonstration sites could be utilized for demonstration purposes. In all but one case, test windows (regularly two different vacuum-glass integrated windows) and control windows (regularly one non-modified window still equipped with the original window panes) were selected and subjected to monitoring. The monitoring equipment was tailored to the specific requirements of each situation. The test windows of the different sites showed variations in the improved layer and in the specific boundary conditions (microclimate outdoor conditions, usage of the rooms, wall-material and construction typology of the casement windows). In one case, no control window was available due to the client's wish to update all of the existing windows with vacuum-glass-equipped windows. The monitoring was conducted in different levels of detail, which were named "standard" and "detailed". Subjective aspects and observations by the occupants were additionally collected via a logbook for the specific windows. This aimed at thermal comfort assessment and observation of surface condensate on the windows.

The results of the project illustrate that – despite the non-optimal integration possibilities of the vacuum glass in the windows (regularly the edge seal cover was by far smaller than 40mm) in contrast to new window constructions as reported about in the project FIVA (see www.nachhaltigwirtschaften.at) – no negative effects could be monitored in most cases. In detail, no condensate could be found, if the window construction and mounting followed the correct principles. Rather, a significant reduction of heat losses through the specific window could be monitored. However, the integration of vacuum glass into casement windows required specific knowledge in the case studies of this project, and the same is true for any other casement window. Given the multitude of combinations of different construction parameters, such as size, indoor and outdoor conditions, position and material of windows, walls, and casement frame, it seems obvious that any retrofit planning should be accompanied by a detailed evaluation by domain experts on building construction and building physics, as well as by experts of window carpentry. This is a condition sine qua non to reach the goals of longevity, energy savings, and upkeep of architectural appearance.

The present project emphasized that vacuum glazing is a viable option for thermal retrofit of casement windows and might play an important role in reduction of energy demand and connected emissions of the building stock. The findings of the project have been published in this report, as well as in numerous scientific and non-scientific publications. Moreover, a rudimentary decision tree for interested stakeholders was created.

3 Ausgangslage

3.1. Grundlegende Motivation

Die im Zuge dieses Forschungsvorhabens durchgeführten F&E-Entwicklungsschritte basierten auf einer Reihe von Fragestellungen, Fakten und Observationen.

Jede Tätigkeit, die sich mit der Verbesserung von thermischen Eigenschaften von Bauteilen auseinandersetzt, hat – im zentraleuropäischen Kontext – heute den Hintergrund der Energieeinsparung, der Erhöhung des Nutzungskomforts und der Wirtschaftlichkeitssteigerung von Gebäudeerrichtung, -sanierung, und -betrieb. Was noch dazu kommt ist – im Spiegel der Ambitionen zu einer Transition von einer Linear-Wirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft – die Verlängerung von Nutzungszeiten, die Vermeidung von unnötigem Abfall und frühzeitige Obsoleszenz von eigentlich hochwertigen Wirtschaftsgütern.

Auch das Projekt VAMOS, dessen an die interessierte Öffentlichkeit gerichteter Endbericht durch dieses Dokument repräsentiert wird, wurde im Spiegel der Fragestellungen entwickelt und konzipiert, sowie nach Förderung durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG im Rahmen der 6. Ausschreibung des thematischen Programms Stadt der Zukunft, so durchgeführt.

Die ambitionierten Klimaziele, wie in zahlreichen internationalen Beschlussfassungen, wie beispielsweise in Paris 2015 (COP 21) grundsätzlich festgelegt und in Katowice 2018 (COP24), Madrid (COP25) und Glasgow (COP26) vertieft bzw. näher beschrieben (wie auch in anderen Initiativen und Protokollen wie z.B. Earth Summit, Rio de Janeiro 1992 oder Kyoto 1997 zuvor), erfordern sowohl Energieeinsparungen wie auch Emissionsreduktionen im Gebäudebereich. Tatsächlich wird heute davon ausgegangen, dass zwischen knapp 40% und 50% der globalen Energiekonsumation und damit verbundene Emissionen unmittelbar und mittelbar durch Gebäude verursacht werden. Eine Verbesserung der thermischen Hüllqualität der Gebäude erscheint hierzu ein geradezu logischer Schritt und wird deshalb auch seit langem in einschlägigen Richtlinien gefordert und verbindlich festgelegt. Dies fand bzw. findet auf europäischer Ebene in der EPBD (2010) (Europäische Gebäuderichtlinie von 2010, aktuell (d.h. seit 2018), bzw. zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Endberichts, in Überarbeitung) statt; In Österreich sind entsprechende Umsetzungen durch das Energieausweisvorlagegesetz von 2006 und 2012 (EAVG 2012) einerseits und durch die teilharmonisierten Bauvorschriften der österreichischen Bundesländer („Bauen ist Ländersache“) in Form der Richtlinien des österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB) andererseits implementiert (auch zuvor gab es schon individuelle, in den Bundesländern verschiedene Festlegungen, die seit der 1. Ölkrise von 1973 v.a. aus Geldeinsparungsgründen in den Bauordnungen und Bautechnikverordnungen implementiert waren). Zum Zeitpunkt des Verfassens des Projektantrags für VAMOS, Anfang 2019, galten noch die OIB-Richtlinien 2015; aktuell sind die OIB-Richtlinien aus dem April 2019 die gültigen. Für den Bereich Energieeinsparung und Wärmeschutz ist die OIB-Richtlinie 6 (OIB 2019) das maßgebliche Dokument.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt im Spiegel von Reduktion des Energieverbrauchs der gebauten Umwelt ist eine Analyse von Neubau- und Sanierungsraten. Im Zuge sehr geringer Neubauraten (sehr positive Schätzungen gehen von 1- 3% aus) ist es unumgänglich auch den

Gebäudebestand zu ertüchtigen, allein schon aus der Modellüberlegung heraus, dass eine fundamentale Reduktion des Energieverbrauchs alle Bauwerke sonst sehr lange dauern würde (nämlich bis der „Gebäudebestand“ – rein theoretisch – einmal komplett durch Neubauten ausgetauscht würde). Beim Literaturstudium zeigt sich jedoch, dass neben der Neubaurate auch eine recht geringe Sanierungsrate vorliegt und, dass viele von den Sanierungsmaßnahmen (Schätzungen gehen von 40% aus) lediglich der „Gebäudebehübschung“ dienen, ohne dabei wesentliche thermische Optimierung darzustellen (DENA 2013). Es versteht sich von selbst, dass in Anbetracht der zeitlichen Zyklen zwischen Sanierungen damit „vertane Chancen“ vorliegen, was umso verstörender erscheint, wenn man an die stringente Notwendigkeit einer Reduktion von Energieverbräuchen und damit verbundenen Treibhausgasemissionen denkt. Es besteht bei der Bauherrenschaft auch oftmals eine große Unsicherheit betreffend Sanierungen – vielfach wird wegen der organisatorischen und institutionellen Schwierigkeiten und Komplexitäten (z.B. Erhalt einer Förderung, oder Angst vor Schimmelbildung nach thermischer Ertüchtigung) und potentiell zu erwartender Probleme von innovativen Schritten Abstand genommen (DENA 2013). Die Sanierung von über Jahren bewährten tradierten Fensterkonstruktionen stellt hier wohl keine Ausnahme zu dieser Entwicklung dar.

An dieser Stelle sei auch auf den vermeintlichen Zielkonflikt zwischen „thermischer Ertüchtigung“ und „Erhalt baukulturellen Erbes“ hingewiesen. Die „trivialen“ Sanierungsmaßnahmen von Nachkriegsbauwerken mittels additiver Aufbringung von Wärmedämmung oder Tausch maroder Einfachfenster sind für den die europäischen Städte prägenden Altbestand, der vor 1918 errichtet wurde, nicht sinnvoll umsetzbar, bzw. gibt es hier sehr negative Erfahrungen, wie der Verlust des Fassadenschmucks vieler Gründerzeitbauten in der Nachkriegszeit. Im Zuge von solchen gutgemeinten, aber wohl kaum als gut zu wertenden Modifikationen sind bis heute viele Kastenfenster verlustig gegangen, die auf der einen Seite einen wesentlichen Teil des baukulturellen Erbes im Bestand ausmachen, auf der anderen Seite vermeintlich nicht geeignet sind, heutigen Anforderungen nach thermischem Komfort, Universal Design und Energieeinsparungen gerecht zu werden. Da es sich bei solchen Konstruktionen jedoch um über Jahrhunderte entwickelte Hochleistungskonstruktionen handelt, erscheint ein solches, abschließendes Urteil als unbefriedigend, noch dazu, wenn man feststellt, dass viele Kastenfenster hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit unter korrekter Wartung ohne signifikante Performance-Verschlechterung (des zugegebenermaßen im Falle von 2 x Floatglas in den Flügeln recht hohen Wärmedurchgangskoeffizienten) eine bessere „Lebenszyklusperformance“ als viele neuwertige Fensterkonstruktionen haben dürften. Generell – nicht nur im Bereich von Bestandsbauwerken – haftet dem Fenster noch immer die Aura des „Schwachpunktes“ in der Gebäudehülle an. Das hat auch damit zu tun, dass Berechnungen und Abschätzungen zeigen, dass in Wohngebäuden etwa 20 bis 30 % (ArchDaily 2019) des Energieverbrauches für Raumkonditionierung den Fenstern zugeschrieben werden (die aber oft nicht 20 bis 30 % an der Hüllfläche ausmachen). Schaut man sich die heutigen Mindestanforderungen an Hüllkonstruktionen in Österreich an (OIB 2019), kann man – genauso wie bei den „Default“-Werten für Bestandsbauwerke – feststellen, dass Fenster oftmals um den Faktor 2 bis 4 höhere Wärmedurchgangskoeffizienten aufweisen. Es erschließt sich daher, dass jede Verbesserung des Fenster-U-Wertes zu einer Reduktion von Energieverbrauch und Emissionen beitragen kann. Was soll man nun aber tun, wenn beim historischen Gebäudebestand eine Erhaltung unbedingt notwendig erscheint, aber keine wirklich geeigneten Maßnahmen zur Reduktion des Heizwärmebedarfs vorliegen.

Das Projekt VAMOS befasste sich – aufgrund dieser unbefriedigenden Situation - mit der Fortentwicklung von innovativen Sanierungsmethoden von Kastenfenstern mittels Vakuumgläsern. Dabei baute das Projekt auf einer vorangegangenen Sondierung (VIG-SYS-RENO, FFG-Projekt-No. 845.225, Endbericht verfügbar unter www.nachhaltigwirtschaften.at) sowie zwei weiteren Projekten – (MOTIVE FFG-Projekt-No.: 854.690, Endbericht verfügbar unter www.nachhaltigwirtschaften.at; und FIVA, FFG-Projekt-No. 867.352, Endbericht verfügbar unter www.nachhaltigwirtschaften.at) auf. Vakuumgläser, welche sich durch geringes Gewicht, ausgezeichneten Wärmeschutz ($0,4 - 0,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ als U_g -Wert) und sehr dünne Gesamtglasdicken/Systemdimensionen auszeichnen (6, 8 oder 10 mm, je nach statischen und schallschutztechnischen Anforderungen), wurden als Ausgangspunkt für Sanierungsinnovationen an Kastenfenstern herangezogen (Hohenstein und Heiduk 2016).

Zum Zeitpunkt der Antragstellung stellte dieses Forschungsvorhaben - nach dem Wissen der Autoren auch bis heute -, nämlich der Einsatz von Vakuumgläsern für die Ertüchtigung von Kastenfenstern unter rigoroser wissenschaftlicher Begleitung ein bislang einzigartiges Projekt dar. Vergleichbare Projekte sind und waren aus Literatur und aktueller Forschungsdokumentation von Entwicklungen im Vakuumglasbereich nicht ableitbar. Die TU-Wien und die Holzforschung Austria haben in Bezug auf die Konstruktion von Fenstern mit Vakuumglas damit auch international die Themenführerschaft übernommen (was das zum Teil große Interesse aus dem Ausland an den vorherigen Projekten unterstreicht). Die – im Projekt VAMOS beteiligten – KMUs (Klein- und Mittelunternehmen) der Fensterbranche aber auch die Vakuumglasindustrie nutzten das erarbeitete Know-How zur Entwicklung von neuen Konstruktionsansätzen. Es sei an dieser Stelle auch erwähnt, dass das Projekt explizit solche Klein- und Mittelbetriebe als potentielle Profiteure von Wissen über Vakuumglassanierungen von Kastenfenster adressierte. Das liegt zum einen daran, dass das Projektteam davon überzeugt ist, dass eine dauerhafte Erhaltung von baukulturellem Erbe nur durch Wissenszuwachs unter Einbeziehung der lokalen Wirtschaftstreibenden, die einen riesigen Stock an Know-How mitbringen, möglich ist, zum anderen darin, dass die „Reparatur, Wartung, und Ertüchtigung“ von Kastenfenstern im Spiegel der bereits erwähnten Kreislaufwirtschaft einen wünschenswerten Outcome darstellt.

Hinsichtlich der technischen Historie von Vakuumgläsern sei an dieser Stelle auf das Addendum zur Entwicklung von Vakuumglas zum Endbericht des Sondierungsprojektes VIG-SYS-RENO verwiesen (Pont et al. 2015). Eine umfassende Darstellung dieser Historie wird aus Gründen der Lesbarkeit in diesem Bericht nicht vorgenommen; Das vorliegende Projekt VAMOS befasste sich vor allem mit Applikation von Vakuumgläsern in (historischen Kasten-) Fensterkonstruktionen, daher wird auf eine erneute detaillierte Darstellung der (technologischen) Entwicklung von Vakuumgläsern verzichtet. Allerdings soll kurz das wesentliche hinsichtlich der Vakuumgläser und die aktuelle Marktsituation angesprochen werden.

Vakuumgläser weisen einen exzellenten Wärmeschutz in Folge des Vakuums (weitgehende Eliminierung von konvektiven und konduktiven (wärmeleitungs-) Prozessen im evakuierten Zwischenraum) auf. Um dies auch dauerhaft zu gewährleisten, besteht gleichwohl die Erfordernisse nach einem dichten Randverbund, Abstandhaltern (Pillars) und Gettern bzw. Evakuierungsöffnungen. Eine detaillierte Abhandlung über Technologie und geschichtliche Entwicklung – wie bereits angesprochen - wurde im Rahmen des unmittelbaren Vorgängerprojektes, der Sondierung VIG-SYS-RENO verfasst (Hohenstein und Heiduk 2016). Ein für dieses Projekt wesentlicher Aspekt soll aber kurz erwähnt werden – auch weil er in der genannten Publikation in Folge der Aktualität nicht enthalten ist: Der oftmals geäußerte

Kritikpunkt, Vakuumgläser seien nur aus Übersee (d.h. im Detail aus den asiatischen Ländern China, Südkorea und Japan) oder USA erhältlich, kann als nicht mehr zutreffend bezeichnet werden, da die Firma AGC Interpane – einer der weltweit größten Flachglashersteller – eine Vakuumglasproduktion in Belgien etablierte, die langsam im Jahre 2019 (2. Quartal) anlief und seit 2020 im deutschsprachigen Raum verfügbar ist (Baulinks.de 2020). AGC konnte für VAMOS als Partner gewonnen werden. Parallel ist die Produktion der Fa. Synergy in China durch verschiedene wirtschaftliche Probleme ausgesetzt worden. Zur besseren Illustration seien nachstehend kurz die Gläser von Synergy (von VIG-SYS-RENO) und der AGC Interpane (wie bei der Messe Bau 2019 gezeigt) dargestellt. Neben den unterschiedlichen Produktionsstandorten sind doch einige Unterschiede zwischen diesen Glasprodukten ausmachbar, wie z.B. die linienförmige Ausführung des Getters bei den Interpane-Gläsern gegenüber dem doch relativ prominenten Getterpunkt bei den Synergy-Gläsern („Getter“ dienen zum „Einfangen“ etwaig verbliebener Moleküle im evakuierten Bereich). In der nachstehenden Abbildung sind auch zwei weitere aktuelle Vakuumglasprojekte, nämlich von den Firmen EAGON aus Korea und von GUARDIAN aus den USA gezeigt. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die in Abbildung 1 gezeigten Abbildungen nicht aus den offiziellen technischen Katalogen oder Werbeschaltungen stammen und auch bei allen der genannten Hersteller eine laufende Fortentwicklung der Gläser im Gange ist. Grundsätzlich kann über die vier gezeigten Gläser folgendes festgehalten werden: U_g -Werte zwischen $0,47 - 0,70 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$; Pillarabstände zwischen 20 und 40 mm, Randverbund-Breite zwischen 5 und 10 mm, Getter in Punkt (Durchmesser 14 bis 18mm) oder Linienform (2mm breit, randparallel).

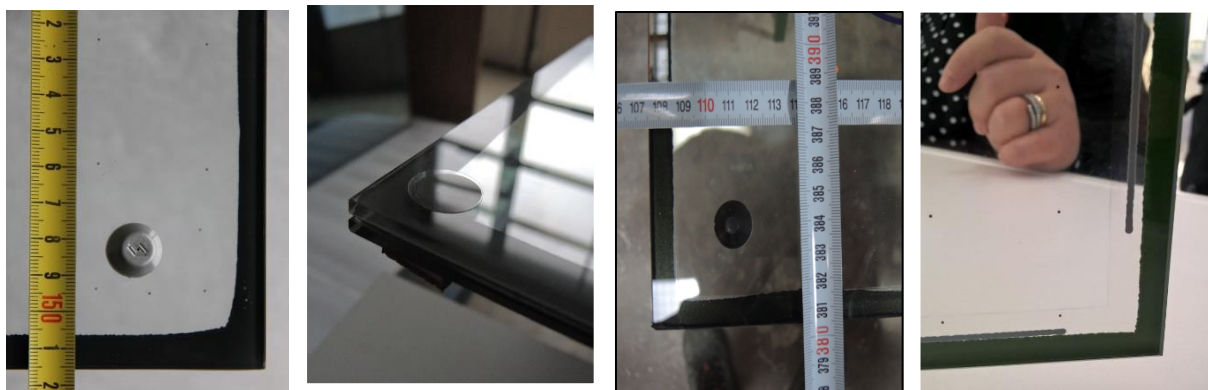


Abbildung 1: Vakuumglasprodukte verschiedener Firmen, die sich hinsichtlich U_g -Wert, dem Material und der Ausgestaltung des Randverbundes, der Evakuierungsöffnung und dem „Getter“ (dem Fänger verbliebener Partikel im Vakuumspalt), sowie der Art, Ausgestaltung und Distanz des Rasters von Abstandhaltern („Pillar“) unterscheiden.

3.2. Das Kastenfenster

Die in diesem Forschungsprojekt zentral behandelten Kastenfenster stellen ein wesentliches Bauelement im historischen Gebäudebestand Zentraleuropas dar. Kastenfenster wurden in unterschiedlichster Konstruktions-Form bis in die 1950er in großer Menge verbaut und lange Zeit als Stand der Technik hinsichtlich (wärmedämmender) Fenstertechnologie betrachtet, bis sie durch das Aufkommen von Mehrscheibenverglasungen und damit ausgestatteten Fenstern (Zweifach und viel später Dreifachverglasungen) allmählich an Bedeutung verloren. Der heutige Gebäudebestand, beispielsweise in Wien, weist einen großen Anteil von Bauwerken auf, die bis 1918 errichtet wurden, und bei einer Vielzahl dieser Gebäude sind – genauso wie bei vielen Bauwerken des roten Wiens der 1920er und 1930er Jahre – Kastenfenster auch heute noch vorhanden. Vorsichtige Schätzungen gehen von mehreren hunderttausend

Kastenfenstern, die potentiell sanierungsbedürftig wären, alleine in Wien aus (Oettl 2011). Bedenkt man, dass in anderen österreichischen Städten, sowie im nahen Umland (Deutschland, Tschechische Republik, Slowakei, ...) ähnliche gründerzeitliche Bausubstanz in durchaus großen Städten vorhanden ist, kann leicht nachvollzogen werden, dass diese Zahl sich auf mehrere Millionen - zum Teil wohl sanierungsbedürftiger - Kastenfenster erhöht.

Bernard et al. haben 2014 im Auftrag der Stadtentwicklung in Wien (Magistratsabteilung 18) „Wiener Fenster“ untersucht und betonen hierbei die Bedeutung der Kastenfenster nicht nur bei Bauwerken deren reicher Fassadenschmuck sich bis in die Jetztzeit erhalten hat, sondern auch deren Bedeutung in schlichten (oder im Zuge der Ornamentik-Vernichtung der Kriegs- und Nachkriegsjahre schlicht gemachten) Fassaden. In der Publikation werden die zahlreichen Vorteile der Kastenfenster dargestellt, nämlich die hohe Lebensdauer von Kastenfensterkonstruktionen, ihre kostentechnischen Implikationen, der durchaus nicht geringe Schallschutz, der Wärmeschutz durch die eingeschlossene Luftschicht, Aspekte der Lüftung, Kondensat-Schutz (im Bereich des Wandanschlusses), die relativ einfache Bedienung/Bedienbarkeit, der gute Lichteinfall, Aspekte des Umweltschutzes (verwendete Materialien sind in der Regel Glas, Holz, Fensterkitt und Leinöl, welche als ökologisch verträglich gelten), sowie nicht zuletzt die optische Wirkung der Kastenfenster. Weiters werden Beispiele der Sanierung von Kastenfenstern unter deren thermischer Ertüchtigung gezeigt: Bei den gezeigten Maßnahmen handelt es sich aber durch die Bank um doch gröbere Eingriffe, wie z.B. Einbringung eines Isolierglasfensters als Ersatz für den Innenflügel, Profilverbreiterungen, Veränderung der Öffnungsrichtung (!) bei Altwiener Kastenfenstern oder auch Veränderungen der Positionierung der Flügelebenen in der Nische oder der Laibung.

In einer Publikation „Energieeffizienz am Baudenkmal“ des Bundesdenkmalamts (Bundesdenkmalamt 2011) wird relativ streng über Sanierungsmaßnahmen von Fenstern anhand eines „Ampelsystems“ (grüne Maßnahmen - erlaubt, gelbe Maßnahmen – unter Umständen erlaubt, rote Maßnahmen – nicht erlaubt) geurteilt. Die restauratorische Instandsetzung wird als grün bewertet, während jegliche zusätzliche Maßnahmen mit zunehmender „Bedenklichkeit“ assoziiert werden: Die Abdichtung von Fenstern mit Dichtungsmaterialien und die Optimierung des Fensterglases durch nachträgliche Folien oder beschichtete Gläser wird als leicht bedenklich angesehen. Die Einbringung von Isoliergläsern in Bestandsfenster wird hingegen als explizit nur im Ausnahmefall gestattete, grundsätzlich unerwünschter, die historische Substanz signifikant negativ beeinflussender Eingriff betrachtet, und sogar kritischer als die Einführung einer zusätzlichen Fensterebene bewertet. Ein „No-Go“ ist der Komplett-Austausch des historischen Fensters, welcher nur bei irreparablen Schäden oder bereits zuvor nachteilig veränderten Fenstern ausnahmsweise durch einen adäquaten Nachbau gestattet ist. Auch in der jüngst erschienenen Nachfolgepublikation (Bundesdenkmalamt 2021) wird hinsichtlich der Fenster ein Austausch bzw. eine starke Veränderung am Bestand höchst kritisch gesehen. Wörtlich heißt es:

„Soweit denkmalfachliche Belange keine Rolle spielen, d. h. kein Schutzstatus besteht, werden Fenster bei Bestandssanierungen oftmals als Verschleißteile behandelt. Für eine denkmalgerechte Vorgangsweise bei einer thermischen Optimierung am Baudenkmal steht jedoch die Steigerung des Leistungsvermögens der historischen bzw. bauzeitlichen Fenster im Vordergrund (Schließgenauigkeit, Abdichtung, Oberflächenbeschichtung, Wasserführung). Zur Verringerung des Wärmeverlustes besteht bei industriell hergestellten Verglasungen die Möglichkeit, diese mit reflektierenden Folien zu versehen oder durch

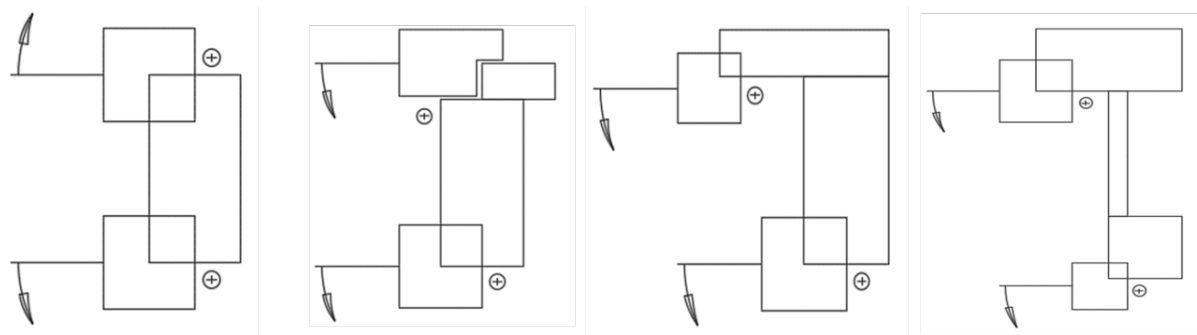
beschichtete Einfachgläser zu ersetzen. Bei Einfachfenstern kann gegebenenfalls eine zusätzliche Fensterebene eingebaut werden, wenn Fensterlaibungen, Innenraumgestaltungen etc. dafür geeignet erscheinen. Ein Wechsel zu Isoliergläsern (Wärmeschutzverglasung) bzw. die Erneuerung von Fensterelementen führt zu gravierenden Veränderungen und ist am Baudenkmal nur im Ausnahmefall möglich.“

Trotz dieser strengen Empfehlungen des Bundesdenkmalamts gibt es durchaus Tendenzen, einschaligen Fensterersatz für Kastenfenster für die Sanierung von gründerzeitlichen Bauwerken zu entwickeln und anzuwenden. Die im Zuge der Gründerzeit plus Initiative durchgeführte Forschungsbemühung Gründerzeit-Fenster- und Fassadenelement (Oettl 2011) sieht vielfach statt der mehrschaligen Kastenfensterkonstruktion einschalige Fenster als adäquate Sanierungsform an. Die damit in der Regel verschlechterte Optik, Einbußen im schalltechnischen Verhalten, die entstehenden Wärmebrückenwirkungen im Bauanschlussbereich, sowie die nachdrückliche Schädigung des baukulturell wertvollen Gebäudebestands wird dabei wohl auch aus Mangel an Alternativen in Kauf genommen.

Wesentliche Informationskonvolute zu Kastenfenster finden sich in der facheinschlägigen Hochbauliteratur, beispielsweise in den Schriften von Pech et al. (2005) oder Gamerith (Hrsg., 2005). Hier wird allerdings vor allem Typologie dargestellt und weniger auf Sanierungsmöglichkeiten eingegangen. Tatsächlich kann anhand der bestehenden Literatur darauf geschlossen werden, dass entsprechende, denkmalgerechte thermische Ertüchtigung mit den üblichen und bis dato zur Verfügung stehenden Technologien eine gewisse Unmöglichkeit darstellt(e).

Kastenfenster wurden mehr als 150 Jahre lang gebaut und bewähren sich heute noch, bzw. gelten sogar in Bezug auf den Schallschutz als äußerst hochwertige Konstruktionen. In modernen Ausprägungen stellen sie einen sehr, wenn nicht den leistungsfähigsten Fenstertypus dar.

Durch den langen Entwicklungs- und Nutzungszyklus haben sich eine Vielzahl von Konstruktionstypen herausgebildet, um den jeweiligen aktuellen Nutzeranforderungen gerecht zu werden. Der Begriff Kastenfenster stellt also einen Sammelbegriff für unterschiedlichste Ausformungen dar wie z.B. nach außen oder innen öffnend. Es wird in die wesentlichen Konstruktionstypen Pfostenstock-Kastenfenster (auch Altwiener oder Grazer Kastenfenster), Leistenpfostenstock-Kastenfenster (auch Wiener Kastenfenster), Rahmenpfostenstock-Kastenfenster und Doppelrahmenstock-Kastenfenster (siehe Abbildung 2) sowie diversen Untertypen unterschieden.



Pfostenstock-Kastenfenster, Leistenpfostenstock-Kastenfenster, Rahmenpfostenstock-Kastenfenster, Doppelrahmenstock-Kastenfenster

Abbildung 2: Beispiele unterschiedlicher Kastenfenstertypen (eigene Darstellung HFA / Svoboda)

Im Rahmen des Projektes gilt es für die unterschiedlichsten Kastenfenstertypen und deren Einbauvarianten Lösungsansätze zu finden, die die technische Performance derselben wesentlich verbessern.

Aus dem bisher in diesem Kapitel beschriebenen lässt sich ein großer Bedarf an weiteren und innovativen Fenstersanierungsmöglichkeiten für Kastenfenster ableiten: Im historischen Gebäudebestand gründerzeitlicher, aber zum Teil auch früherer (Barockhäuser) und späterer (bis in die Zwischenkriegs und Nachkriegszeit) urbaner Strukturen können in ganz Zentraleuropa viele verschiedene Kastenfenstervarianten gefunden werden, welche fundamental zum Erscheinungsbild der Bauten und damit der Städte beitragen. Hierbei wird oftmals das schlanke Erscheinungsbild, die gezielte Profilierung und die schlanken Rahmenansichten als Merkmal angeführt (Oetl et al. 2011). Allein in Wien schätzen Oetl et al. (2011) den Bestand an gründerzeitlichen Fenstern, welche einer Sanierung zuführbar wären in einer vorsichtigen Schätzung auf mehr als 500.000 Stück (bei Gesamtzahlen von bis zu 1.95 Millionen solcher gründerzeitlichen Fenster).

Kastenfenster, welche in Innen- und Außenflügel mit Floatgläsern ausgestattet sind, werden in der Literatur unterschiedliche UW-Werte (das ist der U-Wert des Fensters, welcher sich aus dem U-Wert des Glases U_G und des Rahmens U_F sowie entsprechenden, v.a. linearen Wärmebrückenzuschlägen zusammensetzt) bescheinigt: Im Folder zu Wiener Kastenfenstern 2,2 – 2,6 $W.m^{-2}.K^{-1}$ (MA19 2010); In Pech et al. (2005) werden Werte von 1,8 bis 2,3 $W.m^{-2}.K^{-1}$ angeführt. Das läuft etwa d'accord zu den in den Berechnungsrichtlinien des OIB (OIB 2015, OIB 2019) angegebenen Defaultwerten für Bauteile des historischen Gebäudebestands: Hier wird für alte (Bestands-) Fenstern bis etwa Baujahr 1960 ein U-Wert von 2,5 $W.m^{-2}.K^{-1}$ als Berechnungsdefaultwert vorgeschlagen. Die heutige Mindestanforderung für neue Fenster bzw. Fenster im Neubau ist ein U-Wert von 1,4 $W.m^{-2}.K^{-1}$, welcher in einer Kastenfenstersanierung mit Floatglas kaum zu erreichen ist, mit Vakuumglas aber ohne größere Veränderung der Fenstererscheinung erreichbar erscheint. In VIG-SYS-RENO, publiziert beispielsweise in Proskurnina et al. (2016a) und Proskurnina et al. (2016b), konnte rechnerisch ein U-Wert von unter 1,1 $W.m^{-2}.K^{-1}$ durch Ersatz einer 4mm Float-Glas-Scheibe durch eine 6,15 mm starke Vakuumglasscheibe in einer Flügelebene ermittelt werden. Daraus ergab sich hinsichtlich des Impacts auf KPIs (Key Performance Indikatoren) des Energieausweises die folgende Faustformel (rechnerisch für eine Anzahl an Gründerzeitbauten durchgeführt und nachgewiesen): Die prozentuale Reduktion des Heizwärmebedarfs durch Ertüchtigung der bestehenden Kastenfenster mit Vakuumglas in einer Flügelebene entspricht dem prozentualen Flächenanteil der Fenster an der Fassade.

Die Erhaltung bzw. das Attraktivieren der Sanierung des Kastenfensters statt Austausch durch neue Isolierglasfenster kann mit einer Vielzahl von Argumenten belegt werden: Neben der Erscheinungsform des Bauwerks im Sinne des baukulturellen und Stadtbild gestalterischen Charakters spricht auch die schalltechnische Performance für Kastenfenster, handelt es sich doch gewissermaßen um den Prototyp der schalltechnisch sehr guten Doppelfassadenidee (zwei voneinander entkoppelte Glas/Fensterflügelebenen). Hier sei auf die Möglichkeiten und Notwendigkeiten der natürlichen Lüftung bei gutem Schallschutz hingewiesen, der im LEIseWAND Projekt (siehe Endbericht dieses FFG-Projektes mit der Nummer: 845179, verfügbar via www.nachhaltigwirtschaften.at) an der Abteilung Bauphysik und Bauökologie nachgewiesen wurde: Die Prinzipien sind leicht auf Kastenfensterkonstruktionen applizierbar und dürfen in der Konstruktionsgeschichte durchaus auch eine Rolle gespielt haben. Ein weiteres Argument ist die Möglichkeit der Anbringung von Sonnen/Blendschutz oder auf Anti-Einbruchselementen (Gittern) im Zwischenraum zwischen den beiden Flügelebenen; diese

Elemente sind damit vor Wind- und Wetter geschützt und performen immer noch besser als z.B. innenseitig angebrachte Sonnenschutzsysteme.

3.3. Einordnung des Projektes VAMOS in den Kanon von F&E-Projekten zu Vakuumglasfenstern

Der Forschungsbereich Bauphysik und Bauökologie (TU-Wien) und die Holzforschung Austria (HFA), die die wissenschaftlichen Partner im Projekt VAMOS darstellen, haben zum Thema der Applikation von Vakuumgläsern in Fensterkonstruktionen in der Vergangenheit drei vorrausgehende Forschungs- und Entwicklungsprojekte durchgeführt. Diese dienten dem gegenständlichen Projekt zum Teil als unmittelbare Vorarbeit (Projekt VIG-SYS-RENO, Pont et al. 2015) bzw. können als informatorisch ergänzend und abgrenzend verstanden werden (Projekte MOTIVE, Pont et al. 2017 und FIVA, Pont et al. 2020a). Nachstehend werden kurz die jeweiligen Foci dieser Projekte erläutert. Darüber hinaus erläutert die nachstehende Abbildung 3 die Forschungslandschaft im Bereich Fenster für Vakuumgläser.

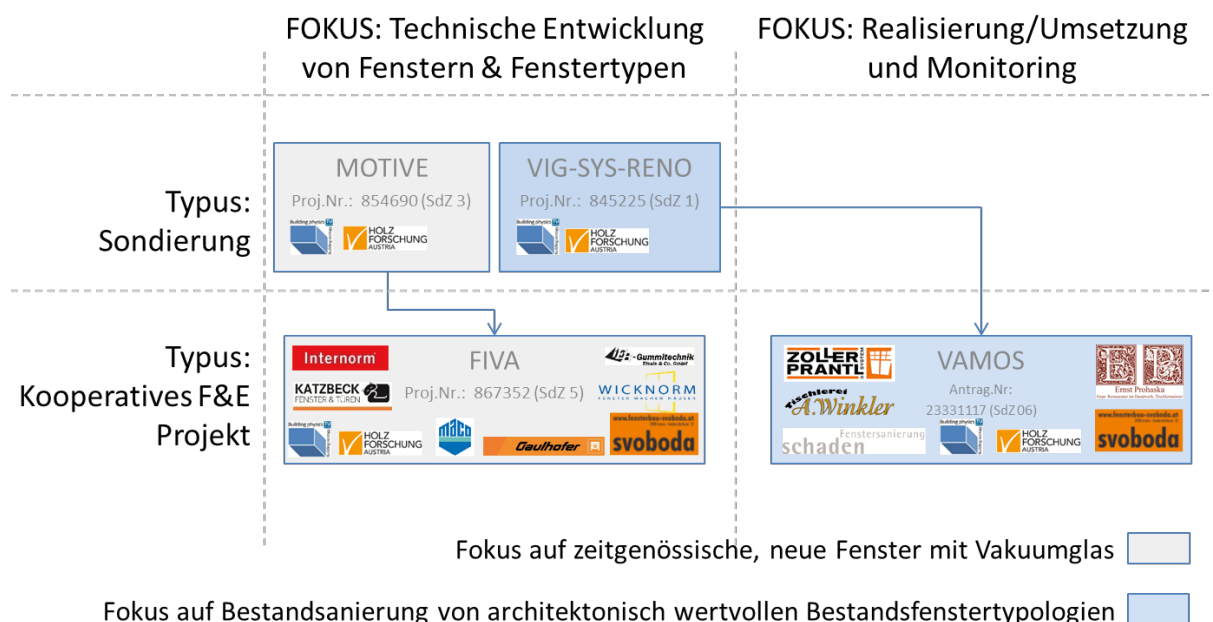


Abbildung 3: Forschungslandschaft zum Thema Vakuumglas

Das Sondierungsprojekt **VIG-SYS-RENO** (FFG-No. 845225, einzuordnen in den Technology-Readiness Level-Systematik als TRLs 1 bis 4, vgl. hierzu <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2012:0341:FIN:EN:PDF>), war die erste eingehende Befassung mit Vakuumgläsern in der österreichischen Forschungslandschaft im Bereich Bau und hat prinzipielle und strategische Grundsatzfragen für Vakuumgläser als Glasmaterial für die Bestandssanierung geklärt. Dabei konnte die Marktreife (sowie Dauerhaftigkeit) von Vakuumgläsern nach Tests festgestellt werden und die prinzipielle Möglichkeit des Einsatzes solcher Gläser bei der Sanierung von historischen Kastenfenstern nachgewiesen werden. Das Projekt zeigte aber auch deutlich, dass den Spezifika von Vakuumglas bei Fensterkonstruktionen in besonderem Maße Augenmerk geschenkt werden muss, um auf der einen Seite das volle Potential hinsichtlich Energieeinsparung und Wärmeschutz ausschöpfen zu können, auf der anderen Seite möglichen Schwachpunkten (Oberflächen-Kondensatneigung im Randbereich bzw. an der Schnittstelle zwischen Glas,

Flügel, Rahmen/Stock und Wand, prinzipielle Positionierung von Vakuumglas in der mehr-Ebenen-Konstruktion von Kastenfenstern, Integration von Dichtungssystemen in die Sanierungsplanung, Erreichung entsprechenden Schallschutzes) entsprechend konstruktiv zu begegnen. Dieses vorangegangene Forschungsprojekt bildet als Sondierung den Ausgangspunkt für die Bemühungen, die in VAMOS durchgeführt wurden: Tatsächlich sind zahlreiche Fragen aufgetreten, die sich nur durch Studien an in realen Objekten einzubauenden Fenstern bzw. Kastenfenstersanierungen beantworten ließen. VIG-SYS-RENO wurde in den Jahren 2014 und 2015 durchgeführt, der Endbericht liegt als Publikation online öffentlich auf ([VIG-SYS-RENO](#), FFG-Projekt-No. 845.225, Endbericht verfügbar unter [www.nachhaltigwirtschaften.at](#), Direktlink: [shorturl.at/vDL14](#)).

Das zeitlich VIG-SYS-RENO nachfolgende Sondierungsprojekt **MOTIVE** (FFG-No. 854690, TRL-Levels 2 - 5) befasste sich kontrastierend mit der Integration von hoch effizienten Vakuumgläsern in zeitgemäße Fensterkonstruktionen. Im Rahmen des Projektes konnte prinzipiell aufgezeigt werden, dass mit den extrem dünnen und (im Vergleich zu herkömmlichen Isoliergläsern) leichteren Vakuumgläsern Fenster mit thermischem Passivhausstandard möglich sind, aber grundsätzlich andere Lösungsansätze als bisher verfolgt werden müssen. Im Zuge des Projektes konnten Konzepte, Skizzen, Handmuster und erste Illustrations-Prototypen erarbeitet werden. Aufgrund der Neuheit der Konstruktionen und fehlender Komponenten (z.B. Beschläge, Antriebe, Dichtungen) waren diese Prototypen lediglich zur Potentialabschätzung konzeptioniert. MOTIVE wurde in den Jahren 2016 und 2017 durchgeführt, der Endbericht liegt als Publikation online öffentlich auf ([MOTIVE](#) FFG-Projekt-No.: 854.690, Endbericht verfügbar unter [www.nachhaltigwirtschaften.at](#); Direkt-Link: [shorturl.at/eqQV4](#)).

Basierend auf den Entwicklungen aus MOTIVE wurde ein Folgeprojekt namens **FIVA** (Fensterprototypen mit integriertem Vakuumglas, FFG-No. 867352), welches gemeinsam mit namhaften Wirtschaftspartnern durchgeführt wurde, konzipiert. Die Zielsetzung dieser kooperativen F&E-Bemühungen war das Erstellen voll funktionstüchtiger, neuer Fensterprototypen auf einem bereits relativ technisch ausgereiften Level (TRLs 5 bis 6 bzw im Ansatz bis 7). Tatsächlich konnten vier marktnahe, innovative Fensterkonstruktionen entwickelt, ausführlich virtuell und physisch getestet werden, sowie als Funktionsprototypen einem interessierten Fachpublikum vorgestellt werden. Die Einbeziehung großer Industrieunternehmungen, die im Bereich neue Fenster und Zulieferindustrie tätig sind, hat auch das Interesse von Seiten der wirtschaftstreibenden Stakeholder gezeigt. FIVA wurde in den Jahren 2018 bis 2020 durchgeführt, der Endbericht liegt als Publikation online öffentlich auf ([FIVA](#), FFG-Projekt-No. 867.352, Endbericht verfügbar unter [www.nachhaltigwirtschaften.at](#); Direkt-Link: [shorturl.at/oEHY4](#))

Das Projekt **VAMOS** schloss an VIG-SYS-RENO an und adressiert TRL-Levels bis 7 (Demonstration in operational environment). Das bedeutet, dass nun ausgewählte Bestandsfenstertypen mit Vakuumglas ausgestattet werden sollten und einer extensiven Beurteilung virtueller und modellhafter Natur (d.h. via Simulation, Berechnung und Laborversuchen unterschiedlicher thematischer Ausprägung) unterzogen werden sollten, sowie Demonstrationsfenster entworfen, gebaut und montiert und einer Langzeitobservation unter Realbedingungen unterzogen wurden.

4 Projektinhalt

4.1. Grundlegenden Fragestellungen im Projekt VAMOS

Bereits 2014 / 2015 hat es ein Sondierungsprojekt namens VIG-SYS-RENO zum Thema Vakuumglas in Bestandsfenstern gegeben (Pont et al. 2015). Dieses Projekt widmete sich zunächst den Qualitäten der Vakuumglasprodukte und nahm rudimentäre erste Schritte hinsichtlich Vakuumglasintegration in Kastenfenster vor. Was hier jedoch nicht durchgeführt werden konnte (aufgrund limitierter Zeit, Mittel und auch der Verfügbarkeit von Vakuumglas sowie entsprechenden Demonstrationsobjekten) war eine tatsächliche Werkplanung von entsprechenden Fenstern, eine sehr detaillierte simulatorische Annäherung, eine ausführliche Testreihe aller Aspekte der Thermohygrik, Akustik und Gebrauchstauglichkeit, sowie - vor allem - eine Verifikation solcher Bemühungen über Beobachtung von ertüchtigten Fenstern in realen Einbausituationen über einen entsprechend ausreichend dimensionierten Beobachtungszeitraum. Daher haben sich - aufbauend auf VIG-SYS-RENO - folgende weitere bzw. vertiefende Fragestellungen ergeben:

- Wie ist die grundlegende thermo-hygrische Performance von Kastenfenstern mit Vakuumglas (Erweiterung im Vergleich zu VIG-SYS-RENO)?
- Wie sind die Fenster im eingebauten Zustand hinsichtlich Performance zu bewerten? Diese Frage bezieht sich sowohl auf die thermo-hygrische Performance selbst, als auch auf die Frage, wie Kastenfenster mit Vakuumglas entsprechend gemonitort werden können um diese Performance vernünftig, dauerhaft (Langzeit) und kostengünstig zu erfassen.
- Welche Parameter spielen im eingebauten Zustand eine Rolle für die thermo-hygrische Performance?
- In welchen Ebenen macht das Vakuumglas Sinn?
- Welche flankierenden Maßnahmen, z.B. Dichtungen, sind erforderlich?
- Treten Probleme im Bereich Glas/Rahmen-Detaillierung auf, hinsichtlich Kondensation und dergleichen? Gibt es andere kritische Wärmebrücken nach der Ertüchtigung?
- Welche akustische Performance kann von Vakuumglas-ertüchtigten Kastenfenstern erwartet werden? Vor allem im Vergleich mit dem Originalzustand und anderen Ertüchtigungen?
- Wie schneiden die Simulationsergebnisse aus der numerischen Wärmebrückensimulation im Vergleich zu In-Situ-Messungen ab? Kann die Simulation als ein valides Mittel zur Performanceabschätzung verwendet werden, bzw. worauf ist hier zu achten?
- Wie schneiden mit Vakuumglas ertüchtigte Kastenfenster hinsichtlich geläufiger (normbasierter) Gebrauchstauglichkeitstests/Bewertungen ab?
- Wie sieht es mit ästhetischen Beeinträchtigungen bei mit Vakuumglas ertüchtigten Kastenfenstern aus? Wie sieht es mit der Einbruchhemmung der ertüchtigten Kastenfenster aus?
- Kommt es zu spezifischen Veränderungen am Glas unter spezifischen Temperaturbedingungen hinsichtlich einer Verformung, vergleichbar mit dem "Pumpen" von Isolierglasprodukten?

4.2. Das Projektkonsortium

Zur Beantwortung der Fragestellungen aus 4.1. wurde für das Projekt VAMOS ein maßgeschneidertes Konsortium zusammengestellt. Dieses bestand aus 2 wissenschaftlichen Partnern, nämlich dem Forschungsbereich Bauphysik und Bauökologie der TU Wien und der Holzforschung Austria, 5 klein- und mittelständischen Unternehmen aus der Tischlerbranche mit Fokus auf Kastenfensterbau, -sanierung und -restauration, sowie einem Großunternehmen der Glasindustrie, welches eine Vakuumglas-Produktionsschiene in Europa aufgebaut hat (es handelt sich dabei um die aktuell einzige Produktion in Europa).

Hinsichtlich der Aufgabenteilung und Verantwortungen im Projekt kann folgendes festgehalten werden: Die TU-Wien (A_BPI) und die Holzforschung Austria (P1_HFA) haben in Bezug auf die Integration von Vakuumglas in Fensterkonstruktionen in den vergangenen Jahren maßgebliche Projekte im Bereich Vakuumglasintegration in neue und Bestandsfenster durchgeführt und haben sich damit eine gewisse Reputation und Themenführerschaft erarbeitet (siehe Vorprojekte VIG-SYS-RENO, MOTIVE und FIVA, allesamt im Programm Stadt der Zukunft durchgeführt). Die TU-Wien übernahm auch in VAMOS entsprechend ihrem Know-how die Optimierung der thermischen Performance und das Monitoring und hatte die Konsortialführung inne. Die Holzforschung Austria konzentrierte sich auf die konstruktive Ausformung, den Bau und die Laboruntersuchungen der Kastenfensterprototypen und unterstützte die TU bei der Konsortialführung und Kommunikation mit den Partnern.

Die 5 Tischlereien (P2-P6) (allesamt KMUs) deckten mit ihrem spezifischen Know-how die unterschiedlichen Kastenfenstertypen und Sanierungsvarianten ab und haben sich dadurch auch auf unterschiedliche Lösungsansätze spezialisiert. Dies ist nachstehend aufgelistet:

- P2 – Prohaska: Denkmalschutz mit geringer Intervention in den Bestand („minimal-invasiv-restoratorisch“); Website: www.prorestauration.com
- P3 – Schaden: Tausch „nur“ des Außenfensters und erhalten des Innenfensters; Website: www.fenstersanierung.at
- P4 – Svoboda: Sanierung von nach innen öffnenden Fenstern z.B. Leistenpfostenstockfenster; Website: www.fensterbau-svoboda.at
- P5 – Winkler: Sanierung von nach außen öffnenden Fenstern z.B. Pfostenstockfenster; Website: www.tischlerei-winkler.at
- P6 – Zoller: Tausch und Neubau des gesamten Fensters („Komplettrekonstruktion“); Website: www.zp-system.at

Die AGC Glass Europe sa (P7) ist aktuell der einzige Vakuumglashersteller in Europa (bislang war Vakuumglas nur aus Asien und Nordamerika erhältlich) und hat dadurch für das Projekt den Bezug von spezifischen Vakuumgläsern für die Kastenfensterprototypen gesichert. Darüber hinaus hat sie die Produktspezifika für ihr Glas aus erster Hand eingebracht und entsprechendes Know-How hinsichtlich Produktion, Bezug und Einbau von Vakuumglas aus Sicht des Herstellers eingebracht. Darüber hinaus wurden spezifisch modifizierte Gläser für Labortests und Einbausituationen gefertigt und geliefert.

Nachstehende Abbildung 4 stellt die Arbeitsteilung im Konsortium nochmals als Funktion zwischen Anteil der Neukonstruktion bzw. Erhaltung des Bestandsfensters dar.

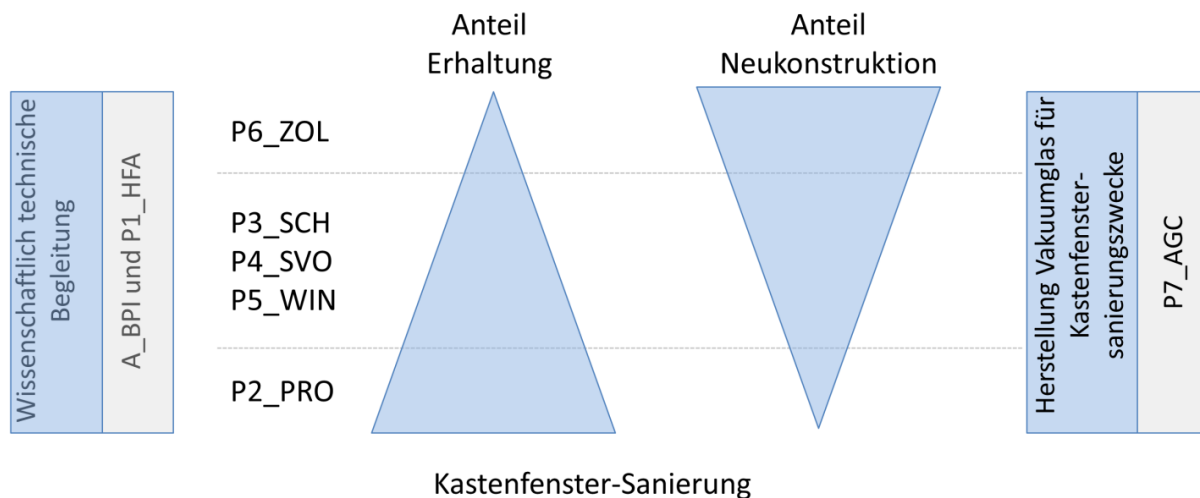


Abbildung 4: Arbeitsteilung im Konsortium bzw. Unterscheidung im Ansatz (eigene Abbildung)

4.3. Methodik (Arbeitspaketbezogene Vorgangsweise)

Projektmanagement (AP1)

Das Projektmanagement wurde vom Antragsteller, dem FOB Bauphysik und Bauökologie der TU-Wien in enger Kooperation mit der Holzforschung Austria durchgeführt. Bei diesem Projekt kam dem Projektmanagement – in Anbetracht des aus 8 teilnehmenden Institutionen und Unternehmen zusammengesetzten Konsortiums – eine wesentliche Bedeutung zu. Das Projekt wurde nach der Methode des kollaborativen Projektmanagements gesteuert und koordiniert:

- Es wurden alle Projektbeteiligten laufend und aktiv in den Planungs- und Steuerungsprozess eingebunden.
- Management wurde als integraler Bestandteil der Projektarbeit aller Teammitglieder des Konsortiums verstanden und dementsprechend parallel zu den inhaltlichen Aspekten besprochen.
- Die Planungs- und Steuerungsverantwortung fiel daher mit der inhaltlichen Projektverantwortung zusammen.
- Datenmanagement wurde von Seiten der TU Wien durchgeführt, dabei sind wesentliche Aspekte für die Partner diesen via CLOUD-Lösung zugänglich gemacht worden, so dass eine Arbeitsbasis vorhanden war. Monitoring-Daten sind zentral an der TU Wien gespeichert worden und wurden über ein Webinterface den Partnern zur Verfügung gestellt.
- Potenzielle Störungen und deren Auswirkungen auf die Arbeitspakete wurden frühzeitig kommuniziert (und damit abgefedert bzw. verhindert). Die COVID19 Pandemie hat leider in der Projektlaufzeit von einer als persönliche Meetings-Struktur

geplante Kommunikationsform zu einer weitestgehend auf Online-Medien vertrauende Kommunikation bedingt. Nichtsdestotrotz sind keine schwerwiegenden Probleme oder dergleichen in der Projektdurchführung passiert.

Konstruktionsentwicklung der einzelnen Prototypenfenster (AP2)

Für die einzelnen Kastenfenstertypen (z.B. Pfostenstock-Kastenfenster, Leistenpfostenstock-Kastenfenster, Rahmenpfostenstock-Kastenfenster, Doppelrahmenstock-Kastenfenster) und Sanierungsmethoden (minimal-invasiv-restauratorisch bis Kompletterneuerung) wurden Lösungen für den Vakuumglasanschluss am Flügel, der Vakuumglasposition im Fenster und der jeweiligen Einbausituation erarbeitet. Die letztinstanzlichen Konstruktionsentwürfe wurden wesentlich vom spezifischen Know-how der Projektpartner und den Ergebnissen aus den AP3 und AP4 geprägt. Zunächst wurden anhand der Hintergrundinformationen aus den unterschiedlichen KUs generische Fensterpläne verwendet, die als Basis für die Konstruktionsentwicklung dienten.

Nach mehreren, iterativen Optimierungsrunden, welche sich auf Aspekte der Konstruktion, der thermohygrischen Performance und der materialtechnischen Aspekte bezogen, konnte für eine Reihe von repräsentativen Kastenfenstern unterschiedlicher Bauart und unterschiedlicher Randbedingungen jeweils ein Konstruktionsvorschlag für innen und außen Einbringung von Vakuumglas erarbeitet werden. Aus den ursprünglich generischen, aber detaillierter Konstruktionszeichnungen für den Einsatz von Vakuumglas bei unterschiedlichen Kastenfenstertypen und Einbausituationen bzw. bei unterschiedlichen Graden von Interventionen (minimal-invasiv bis Neubau bzw. Rekonstruktion, Sanierung und/oder Fenstertausch) wurden dann entsprechende Werkplanungen in einer späteren Phase destilliert.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Bemühungen in AP2 folgende grundsätzliche Zielsetzung verfolgten: Thermo-hygrische Optimierung mit Hilfe von Vakuumglas unter weitestgehendem Erhalt der optischen Erscheinungsform des Fensters (das ist ein großer Unterschied zu neuen Fenstern, wo sich das Erscheinungsbild aus der thermischen Optimierung heraus entwickeln kann).

Anfertigen virtueller Prototypen und simulations-basiertes Testen (AP3)

Entsprechend der Charakteristika von Vakuumglas (günstige wärmetechnische Performance des Glases, thermische Schwachpunkte im Randbereich, etc.) ist eine sorgsame Beurteilung von Einbausituationen (Glaseinstand, Positionierung des Glases relativ im Rahmen, etc.) von großer Bedeutung für das Projekt gewesen. Große Innenoberflächentemperatursprünge, oder ungünstige Temperaturverteilungen in Rahmenprofilen (und damit verbundene Problematiken, wie z.B. Kondensatbildung) galt es grundsätzlich zu vermeiden. Es ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Bemühungen dieses APs jeweils den Ursprungszustand und die potentielle Vakuumglasertüchtigung berücksichtigten, aber bei Bestandsfenstern im sensiblen Gebäudebestand der Freiheitsgrad der Modifikationen am Fenster naturgemäß nicht so groß ist, wie bei der Konzeption von neuen Fenstern (vergleiche hierzu Veröffentlichung der Schriftenreihe zum Projekt FIVA, in welchem es um neue Fenster ging). Um einen zügigen Planungs- und Konstruktionsprozess zu gewährleisten, wurde numerische thermische Simulation (mit Hilfe des State-of-the-Art Wärmebrückensimulationswerkzeuges AnTherm) verwendet, mit welcher der gesamte Erstellungs-/Planungs- und Konstruktionsprozess der mit Vakuumglas ertüchtigen Kastenfenster begleitet und hinsichtlich thermischer Performance evaluiert wurde. Zusätzlich wurden für die erstellten Funktionsprototypen Performance-

Schlüsselwerte ermittelt/gerechnet/ bzw. aus der Simulation gewonnen. Die in späteren APs (6,7) gemessenen Daten wurden in AP8 den Simulationsdaten gegenübergestellt, so dass etwaige Einfluss-Aspekte, die schwer in der Simulation zu isolieren sind auf Ihren Impact für weitere Entwicklungen abgeschätzt werden konnten.

Untersuchung erster physischer Prototypen hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit (AP4)

An den mit Vakuumglas ertüchtigten Kastenfenster-Prototypen, welche anhand der in AP2 erstellten Werkplanung durch die beteiligten Tischlerunternehmen gefertigt wurden, konnten typische Gebrauchstauglichkeitskennwerte ermittelt werden. Dies geschah in den Versuchseinrichtungen der Holzforschung Austria und umfasst beispielsweise Luftdichtheit gemäß EN 1026 und EN 12207, Schlagregendichtheit gemäß EN 1027 und EN 12208, Windwiderstandsfähigkeit gemäß EN 12211 und EN 12210, sowie den Schallschutz gemäß EN ISO 140-3. Zusätzlich wurden Untersuchungen betreffs Einwirkung von Differenzklima und daraus erfolgende Kondensatneigung untersucht. Entsprechend der Testresultate wurden Optimierungsläufe – so erforderlich – unternommen (z.B. durch geänderte Dichtungsgeometrien, vergrößerte Entwässerungsöffnungen, geänderte Glasanbindung, veränderte Dichtheitsverhältnisse bei Innen und Außenflügel). Im Zuge dessen wurden entweder weitere Musterprototypen für die Tests gefertigt oder bestehende so modifiziert, dass sie für mehrere Testläufe herangezogen werden konnten (z.B. durch entsprechende Dichtung mit Hilfe von Klebebändern).

Objektauswahl und Feinabstimmung der Anforderungen sowie erforderliches Aufmaß (AP5)

Dieses Arbeitspaket war ein Schlüsselarbeitspaket für die Realisierung der Technologiedemonstratoren (vulgo Kastenfenster mit Vakuumglasertüchtigung). Nach einer Identifikation von verschiedenen Einbausituationen sowie dem abklären, ob die entsprechende Infrastruktur für die Monitoring-Bemühungen (Stichwörter: WLAN, Datenschutz, etc.) vorhanden bzw. errichtet werden konnte, wurden alle administrativen und organisatorischen Aspekte hinsichtlich des Einbaus, der Montage, des Monitorings, und der weiteren Betreuung abgeklärt (z.B. Absprache mit den Bauherren, wo welche Fenster für das Monitoring eingebaut werden durften und welche Art von Sensorik und Messtechnik Anwendung finden kann). Nach erfolgreicher Klärung all dieser Aspekte wurden in Vorbereitung für die Folgearbeitspakete entsprechende Vermessungs- und Aufmaß-Arbeiten durchgeführt, welche für die Werksplanung, Konstruktion bzw. Sanierung erforderlich waren. Dies wurde in Summe bei sechs unterschiedlichen Objekten in ganz Österreich durchgeführt. Im Detail wurden dabei folgende Arbeiten durchgeführt:

- Für die verschiedenen Kastenfenstertypologien und Interventionslevels im Zuge von möglichen Sanierungsvarianten wurden Beispielbauwerke in welchen die erforderlichen Realbedingungen vorgefunden werden konnten, identifiziert (das waren Kontakte über Klienten der Partner, sowie Fenster der TU Wien).
- Eine Auswahl von Umsetzungsprojekten wurde getroffen und alle administrativen und organisatorischen Aspekte diesbezüglich wurden entsprechend konsequent geklärt.
- Fein-Aufmäße der ausgewählten Fenster und Einbausituationen wurden durch On-site-Besuche durch die beteiligten Tischlerunternehmen vorgenommen, welche für die Bemühungen in AP6 erforderlich waren. Im Zuge dieser Bemühungen des Status Quo-Aufnehmens fand auch die Identifikation von möglichen Einbausituationen statt.

- Die finale Auswahl der Objekte, aber auch der Fenster in den Objekten erfolgten nach sachlichen Kriterien (Zugänglichkeit, Einbausituation, potentielle Probleme beim Einbau, etc.) sowie dem Abklären aller administrativen und organisatorischen Aspekte für den Einbau („Erlaubnis“, Auffangen bei Problemen, ...).

Bau und Einbau der Prototypfenster sowie der erforderlichen Messtechnik (AP6)

Basierend auf den Bemühungen in AP5 wurden die zu errichtenden Kastenfensterprototypen – je nach Grad der Intervention – handwerklich oder teil-maschinenunterstützt in den jeweiligen Werkstätten hergestellt und anschließend am jeweiligen Montageort in situ - nach einer etwaigen Demontage/Modifikation des vorherigen Zustands des Fensters und etwaiger Fensteranpassungen eingebaut. Für jede Einbausituation wurde eine maßgeschneiderte Mess-Infrastruktur konzipiert, an der TU Wien aus Einzelteilen zusammengebaut und getestet und dies auch entsprechend dokumentiert. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die jeweilige Einbausituation Rücksicht genommen. Es wurden prinzipiell zwei unterschiedliche Detaillierungsgrade bei der Messtechnik vorgesehen: In der Ausführung “Standard” wurden Temperaturen und Luftfeuchtigkeit an kritischen Punkten gemessen; in der Ausführung “Detailliert” kamen weitere Messpunkte dazu und zusätzlich wurde mit einer Wärmeflussplatte der Wärmestrom durch das Glas erfasst.

Ergänzend zur Inbetriebnahme und Kalibrierung der Messtechnik vor Ort, wurde die Datenübertragung / Speicherung und Erarbeitung / Erläuterung des Verfahrens intensiv getestet, um Datenlücken von vorneherein zu minimieren. Zusätzlich wurden Evaluierungsprotokolle für Gebäudenutzer:innen/Beobachter:innen vor Ort (z.B. „Ist ein Kondensstreifen am Fenster sichtbar?, Wenn ja, wo?“) erstellt, mit deren Hilfe eine weitere Beurteilung der Fenster durchgeführt werden konnte.

Im Detail wurden in diesem Arbeitspaket also folgende Bemühungen angestellt:

- Herstellung der mit Vakuumglas ausgestatteten Kastenfensterprototypen für den Realbetrieb (Anmerkung: Dabei handelt es sich von einer minimal-invasiven Ertüchtigung bis hin zu einer Komplettrekonstruktion).
- Montage nach den Regeln der Baukonstruktionslehre und entsprechender Ausführungsnormen, gegebenenfalls unter Berücksichtigung von abweichenden Anforderungen der Vakuumgläser.
- Integration der Monitoring-Infrastruktur, je nach Anforderung parallel zur oder nach der Fenstermontage.
- Durchführen von Setup- & Kalibrierungs-Arbeiten sowie Sicherstellung eine kontinuierliche Datenerfassung

Monitoring / Performance der Fenster unter realen Einbausituationen (AP7)

Wie bereits im vorherigen AP beschrieben wurde ein Langzeit-Monitoring zur Performance Evaluierung und zur laufenden Bestimmung der thermischen Performance im realen Betrieb geplant und ausgeführt. Konkret wurde bei den Fenstern jeweils eine Messung von Innen-, Außen- und Zwischenraumklima (Temperatur und Feuchte) kontinuierlich durchgeführt und die Werte entsprechend übertragen aber auch lokal gespeichert. Punktuell wurde an kritischen – bereits im AP3 identifizierten – Punkten zusätzlich die Oberflächentemperatur erfasst (Glasoberflächen, Holz-Rahmen/Flügel, interessante Punkte im Wandanschlussbereich). Die

zusätzliche Erfassung der Wärmeströme mittels Wärmeflussplatten lieferte weitere Hinweise auf die Performance der Fenster in unterschiedlichen Modifikationszustände. Es wurden zur besseren Bewertung der Fenster auch die lokalen Außenbedingungen im Monitoringkonzept berücksichtigt und entsprechende Sensorik vorgesehen. Zusätzlich gab es Beobachtungsprotokolle für die Eigentümer:innen bzw. Nutzer:innen der Liegenschaften bzw. Räumlichkeiten..

Aufgrund der gegenüber der ursprünglichen Planung vertieften Messkonzepte war es nicht erforderlich zusätzliche punktuelle Messungen zu machen, deren Aussagekraft ohnehin fragwürdig gewesen wäre. Stattdessen wurden die Objekte immer wieder durch das Projektteam besucht, und die Daten an sehr kalten Tagen zusätzlich durch photographische Dokumentation ergänzt.

Die erfassten Daten wurden in die bestehende, bewährte Monitoring-Daten-Handling-Infrastruktur am Forschungsbereich Bauphysik und Bauökologie integriert, womit eine Auswertung (in AP8) erleichtert wurde.

Im Detail sind also in AP7 folgende Arbeitsschritte vorgenommen worden:

- Erhalten von durchgängigen und für die Evaluierung der einzelnen Fenster wesentliche Monitoring-Daten thermo-hygrischer Natur. Es wurden jeweils zwei modifizierte Fenster und ein "Kontrollfenster" (also ein Fenster, bei dem keinerlei Modifikation gegenüber dem ursprünglichen Zustand vorgenommen wurde) erfasst.
- Erhalt objektiver (messtechnischer) und subjektiver (Anschauung, Wahrnehmung durch Gebäudenutzer:innen) Performancedaten von den Fenstern zur Identifikation von gut und verbesserungswürdigen Aspekten.
- Strukturierte Datenaufbereitung um verschiedene Fragen hinsichtlich der Performance der gebauten Fenster beantworten zu können.
- Verwendung von State-of-the-Art Messtechnik (thermo-hygrischer Bereich) für Langzeit-Monitoring (Luft-Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit, Wärmestrom, etc.) in unterschiedlichem Zuschnitt.
- Integration der Daten in bestehende Monitoring-Daten-Handling-Systeme am Forschungsbereich Bauphysik und Bauökologie.

Auswerten von Monitoringdaten und Erfahrungen aus der Projektdurchführung – Erstellen eines Leitfadens (AP8)

In diesem Arbeitspaket wurden (i) die über den Monitoringzeitraum gesammelten Messdaten (fast ein komplettes Jahr, inklusive einer Winterperiode mit relativ kalten Wintertagen sowie Warmperioden im Frühsommer bis in den Juli hinein) der verschiedenen Fensterprototypen analysiert (Abgleich Performance der Innen- und Zwischenraumwerte gegenüber Außenklimadaten) und auch den Ergebnissen aus dem AP3 gegenübergestellt (Simulation versus Messdaten). Zusätzlich wurden die manuell ausgefüllten Messprotokolle (wann trat Kondensat auf, wo, wie lange, ...?) ausgewertet. Auf diese Weise konnten potentielle Schwachpunkte ermittelt werden, sowie der „Reifegrad“ der Realisierungen hinsichtlich dauerhafter, zur Energieeinsparung und zum Wärmeschutz beitragender Kastenfenster mit Vakuumglas festgestellt werden. Außerdem konnte eruiert werden, welche Abweichungen zwischen simulatorischer Annäherung und Realperformance besteht; (ii) der Geneseprozess von AP2 bis AP7 zu „Lessons Learned“ zusammengefasst werden und entsprechende Empfehlungen für zukünftige Realisierungen verfasst werden, (iii) eine SWOT (Strengths-

Weaknesses-Opportunities-Threats)-Analyse der Performance der unterschiedlichen Kastenfenstertypen und Ertüchtigungsvarianten durchgeführt werden.

Im Detail wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Auswertung der Monitoringdaten mit Hilfe von statistischen und aggregationstechnischen Methoden (Extremwerte, Durchschnittswerte, Aggregierte Auftrittshäufigkeiten von Werten über bzw. unter bestimmten Limits).
- Vergleich von Simulation mit objektiven Mess-Daten und subjektiv aufgenommenen Daten durch die Nutzer:innen.
- Identifikation von Stärken und Schwächen der unterschiedlichen Realisierungen nach einer fast ganz saisonalen Messperiode.

Dissemination (AP9)

Neben diesem Beitrag in der Schriftenreihe des Fördergebers (FFG) konnten zahlreiche Vorträge und Präsentationen sowie Publikationen in wissenschaftlichen Journalen und bei wissenschaftlichen Konferenzen über das Projekt durchgeführt werden.

Das große Interesse der Fach-Community hat zusätzlich auch eine weitere Befassung mit Kastenfenstern aus einer Kreislaufwirtschafts-Perspektive angeregt, die in einem Folgeprojekt holistisch bearbeitet werden soll.

Zu den Publikationen, Veröffentlichungen und Vorträgen zählen:

- Beim Nordic Symposium of Building Physics hat Magdalena Wölzl im September 2020 einen Online-Vortrag zum Thema Vakuumglas in Fenstern (Bezugnehmend auf die Projekte VAMOS und FIVA) gehalten (Pont et al. 2020b).
- Matthias Schuss hielt online einen Vortrag bei der 8th International Conference on Building Physics in Kopenhagen im August 2021. Daraus wurde ein Journalbeitrag im Journal of Physics: Conference Series (Schuss et al. 2021; Open Access: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2069/1/012128>)
- Ulrich Pont und Magdalena Wölzl hatten die Gelegenheit im Zuge einer Modul-Lehrveranstaltung an der TU Wien beim Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege / Forschungsbereich Baugeschichte und Bauforschung im Zuge des Moduls Cultural Spaces das Projekt vorzustellen und mit Studierenden mit Spezialisierung auf Umgang mit Bestandsbauwerken zu diskutieren (April 2021)
- Ulrich Pont hat darüber hinaus bei den an interessierte Studierende und Fachpublikum adressierten Studententagen historisch:smart an der TU Wien im Februar 2021 das Projekt VAMOS vorstellen können und mit ExpertInnen aus dem Gebiet über die Inhalte diskutieren können.
- Im quartalsmäßig erscheinenden Magazin der Holzforschung Austria wurde ein Artikel über die Bemühungen des Projektes mit Namen „Aus alt und bewehrt wird zeitgemäß und innovativ – Kastenfenster mit Vakuumglas ertüchtigen“ veröffentlicht (Hauer et al. 2021, [Online verfügbar via: https://www.holzforschung.at/fileadmin/user_upload/Downloads/HFA-Magazin/HFA-Magazin-2021-04.pdf](https://www.holzforschung.at/fileadmin/user_upload/Downloads/HFA-Magazin/HFA-Magazin-2021-04.pdf))
- Von Seiten der Konsortialführung (TU Wien mit Hilfe der HFA) wurde Kontakt zu den Herausgebern der Fachzeitschrift Bausubstanz (Fraunhofer Verlag) und Glaswelt

aufgenommen, welche sehr großes Interesse an einer Publikation dieser einzigartigen Technologiedemonstration zeigten.

- Ulrich Pont konnte bei der CHNT26 (Conference on Cultural Heritage and New Technologies) einen Vortrag und ein Poster unter dem Namen „The eyes of the City“ präsentieren, in welchem es mitunter um die Ertüchtigung von Kastenfenstern mit Vakuumglas ging. Eine Publikation hierzu ist in Vorbereitung (Pont et al. 2021).
- Peter Schober konnte die wesentlichen Erkenntnisse anlässlich der Rosenheimer Fenstertage im Vortrag „Vakuum-Isolierglas im Fenster – Renovierung und neue Konstruktionen“ einem internationalen Publikum vorstellen.
- Ein Artikel zu den Bemühungen der AutorInnen dieses Berichts hinsichtlich Integration von Vakuumgläsern in neuen und bestehenden Fensterkonstruktionen wird im alljährlich erscheinenden Bauphysik-Kalenders des Verlags Ernst und Sohn in der Ausgabe des Jahres 2023 erscheinen.
- Bei dem Fenster-Türen-Treff 2022 im Juni 2022 in Salzburg wurde ein Vortrag durch Peter Schober und Ulrich Pont gehalten, der die Ergebnisse des Projektes VAMOS dem interessierten Fachpublikum aus der Fensterindustrie/Fensterbranche vorstellte. Der zugehörige Fachartikel ist im entsprechenden Tagungsband erschienen.

5 Ergebnisse

5.1. Untersuchte Kastenfenster und Objekte

Im Forschungsantrag wurde auf die Diversität der Kastenfensterkonstruktion hingewiesen und je Konstruktionsart sollte ein Fenster (bzw. ein Fenster in einem Objekt) umgesetzt werden. Nach Abstimmung unter den Projektpartnern wurde festgelegt, dass nicht nur die ursprünglich in dem Forschungsantrag vorgesehenen Sanierungsvarianten einer Umsetzung zuzuführen sind, sondern zusätzliche Realisierungen (zum Teil gleicher Konstruktionstyp aber unterschiedliche Einbausituationen und vorherrschende Umgebungsbedingungen) für eine Untersuchung eines breiten Spektrums von Einbausituationen nützlich sind. Daher wurden tatsächlich 6 Demonstrationssites (vgl. Abbildung 6) ausgewählt, bei welchen Vakuumglas-ertüchtigte (Kasten-) Fenster zum Einsatz kommen. Zum Teil wurden bis zu 3 Fenster pro Objekt mit Messtechnik ausgestattet (F1. Vakuumglas innen, F2 Vakuumglas außen und F3 entweder Isolierglas innen oder Floatglas). Diese sind nachstehend (Abbildung 5) aufgelistet sowie in späteren Abbildungen und Tabellen im Detail dokumentiert

Objekt	Schloss	Villa	TU Wien	Stift	Architekturbüro	Amtshaus
Ort	Wels	Wien	Wien	Wilhering	Salzburg	Innsbruck
						
Bauart	Rahmenstock	Pfostenstock	Pfostenstock	Doppelrahmen	Pfostenstock	Rahmenstock
Pos. in d. Wand	in der Leibung	außenbündig	außenbündig	außenbündig	außenbündig	in der Leibung
Öffnungsrichtung	innen öffnend	außen öffnend	außen öffnend	innen öffnend	außen öffnend	innen öffnend
Teilung	2-flg. + 2Oberlicht	2-flg. + Oberlicht	2-flg.	2-flg.	2-flg.	2-flg.
Nutzung	Wohnraum	Wohnung	Büroraum	leer	Büroraum	Büroraum
Besonderheit	Glastausch	Außenfenster neu	Flügel neu	Neufenster mit Steingewände	Neufenster	Neufenster

Abbildung 5: Detaillierte Informationen über die sechs Demo-Sites (Eigene Darstellung / Projektkonsortium VAMOS; Hauer et al. 2021)

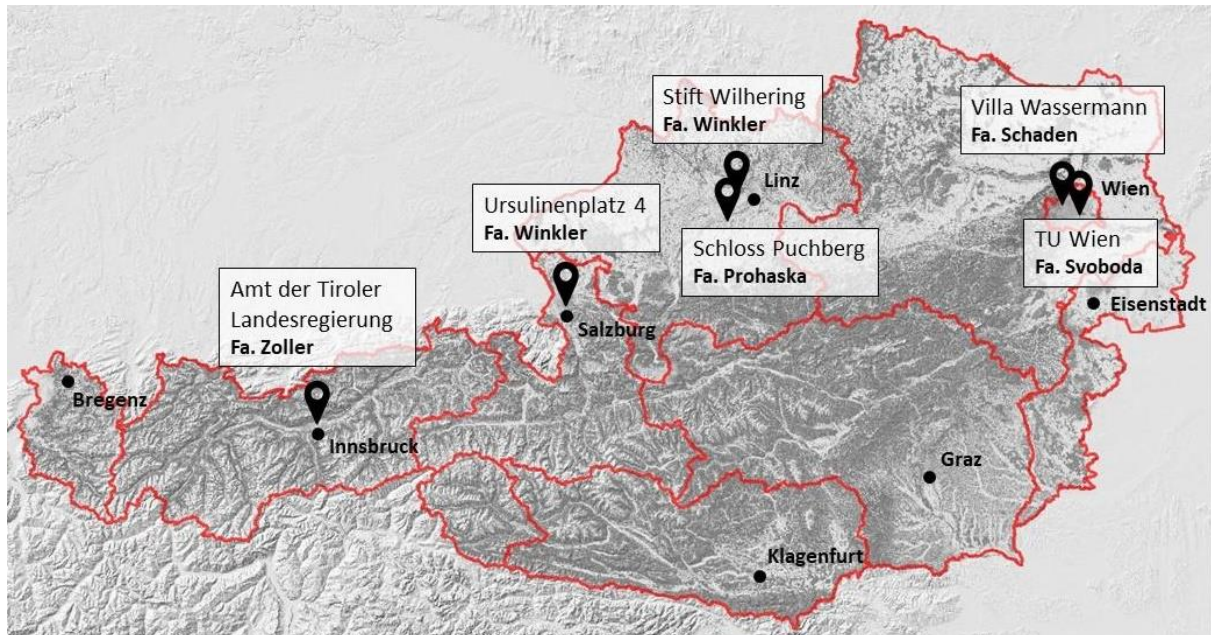


Abbildung 6: Lokalisierung der Demonstrations-Gebäude

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Objekte im Detail besprochen und dargestellt.

5.1.1. Schloss Puchberg

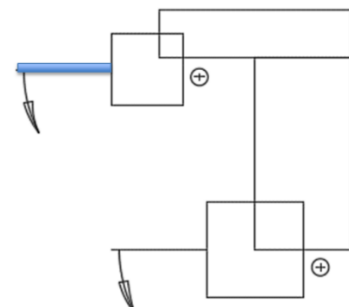
Schloss Puchberg in Oberösterreich / Wels (<https://schlosspuchberg.at/> bzw. https://de.wikipedia.org/wiki/Bildungshaus_Schloss_Puchberg) dient als Bildungs- und Unterbringungshaus der Diözese Linz. Nachstehende Tabelle 1 illustriert die wesentlichsten Aspekte dieses Demo-Objektes. Bei drei Fenstern des Schlosses wurde das Monitoring vorgenommen. Dabei wurde minimalinvasiv im Sinne einer Restaurations-Arbeit lediglich das Glas ausgetauscht. Entsprechende Darstellungen zu Konstruktion und Fenstern finden sich in den Abbildung 7 und Abbildung 8.

Tabelle 1: Objektdatenblatt – Schloss Puchberg

Schloss Puchberg

Bauart	Rahmenstock
Fenster	Bestand
Besonderheit	Glastausch
Ort	Wels
Einbauhöhe	1. OG
Himmelsrichtung	Nord-ost
Funktion des Raumes	Wohnraum
Heizung	Radiatoren unter Fenster
Pos. in d. Wand	in der Leibung
Öffnungsrichtung	innen öffnend
Maueranschluss	Bestand, eingemauert
Teilung	2-fgl. + 2 Oberlicht
Stockaußenmaß	2200 x 1330
Stocktiefe	236

Betreut von **Ernst Prohaska**



Prinzip des Rahmenpostenstock-Fensters

Holzart	Kiefer
Monitoring	Standard
Verglasungs- Varianten (Abkürzung)	Innen VG/ außen Float (F1) Innen Float/ VG außen (F2) Floatglas / Floatglas (F3)

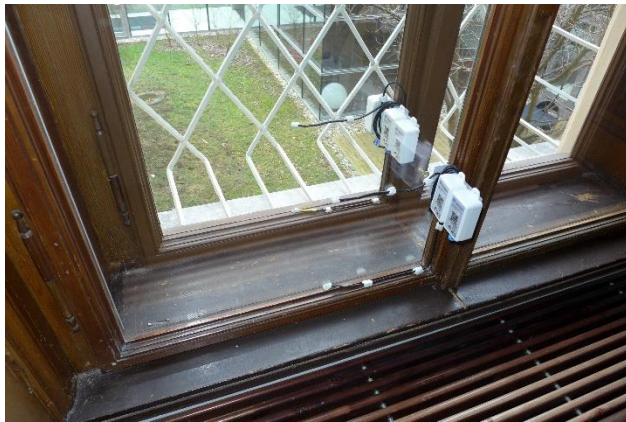


Abbildung 7: links: Positionierung der funkbasierten Messtechnik; rechts: Innenraum in dem sich alle 3 betrachteten Fenster befinden

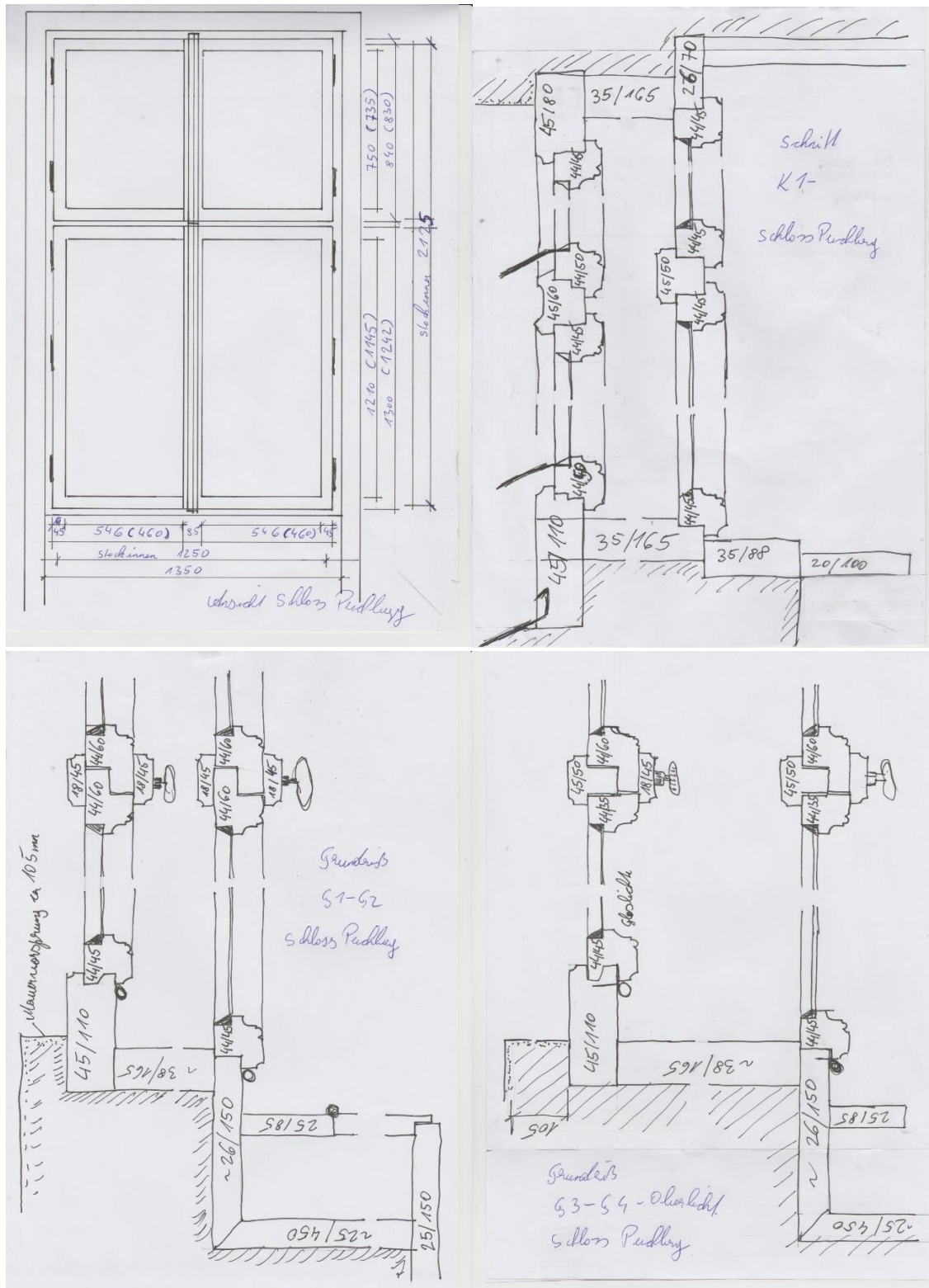


Abbildung 8: Konstruktionszeichnungen – links oben: Ansicht; rechts oben: Vertikalschnitt; links unten: Horizontalschnitt; rechts unten: Horizontalschnitt Oberlicht (gezeichnet durch Ernst Prohaska)

5.1.2. Villa Wassermann

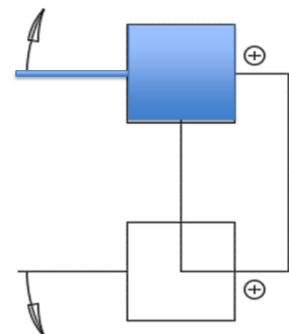
Die Villa Wassermann aus dem Jahr 1915 stellt ein Wohnhaus in Wien 19 nach der ursprünglichen Planung des bekannten Architekten Oskar Strnad dar (<https://www.vph-wien.at/de/portfolio/73-1190-wien-paul-ehrlich-gasse-4>). Das Gebäude wurde einer umfassenden Sockelsanierung unterzogen und durch einen Bauträger erweitert. In diesem Kontext wurden auch die Fenster zum Teil erneuert (in jedem Fall die Außenfenster). Das gesamte Bauwerk wurde mit Vakuumgläsern ausgestattet, jedoch wurden wie bei den anderen Objekten nur eine überschaubare Anzahl der Fenster einem Monitoring unterzogen. Tabelle 2 fasst die Daten des Objektes zusammen, Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen Konstruktionsskizzen und Bilder der Fenster.

Tabelle 2: Objektdatenblatt – Villa Wasserman

Villa Wasserman

Betreut von **Fa. Schaden**

Bauart	Pfostenstock
Fenster	Bestand/ Außenfenster Neu
Besonderheit	Außenfenster neu, mit Vakuumglas U_g -Wert von $0,48 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Ort	Wien
Einbauhöhe	1. OG
Funktion Raumes	desWohnung
Pos. in d. Wand	außenbündig
Öffnungsrichtung	aussen öffnend
Maueranschluss	Neu, ÖNORM B 5320
Teilung	2-fgl D
Holzart	Lärche
Monitoring	Standard
Verglasungs-Varianten	VG aussen (F1)



Prinzip des Pfostenstock-Fensters

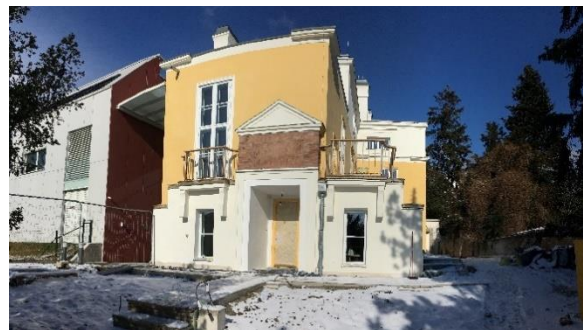




Abbildung 9: links: Positionierung der funkbasierten Messtechnik; rechts: Innenansicht des untersuchten Fensters

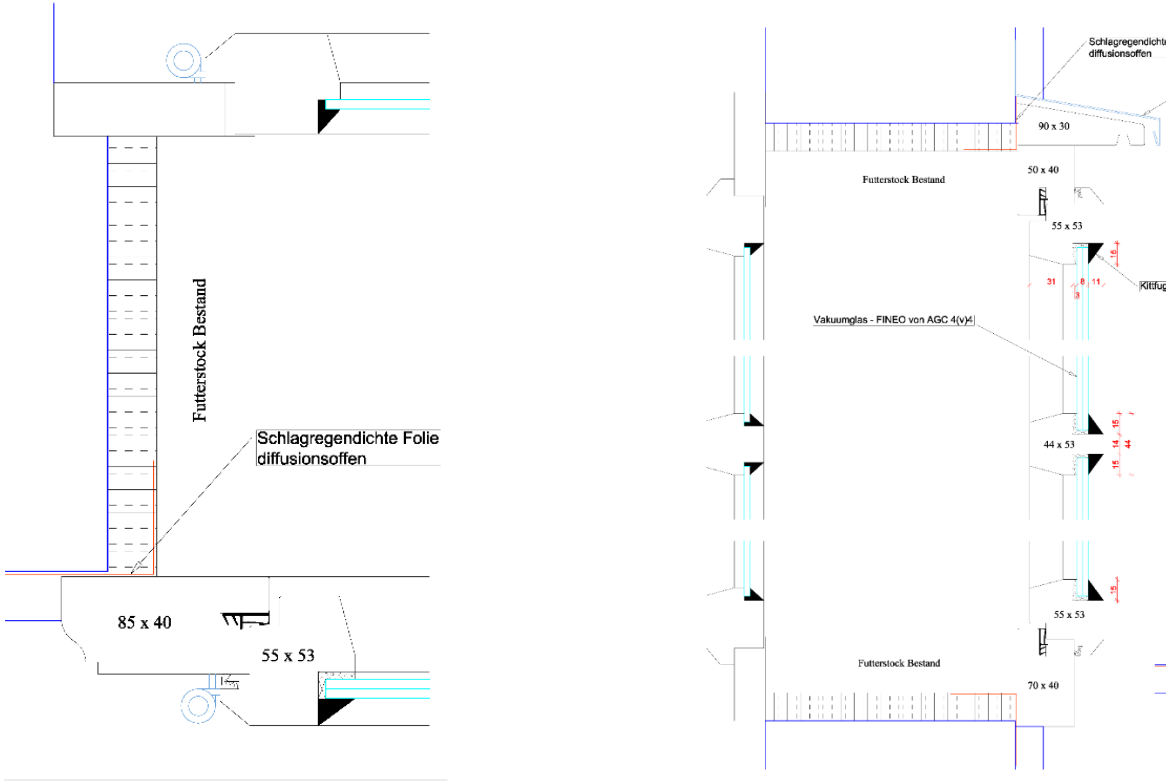


Abbildung 10: Konstruktionszeichnungen – links: Horizontalschnitt; rechts: Vertikalschnitt (gezeichnet von Fa. Schaden)

5.1.3. TU Wien

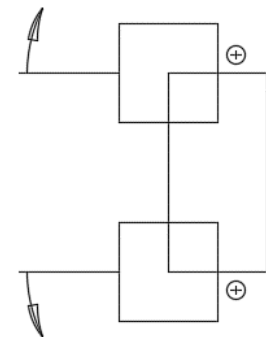
Im Hauptgebäude der TU Wien in Wien-Wieden konnte eine Büroräumlichkeit mit Alt-Wiener-Kastenfenstern für Zwecke der Ausstattung mit Vakuumglas und dem zugehörigen Monitoring gewonnen werden. Tabelle 3 fasst die wesentlichsten Aspekte dieses Bauwerks bzw. dieser Demonstration zusammen und Abbildung 11 zeigt ein Foto sowie die Konstruktionskizzen.

Tabelle 3: Objektdatenblatt – TU Wien

TU Wien

Betreut von **Fa. Svoboda**

Bauart	Pfostenstock
Fenster	Bestand
Besonderheit	Flügeltausch bei Altfenstern
Ort	Wien
Einbauhöhe	3.OG
Himmelsrichtung	Süd-west
Funktion des Raumes	Bürraum
Heizung	Radiatoren unter Fenster
Pos. in d. Wand	außenbündig
Öffnungsrichtung	aussen öffnend
Maueranschluss	Bestand, eingemauert
Teilung	2-fgl. + Oberlicht
Monitoring	detailliert
Verglasungs-Varianten	Innen VG/ außen Float (F1)
	Innen Float/ VG außen (F2)
	Floatglas / Floatglas (F3)



Prinzip des Pfostenstock-Fensters



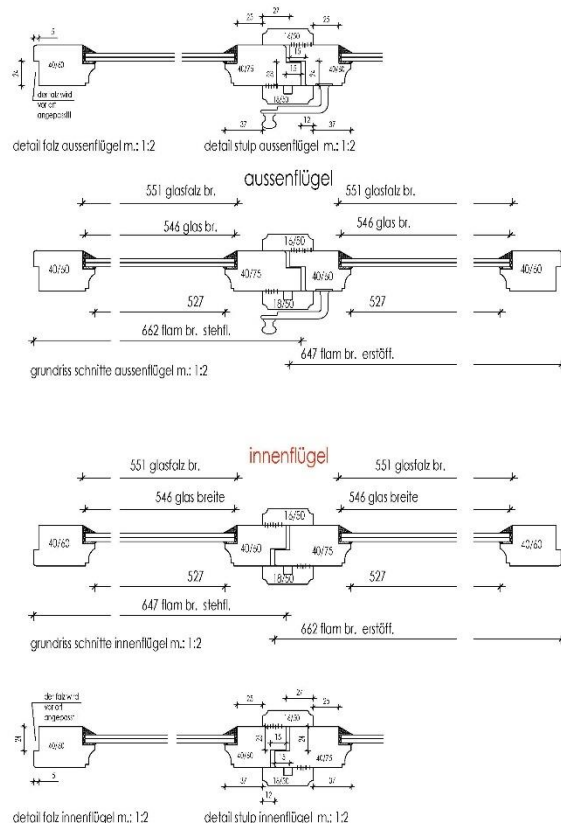


Abbildung 11: Links: Innenansicht; rechts: Werkplan der neu gemachten Flügel (gezeichnet von Fa. Svoboda)

5.1.4. Stift Wilhering

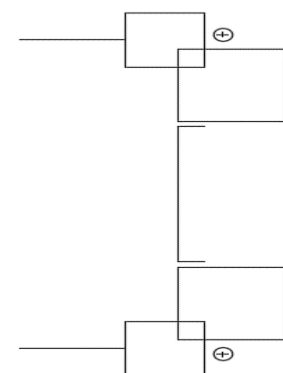
Die Zisterzienserabtei Wilhering liegt in der oberösterreichischen Marktgemeinde Wilhering. Bei diesem Objekt konnten Räume, denen keine spezifische Nutzung zur Projektlaufzeit zugewiesen waren für die Realisierung eines Doppelrahmenstockes mit Steingewände und das Monitoring herangezogen werden. Tabelle 4 fasst die wesentlichsten Daten dieser Realisierung zusammen. In den Abbildungen 12 und 13 finden sich Photographien und entsprechende Konstruktionszeichnungen.

Tabelle 4: Objektdatenblatt – Stift Wilhering

Stift Wilhering

Betreut von **Fa. Winkler**

Bauart	Doppelrahmen
Fenster	Neufenster
Besonderheit	Flügeltausch bei Neufenster, Steingewände
Ort	Wilhering
Einbauhöhe	1. OG
Himmelsrichtung	Nord-ost
Funktion des Raumes	unbenützt
Heizung	Radiatoren unter Fenster
Pos. in d. Wand	außenbündig



Prinzip des Doppelrahmenstock-Fensters

Öffnungsrichtung	innen öffnend
Maueranschluss	Neu, Vorgabe Denkmalschutz
Teilung	2-fgl D
Stockaußenmaß	1215 x 1675 mm
Stocktiefe	285
Holzart	Kiefer/Lärche
Monitoring	Standard
Verglasungs- Varianten	Innen VG/ außen Float (F1) Innen ISO/außen Float (F2)



Abbildung 12: Links: Positionierung der funkbasierten Messtechnik; rechts: Außenansicht des untersuchten Fensters mit umlaufendem Steingewände

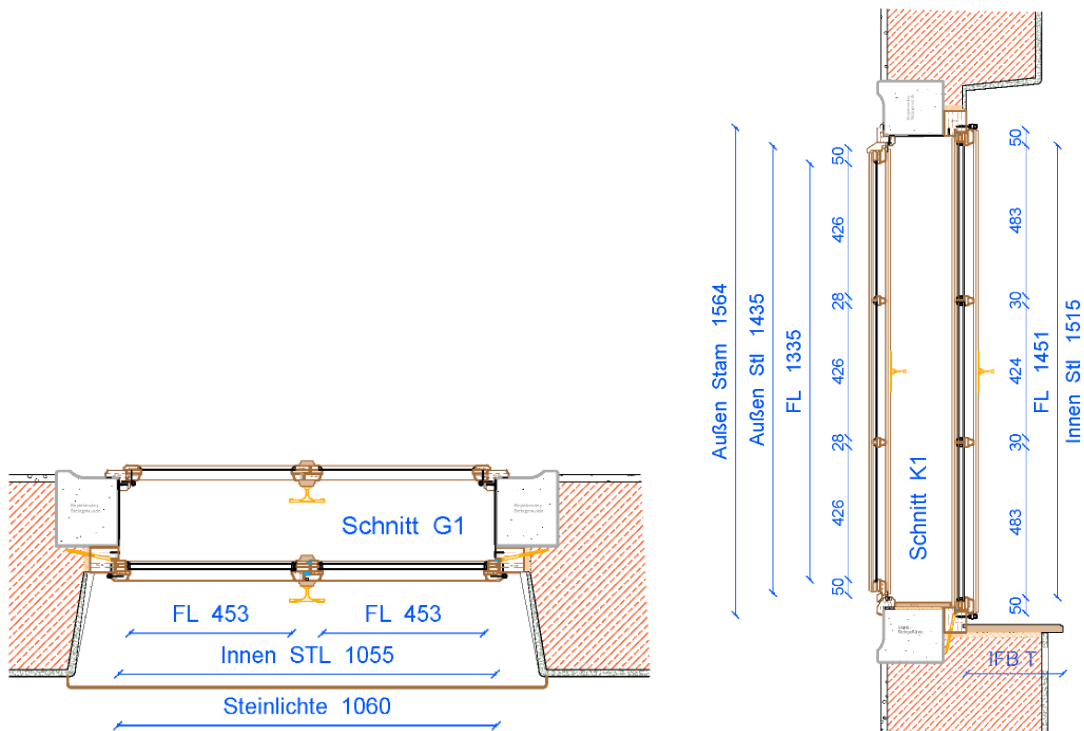


Abbildung 13: Konstruktionszeichnung – links: Horizontalschnitt; rechts: Vertikalschnitt (gezeichnet von Fa. Winkler)

5.1.5. Ursulinenplatz 4

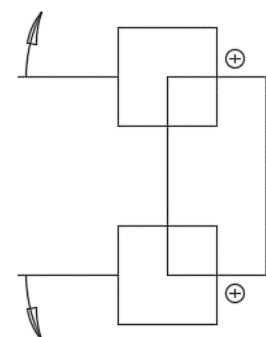
In einem Architekturbüro in der Stadt Salzburg konnte ebenfalls eine Realisierung durchgeführt werden. Tabelle 5 illustriert die wesentlichsten Daten des Objekts bzw. der Realisierung und Abbildung 14 zeigt ein Foto und entsprechende Schnittzeichnungen.

Tabelle 5: Objektdatenblatt – Ursulinenplatz 4

Ursulinenplatz 4

Betreut von **Fa. Winkler**

Bauart	Pfostenstock
Fenster	Neufenster
Besonderheit	Flügeltausch bei Neufenster
Ort	Salzburg
Einbauhöhe	1. OG
Himmelsrichtung	Ost
Funktion des Raumes	Büroraum
Heizung	Radiatoren unter Fenster
Pos. in d. Wand	außenbündig
Öffnungsrichtung	Außen öffnend
Maueranschluss	Neu, ÖNORM B 5320
Teilung	2-fgl D
Stockaußenmaß	1070 x 1500 mm
Stocktiefe	200
Holzart	Kiefer
Monitoring	Standard



Prinzip des Pfostenstock-Fensters

Verglasungs-
Varianten

- Innen VG/ außen Float (F1)
- Innen Float/außen VG (F2)
- Innen ISO/außen Float (F3)

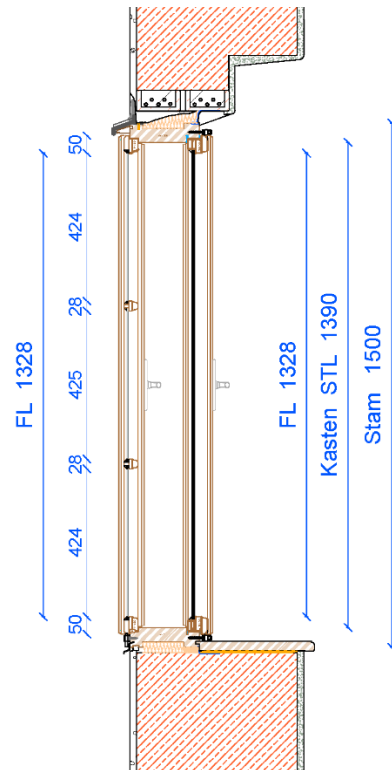


Abbildung 14: Links: Innenansicht mit Messtechnik; rechts: Konstruktionszeichnung Vertikalschnitt (gezeichnet von Fa. Winkler)

5.1.6. Amt der Tiroler Landesregierung

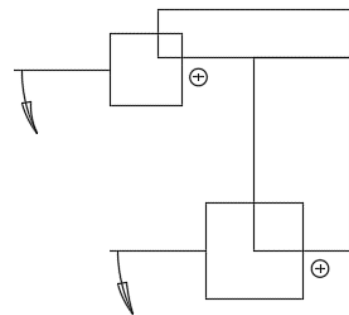
Das am westlichsten gelegene Objekt ist das Amt der Tiroler Landesregierung in Innsbruck, Tirol. Hier wurde bei neuen Kastenfenstern ein Flügeltausch durchgeführt. Ähnlich wie bei den anderen Objekten kann aus nachstehender Tabelle 6 die essentiellste Information über das Objekt und die Realisierung herausgelesen werden. Abbildungen 15 und 16 zeigen Fotos und eine Konstruktionsschnittzeichnung.

Tabelle 6: Objektdatenblatt – Amt der Tiroler Landesregierung

Amt der Tiroler Landesregierung

Betreut von **Fa. Zoller-Prantl**

Bauart	Rahmenstock
Fenster	Neufenster
Besonderheit	Flügeltausch bei Neufenster
Ort	Innsbruck
Einbauhöhe	EG
Himmelsrichtung	nord / west
Funktion Raumes	des Besprechung / Büro
Heizung	Radiatoren unter Fenster
Pos. in d. Wand	in der Leibung
Öffnungsrichtung	innen öffnend
Maueranschluss	Neu / Bestand
Teilung	2-fgl D
Stockaußenmaß	1340 x 1882
Stocktiefe	201
Holzart	Fichte
Monitoring	Detailliert
Verglasungs- Varianten	Innen VG/ außen Float (F1) Innen Float/außen VG (F2) Innen ISO/außen Float (F3)



Prinzip des Rahmenpfostenstock-Fensters





Abbildung 15: links: Positionierung der detaillierten Messtechnik; rechts: Innenansicht eines der untersuchten Fenster

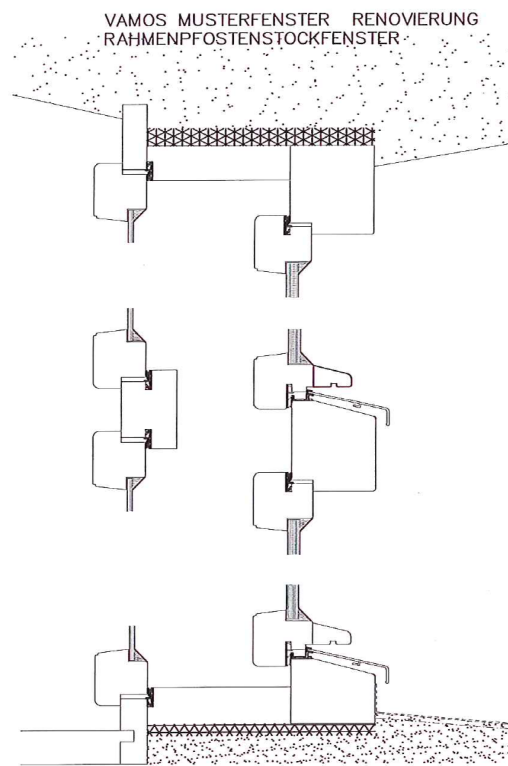


Abbildung 16: Konstruktionszeichnung – Vertikalschnitt mit Vakuumglas außen (gezeichnet von Fa. Zoller-Prantl)

5.2. Simulations-basiertes Testen virtueller Prototypen

Für eine erste thermo-hygrische Einschätzung des Verhaltens der Kastenfenster bei Einsatz von Vakuumglasscheiben (i) innen und (ii) außen, wurden numerische Wärmebrückensimulationen der Querschnitte, der zuvor ausgewählten Objekte, erstellt. Als Referenz und Vergleichswert wurde ebenfalls der Originalzustand mit (iii) Floatglas in beiden Ebenen und im Einzelfall mit (iv) Isolierglas als Innscheibe, einer Simulation unterzogen.

Zum Einsatz kam das numerische Wärmebrücken-Simulationstools AnTherm (www.antherm.eu), welche sich mittels numerischen Näherungsverfahren und computergestützte Simulation natürlichen oder technischen Vorgängen annähert. Bei der Betrachtung von Wärmebrücken spielen verschiedene Wärmetransportprozesse bzw. Temperaturverteilungen eine entscheidende Rolle. Die physikalische Realität in komplexen Baukonstruktionsdetails wird dabei approximativ anhand von Differentialgleichungen dargestellt. Für Baukonstruktionen beliebiger Form und Materialzusammensetzung können Temperaturverteilungen, Wärmeströme und Wasserdampf-Diffusionsströme berechnet werden (Pont et al. 2020a).

Antherm.at (AnTherm 2022) beschreibt es folgendermaßen: es handelt sich um ein Programm zur *"Analyse des Thermischen Verhaltens von Bauteilen mit Wärmebrücken und Dampfdiffusionsbrücken"*. Dabei wird *„aufbauend auf genauer Kenntnis des physikalisch fundierten Konzepts der thermischen Leitwerte und auf EN ISO 10211[...] eine akkurate Näherung des Verhaltens von Wärmebrücken errechnet. AnTherm wird laufend normgemäß weiterentwickelt um die Validierungserfordernisse vollständig und in allen Kriterien zu erfüllen“*.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die benötigten Eingabedaten in AnTherm, die berechneten Ergebnisindikatoren und daran anschließend, die konkret für das Forschungsvorhaben umgesetzten Wärmebrückensimulationen.

5.2.1. Eingabedaten

Nachstehend sind die verwendeten Eingabedaten für die durchgeführten numerischen Wärmebrückensimulationen in diesem Projekt dargestellt und kurz erläutert.

Wärmeleitfähigkeit / Lambda-Werte von Materialien

Für eine einfache, stationäre Berechnung von Oberflächentemperatur und Wärmestrom ist die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Materialien als Mindesteingabe zu verstehen. Diese physikalische Stoff-Kenngröße beschreibt den Wärmestrom durch ein Material aufgrund des Wärmetransportmechanismus Wärmeleitung und ist dabei sehr stark von der Durchfeuchtung eines Materials abhängig. Für die gegenständlichen Simulationen wurde von keinem übermäßigen Feuchtegehalt („trockener Zustand“) ausgegangen. Die in Tabelle 7 genannten und verwendeten Wärmeleitfähigkeitskennzahlen basieren auf Erfahrungswerten und entsprechenden normativen Dokumenten (z.B. ÖNORM B 8110 Teil 7 und Teil 8, DIN 4108-4). Die Wärmeleitfähigkeit des Vakuums wurde anhand der Literatur bzw. der Herstellerangaben betreffend U-Werte rückgerechnet. Um das thermische Verhalten von Lufteinschlüssen zu approximieren wurde hier ein Replacement-Lambda- Wert verwendet. Um fälschlicherweise zu hoch angenommene Dämmwirkung von Lufteinschlüssen zu verhindern, wurde ein sehr hoher Wert angenommen (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Lambda-Werte der zum Einsatz gekommenen Materialien (Quellen: ÖNORM B 8110, ISO 10077-2:2017)

Farbe	Material	Lambda-Wert
	Holz	0,13 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Dämmstoff	0,041 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Kitt	0,4 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Dichtungen	0,3 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Glas	1 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Mauerwerk	0,45 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Putz	0,7 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Silikon	0,35 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Vakuum	0,00000975 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Eingeschlossene Luft	0,5555 W.m ⁻¹ .K ⁻¹

Klimabedingungen

Die Innenlufttemperatur wurde, gemäß ÖNORM B 8110-2, mit 20 °C angenommen. Für Außenluftbedingungen von Bauteilen mit niedriger Speicherwirksamkeit (u.a. Fenster) sind durchschnittliche Tagestiefstwerte anzusetzen. In Wien schwanken diese zwischen -8,5 °C und -11,4 °C. Die Annahme einer Außentemperatur von -10°C erscheint daher ein gangbarer Weg zu sein.

Bei Kastenfenstern spielt die Temperatur im Zwischenraum zwischen Innen- und Außenflügel eine große Rolle, sowohl in der realen Performance als auch in der Simulation. Bei Wärmebrückensimulationen besteht die Möglichkeit den (vermeintlich) ruhenden Zwischenraum als „Material“ anzunehmen, oder den Zwischenraum als weitere klimatische Randbedingung zu definieren. Beide Ansätze besitzen Vor- und Nachteile. Für das Material kann ein Replacement-Lambda-Wert angenommen werden, welcher aber konvektive Prozesse im Zwischenraum komplett negiert. Bei dem Ansatz als Klimarandbedingung können konvektive und radiative Prozesse an den Bauteiloberflächen besser berücksichtigt werden. Nachteilig ist hier, dass eine homogene Temperaturverteilung im Zwischenraum angenommen werden muss (Klimarandbedingung als Einzahlwert). Im gegenständlichen Projekt wurden die Simulationen mit dem Zwischenraum als Klimarandbedingung durchgeführt. Dazu wurde eine stationäre Zwischenraumtemperatur (θ_{int}) mithilfe der aus der Simulation erhaltenen Wärmeströme ermittelt.

Wärmeübergangswiderstände an Bauteiloberflächen

Das Simulationstool AnTherm stützt sich vor allem auf die Wärmeleitung. An den Übergängen von Feststoffen zu Lufträumen findet jedoch ein konvektiv-radiativer Wärmetransport statt. Um diesen komplexen Prozess zumindest rudimentär nutzen zu können, sind in vielen normativen Dokumenten (EN ISO 13788, EN ISO 10211, DIN 4108-3, ÖNORM B-8110-2) so genannte Wärmeübergangswiderstände (R_s) genannt. In Tabelle 8 sind die R_s -Werte für die drei Randbedingungen Innen (Innenraum), Buffer (Zwischenraum der zwei Scheibenebenen des Kastenfensters) und Außen (Außenraum) aufgelistet.

Tabelle 8: Randbedingungen innen und außen (diverse Normen und Publikationen)

Farbe	Randbedingung	$R_s(H,T)$ -Wert
	Innen	0,25 (m ² K)/W
	Buffer / Puffer (Zwischenraum)	0,25 (m ² K)/W
	Außen	0,04 (m ² K)/W

Rasterung / Fine-Meshing

Das Simulationstool AnTherm löst für die numerische Berechnung den Elementaufbau in ein Raster (Mesh) auf. Mit 0,15 mm ist der Scheibenzwischenraum der Vakuumglasscheibe die kleinste Zellgröße des Rasters und somit der bestimmende Faktor.

Adiabate Systemgrenzen

Als adiabatische Systemgrenze wird der Übergang („Schnittgrenze“) zur nicht modellierten Umgebung bezeichnet. Bei den Simulationen wurden diese adiabaten Schnittgrenzen nach den Vorgaben der EN ISO 10211 und der EN ISO 10077 Teil 1 und Teil 2 gewählt.

5.2.2. (Ergebnis-)Indikatoren

Neben anderen Outputs der Wärmebrückensimulation, wie Falschfarbenbildern und Temperaturverläufen wurden drei Indikatoren explizit betrachtet und als Evaluierungskriterium herangezogen:

f_{Rsi}-Wert - der Temperaturfaktor für die raumseitige Oberfläche

In der europäischen Norm EN ISO 13788 (2013-05) wird der Temperaturfaktor f_{Rsi} wie folgt beschrieben:

Der Temperaturfaktor f_{Rsi} ist „die Differenz zwischen der Temperatur der raumseitigen Oberfläche und der außenseitigen Lufttemperatur, dividiert durch die Differenz zwischen raumseitiger operativer Temperatur und außenseitiger Lufttemperatur, berechnet mit einem Wärmeübergangswiderstand R_{si} an der raumseitigen Oberfläche“.

Die Formel hierzu lautet

$$f_{Rsi} = (\theta_{(si,min)} - \theta_e) / (\theta_i - \theta_e) \quad [-] \quad (1)$$

Dabei bezeichnet

- f_{Rsi} ... Temperaturfaktor für die raumseitige Oberfläche (Dimensionslos zw. 0 und 1)
- $\theta_{(si,min)}$... niedrigste Oberflächentemperatur der warmen Seite / der Innenseite (°C)
- θ_e ... Außentemperatur (°C)
- θ_i ... Innentemperatur (°C)

In der ÖNORM werden die kritischen Werte für f_{Rsi} folgendermaßen angegeben (ÖNORM B 8110-2: 2003, S. 18)

- $\geq 0,71$ zur Hintanhaltung von Schimmelbildung bzw.
- $\geq 0,69$ zur Vermeidung von Kondensation

Für nicht-opake Bauteile ist dies eine recht strenge Zielsetzung, dennoch ist ein $f_{Rsi} > 0,71$ als Ziel anzustreben.

$\theta_{si,min}$ - Mindestoberflächentemperatur innen

Die niedrigste Oberflächentemperatur der warmen Seite ($\theta_{(si,min)}$) wird bei dem f_{RSi} -Wert bereits berücksichtigt. Die Ermittlung und Lokalisierung innerhalb der Konstruktion dieses Punktes ist aber zusätzlich von großer Bedeutung. Diese Stelle ist am anfälligsten für Schimmel- und Kondensatbildung. Diese zu kennen hilft gegebenenfalls mit konstruktiven Maßnahmen oder Lösungen anfallendem Kondensat entgegenzuwirken.

θ_{int} - Berechnung Temperatur im Zwischenraum

Nachstehende Formel wurde verwendet um die Temperatur (θ_{int}) im Zwischenraum zwischen Innen- und Außenflügel zu berechnen. Diese Formel kann nur bei stationären Randbedingungen und damit stationären Randbedingungen verwendet werden.

$$\theta_{int} = \frac{L_2 D_I * \theta_i + L_2 D_{II} * \theta_e}{L_2 D_I + L_2 D_{II}} \quad (2)$$

Dabei bezeichnet:

- θ_{int} ... Temperatur im Zwischenraum zwischen Innen- und Außenflügel (°C)
- θ_i ... Innentemperatur (°C)
- θ_e ... Außentemperatur (°C)
- $L_2 D_I$... Wärmeleitkoeffizient 2D vom Innen- zu Zwischenraum
- $L_2 D_{II}$... Wärmeleitkoeffizient 2D vom Zwischen- zu Außenraum

5.2.3. Durchgeführte Wärmebrückensimulationen

Vorstudie

Als erster Ansatz zu den Simulationen von Kastenfenstern im Originalzustand, sowie mit Vakuumglas appliziert einmal im Innen- und einmal im Außenflügel wurde für ein generisches Kastenfenster ein Simulationsmodell erstellt und dieses dann mit zweimal Float, 1x Float und 1 Vakuumglas, sowie einmal Vakuumglas und 1 x Floatglas durchgeführt. Die nachstehenden Abbildung 17 zeigen exemplarisch das Simulationsmodell und die Oberflächentemperatur von dem Innenraum und dem Pufferraum. In der Grafik darunter wurden die Ergebnisse der Profilttemperaturen aller drei Szenarien dargestellt. Diese Abbildungen dienen dem Verständnis dafür, wie alle anderen Simulationsmodelle aufgebaut und dargestellt werden.

Diese erste Simulation zeigt, dass bei nicht Berücksichtigung weiterer Randbedingungen, eine außenseitige Anbringung des Vakuumglases empfehlenswert erscheint, da die Temperaturen entlang des Innenprofils nicht signifikant schlechter als die einer Floatlösung sind, aber die Temperaturen entlang des Außenflügels ungleich höher als in den anderen beiden Varianten sind.

Die Lösung mit Vakuumglas innen zeigt im Vergleich zur Lösung mit Floatgläsern niedrigere Temperaturen, was auf eine erhöhte Kondensat- und Vereisungsneigung auf der Innenseite des Außenflügels schließen lässt. Diese Simulationen sind jedoch nur als eine erste Annäherung zu verstehen, da hier bewusst andere Aspekte (Dichtungen, Material des Randgewändes, Wärmeeintrag über die umrandenden Wände nicht berücksichtigt wurden.

Man könnte aber auch argumentieren, dass aus einer Komfortbetrachtung heraus sich in dieser Grafik die höheren Oberflächentemperaturen auf dem Innenflügel als potentiell vorteilhaft zeigen.

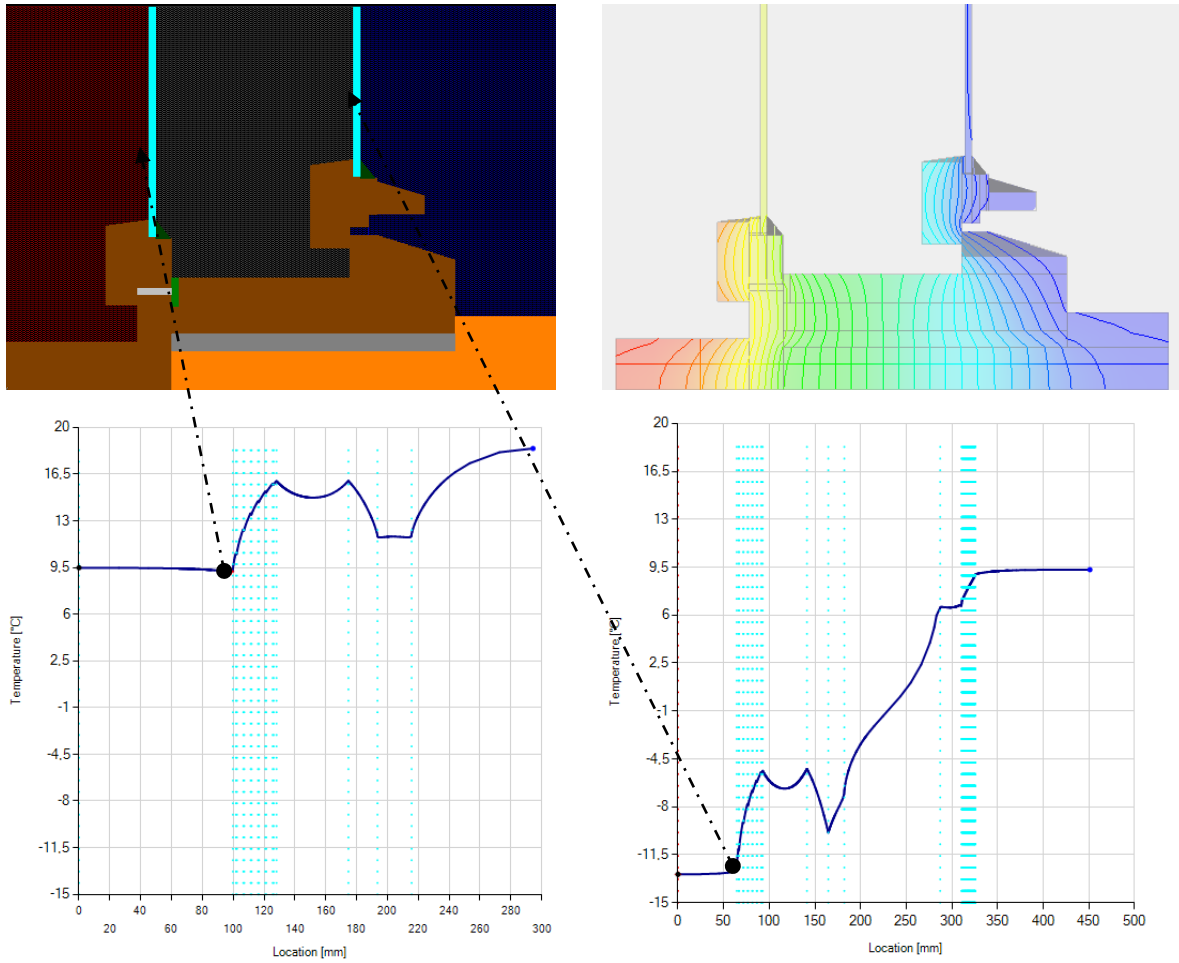


Abbildung 17: Oben - Links: Konstruktionsaufbau mit Materialzuweisung (vgl. Tabelle 7 und Tabelle 8); oben - rechts: Falschfarbenbild mit Temperaturverteilung durch den Querschnitt

Unten: Temperaturverlauf entlang der Oberfläche – links: Innenraum, rechts: Bufferraum

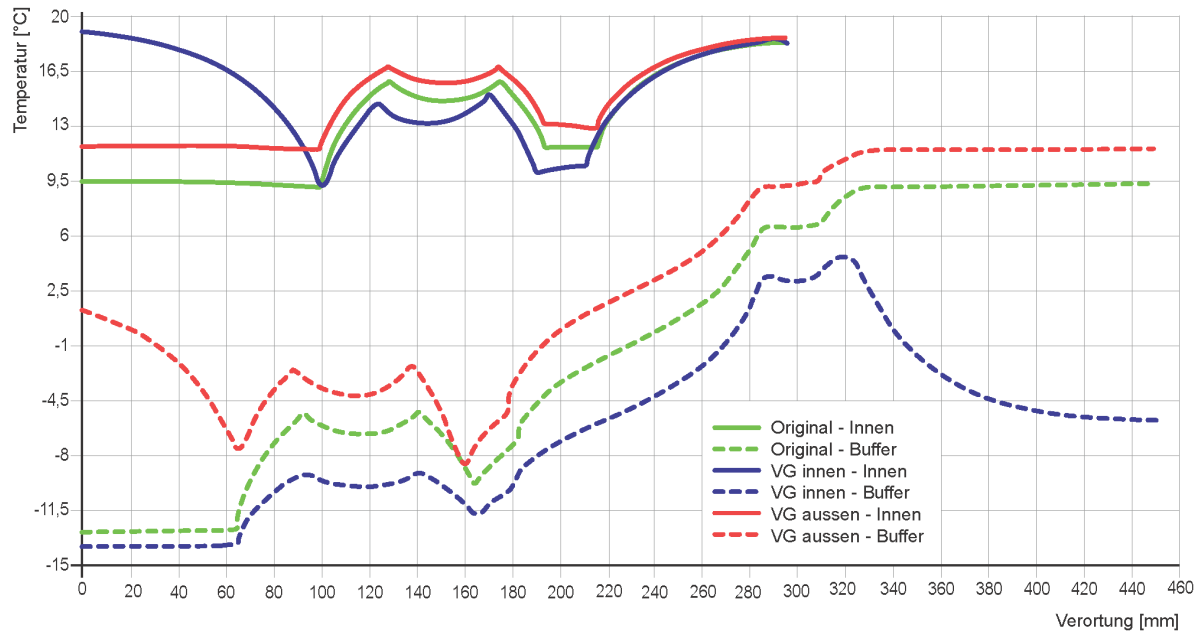


Abbildung 18: Temperaturkurven an der Innenoberfläche (Innen) und Oberfläche im Bufferraum (Buffer) aller drei Anwendungsfälle (i) Vakuumglas innen (VG innen), (ii) Vakuumglas außen (VG aussen) und (iii) Floatglas in beiden Ebenen (Original)

Simulationsergebnisse der Objekte im Überblick

Nachstehende Tabelle 9 zeigt die Simulationsergebnisse für die unterschiedlichen Realobjekte, einmal gegliedert nach "Applikationsform", einmal gegliedert nach den Objekten. Hier wurden die tatsächlichen Konstruktionen, d.h. die Geometrie und die baulichen Randbedingungen (Wandmaterial, Gewändematerial) berücksichtigt, jedoch wurden die Innen- und Außenrandbedingungen mit 20 Grad und -10 Grad gleich angenommen. Interessanterweise zeigen die unterschiedlichen Konstruktionsarten/Konstruktionsprinzipien der Kastenfenster (in der Leibung liegend, außenbündig, etc.) keine allzu großen Abweichungen voneinander (um 1 Kelvin). Ein Ausreißer ist das Doppelrahmenstockfenster des Stiftes Wilhering, bei welchem ein um das Kastenfenster laufendes, hochleitendes Steingewände vorzufinden ist.

Tabelle 9: Ergebnisindikatoren im Überblick (Θ_{Luft} : Lufttemperatur; $\Theta_{\text{si,min}}$: Mindestoberflächentemperatur; f_{Rsi} : Temperaturfaktor für die raumseitige Oberfläche)

	Θ_{Luft}		$\Theta_{\text{si,min}}$		f_{Rsi}	
	Buffer	Innen	Buffer	Innen	Buffer	
Floatglas in beiden Ebenen						
Schloss Puchberg	2.93	10.85	-8.19	0.69	0.15	
Villa Wasserman	1.18	10.45	-8.33	0.68	0.15	
Stift Wilhering	-1.53	8.75	-8.73	0.63	0.15	
Amt d. Tiroler Landesregierung	1.92	10.67	-8.22	0.69	0.15	
Vakuumglas innen						
Schloss Puchberg	-2.40	11.04	-8.86	0.70	0.15	
Villa Wasserman	-2.48	11.52	-8.85	0.72	0.15	
Stift Wilhering	-5.59	9.58	-9.34	0.65	0.15	
Amt d. Tiroler Landesregierung	-2.89	10.53	-8.94	0.68	0.15	

Vakuumglas aussen

Schloss Puchberg	6.23	12.88	-2.86	0.76	0.44
Villa Wasserman	5.60	12.64	-3.29	0.75	0.43
Stift Wilhering	0.19	9.58	-8.07	0.65	0.19
Amt d. Tiroler Landesregierung	5.62	12.52	-5.37	0.75	0.30

Isolierglas innen

Amt d. Tiroler Landesregierung	-1.99	11.94	-8.82	0.73	0.15
--------------------------------	-------	-------	-------	------	------

5.3. Labortests physischer Prototypen (Gebrauchstauglichkeitstests)

5.3.1. Bedienkräfte, Luftdurchlässigkeit, Schlagregendichtheit und Windwiderstandsfähigkeit

Es sollte untersucht werden, inwieweit die entwickelten Prototypen die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit erfüllen. Diese Untersuchungen sollen aufzeigen, ob es möglich ist, auch in der Sanierung, die im Rahmen des CE-Zeichens, der OIB-Richtlinien und der ÖNORM geforderten Anforderungen zu erfüllen.

Probekörper

Zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit hinsichtlich der Bedienkräfte, Luftdurchlässigkeit, Schlagregendichtheit und Windwiderstandsfähigkeit wurden folgende drei Prototypen unterschiedlicher Hersteller für die Versuche ausgewählt (siehe auch Abbildung 19).

Prototyp: 2-flügeliges Rahmenpfostenstockfenster ohne Oberlicht

- Außen- und Innenfenster nicht zur bewitterten Seite öffnend,
- STAM Innenfenster: 1460 x 1978 mm,
- STAM Außenfenster und Kastenstock: 1341 x 1883 mm,
- Hersteller: Zoller-Prantl Gesellschaft m.b.H., Kalkofenstraße 20, 6425 Haiming/Tirol

Prototyp: 2-flügeliges Leistenpfosten-Kastenfenster mit Klipp-Klapp-Oberlichte

- 2-flügelige Fenster und Oberlichte innen nicht zur bewitterten Seite öffnend bzw. Oberlichte außen zur bewitterten Seite öffnend,
- STAM: 1510 x 2510 mm,
- Hersteller: Tischlerei Alois Winkler, Maria Schmolln 84, 5241 Maria Schmolln

Prototyp: 2-flügeliges Rahmenpfostenstockfenster mit 2-flügeliger Oberlichte

- Außen- und Innenfenster zur nicht bewitterten Seite öffnend,
- STAM Innenfenster: 1438 x 2658 mm,
- STAM Außenfenster und Kastenstock: 1330 x 2558 mm,
- Hersteller: Schaden Fenstersanierung GmbH, Jagerberg 91, 8091 Jagerberg



Abbildung 19: Ansicht der Prototypen von innen (von links nach rechts): Prototyp Zoller, Prototyp Winkler, Prototyp Schaden

Versuche

Zur Ermittlung der Gebrauchstauglichkeit wurden die drei Prototypen folgenden Untersuchungen unterzogen. Die Versuche wurden gemäß den relevanten Prüfnormen durchgeführt um Vergleiche zu marktüblichen (Kasten-) Fensterkonstruktionen ziehen zu können.

- Bedienungskräfte gemäß EN 12046-1
- Luftdurchlässigkeit gemäß EN 1026
- Schlagregendichtheit gemäß EN 1027
- Windwiderstandsfähigkeit gemäß EN 12211

Anmerkung zur Prüfung der Schlagregendichtheit: Wassereintritt wurde als solcher bewertet, sobald Wasser die Entwässerungsebene der Außenfenster überschritten hatte.

Informationen zu den Prüfverfahren, zu der Vorgehensweise bei der Prüfung und zu den verschiedenen Teilprüfungen sind den Anhängen zu entnehmen.

Vertreter der jeweiligen Fensterherstellbetriebe waren während der Versuche zeitweise anwesend.

Prototyp: 2-flügeliges Rahmenpfostenstockfenster ohne Oberlicht

Die Untersuchung des Prototyps erfolgte in mehreren Etappen.

1. Am 08.01.2020 wurden am Fenster mit der Lieferschein Nr. 671/20 die oben genannten Versuche vollständig durchgeführt. Da das Ergebnis der Schlagregendichtheitstests den Anforderungen des Fensterherstellers nicht genügte sollte das Fenster modifiziert und neuerlich getestet werden.
2. Am 06.02.2020 wurden Wiederholungstests der Schlagregendichtheit am Fenster mit der Lieferschein Nr. 671/20 (Stock, Innenflügel, Außenflügel) durchgeführt und zusätzlich Versuche mit alternativen Außenflügeln Lieferschein Nr. 680/20

(Außenflügel neu). Da das Ergebnis der Schlagregendichtheitstests den Anforderungen des Fensterherstellers neuerlich nicht genügt sollte das Fenster modifiziert und neuerlich getestet werden.

- Am 19.05.2020 wurden Wiederholungstests der Schlagregendichtheit sowie der Bedienkräfte der Außenflügel am Fenster mit der Lieferschein Nr. 671/20 (Stock modifiziert: zusätzliche Stockdichtung seitlich beim Außenfenster), Lieferschein Nr. 671/20 (Innenflügel) und Lieferschein Nr. 680/20 (Außenflügel neu) durchgeführt.

In den Tabelle 10 bis 12 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit für die drei Prototypen zusammengefasst. Dabei wurde gemäß den relevanten Klassifizierungsnormen klassifiziert. Zusätzlich erfolgt die Zuordnung zu den daraus abgeleiteten Beanspruchungsklassen gemäß ÖNORM B 5300.

Tabelle 10: Klassifizierung der untersuchten Eigenschaften des Prototyps Zoller

Fenstertyp (Prüfkörper)	2-flügeliges ZP-Rahmenpfostenstockfenster aus Holz	
STAM	1460 x 1978 mm	
Teilprüfung	Klassifizierung	Beanspruchungsklasse lt. ÖNORM B 5300
Luftdurchlässigkeit Prüfung gem. EN 1026 Klassifizierung gem. EN 12207	Klasse 4	≥ Klasse 4
Schlagregendichtheit Prüfung gem. EN 1027 Klassifizierung gem. EN 12208	Klasse 5A	Klasse 2 ¹
Windwiderstandsfähigkeit Prüfung gem. EN 12211 Klassifizierung gem. EN 12210	Klasse C4	Klasse 4
Luftdurchlässigkeit nach Windlast ² Prüfung gem. EN 1026 Klassifizierung gem. EN 12207	Klasse 3	Klasse 3
Festigkeit/Bedienkräfte Prüfung gem. EN 12046-1 Klassifizierung gem. EN 13115	Klasse 1	erfüllt
Anmerkungen: ¹ Anforderungen erfüllt für den Einbau in nicht geschützter Lage, in teilweise geschützter Lage und in geschützter Lage. ² Wird für ein Produkt die Luftdurchlässigkeitsklasse gleichzeitig mit der Klasse der Windwiderstandsfähigkeit angegeben, darf laut EN 12210 nur die, in Verbindung mit der Prüfung der Widerstandsfähigkeit gegen Windlast erreichte (in diesem Fall niedrigere) Luftdurchlässigkeitsklasse angegeben werden.		

Gemäß ÖNORM B 5300 sind 2-flügelige Rahmenpfostenstockfenster aus Holz (Prototyp Zoller) bis zu einer Gesamthöhe von 1978 mm und einer maximalen Gesamtfläche von 2,9 m² Beanspruchungsklasse 2 zuzuordnen.

Prototyp: 2-flügeliges Leistenpfosten-Kastenfenster mit Klipp-Klapp-Oberlichte

Tabelle 11: Klassifizierung der untersuchten Eigenschaften des Prototyps Winkler

Fenstertyp (Prüfkörper)	2-flügeliges Leistenpfosten-Kastenfenster aus Holz mit Klipp-Klapp-Oberlichte	
STAM	1510 x 2510 mm	
Teilprüfung	Klassifizierung	Beanspruchungsklasse lt. ÖNORM B 5300
Luftdurchlässigkeit Prüfung gem. EN 1026 Klassifizierung gem. EN 12207	Klasse 4	≥ Klasse 4
Schlagregendichtheit Prüfung gem. EN 1027 Klassifizierung gem. EN 12208	Klasse E900	Klasse 900
Festigkeit/Bedienkräfte Prüfung gem. EN 12046-1 Klassifizierung gem. EN 13115	Klasse 1	erfüllt
<u>Klassifizierung für Windlasten bis Klasse 4:</u>		
Windwiderstandsfähigkeit Prüfung gem. EN 12211 Klassifizierung gem. EN 12210	Klasse C4	Klasse 4
Luftdurchlässigkeit nach Windlast ¹ Klasse 4 Prüfung gem. EN 1026 Klassifizierung gem. EN 12207	Klasse 4	≥ Klasse 4
<u>Klassifizierung für höhere Windlasten (Klasse 5):</u>		
Windwiderstandsfähigkeit Prüfung gem. EN 12211 Klassifizierung gem. EN 12210	Klasse C5	Klasse 5
Luftdurchlässigkeit nach Windlast ¹ Klasse 5 Prüfung gem. EN 1026 Klassifizierung gem. EN 12207	Klasse 3	Klasse 3
Anmerkungen: 1 Wird für ein Produkt die Luftdurchlässigkeitsklasse gleichzeitig mit der Klasse der Windwiderstandsfähigkeit angegeben, darf laut EN 12210 nur die, in Verbindung mit der Prüfung der Widerstandsfähigkeit gegen Windlast erreichte (gegebenenfalls niedrigere) Luftdurchlässigkeitsklasse angegeben werden.		

Gemäß ÖNORM B 5300 sind 2-flügeliges Leistenpfosten-Kastenfenster aus Holz mit Klipp-Klapp-Oberlichte (Prototyp Winkler) bis zu einer Gesamthöhe von 2510 mm und einer maximalen Gesamtfläche von 3,8 m² Beanspruchungsklasse 4 zuzuordnen.

Prototyp: 2-flügeliges Rahmenpfostenstockfenster mit 2-flügeliger Oberlichte

Tabelle 12: Klassifizierung der untersuchten Eigenschaften des Prototyps Schaden

Fenstertyp (Prüfkörper)	2-flügeliges Rahmenpfostenstockfenster mit 2-flügeliger Oberlichte aus Holz	
STAM	1438 x 2658 mm	
Teilprüfung	Klassifizierung	Beanspruchungsklasse lt. ÖNORM B 5300
Luftdurchlässigkeit Prüfung gem. EN 1026 Klassifizierung gem. EN 12207	Klasse 4	≥ Klasse 4
Schlagregendichtheit Prüfung gem. EN 1027 Klassifizierung gem. EN 12208	keine Klassifizierung	nicht geschützte Lage: Anforderung nicht erfüllt teilweise geschützte Lage: Anforderung nicht erfüllt geschützte Lage: keine Anforderung ¹

Windwiderstandsfähigkeit Prüfung gem. EN 12211 Klassifizierung gem. EN 12210	Klasse C3 / B4	Klasse 4
Luftdurchlässigkeit nach Windlast Prüfung gem. EN 1026 Klassifizierung gem. EN 12207	Klasse 4	Klasse 4
Festigkeit/Bedienkräfte Prüfung gem. EN 12046-1 Klassifizierung gem. EN 13115	Klasse 2	erfüllt
Anmerkungen: ¹ Die Zuordnung zu einer Beanspruchungsklasse ist von der Einbausituation abhängig.		

Gemäß ÖNORM B 5300 sind 2-flügelige Rahmenpfostenstockfenster mit 2-flügeliger Oberlichte aus Holz (Prototyp Schaden) bei Einbau in „geschützter Lage“ bis zu einer Gesamthöhe von 2658 mm und einer maximalen Gesamtfläche von 3,8 m² gemäß ÖNORM B 5300 Beanspruchungsklasse 4 zuzuordnen.

Die Anforderungen an die Einbausituationen „nicht geschützte Lage“ und „teilweise geschützte Lage“ laut ÖNORM B 5300 werden nicht erfüllt.

Conclusio

Die drei untersuchten Kastenfenstertypen zeigten typische Performencewerte zeitgemäßer Fenster. Lediglich das 2-flügelige Rahmenpfostenstockfenster mit 2-flügeliger Oberlichte zeigte im Bereich des Kämpferprofils Schwächen in Bezug auf die Schlagregendichtheit, die aber durch Profiländerungen behoben werden können.

5.3.2. Schallschutz

In dieser Untersuchung soll das akustische Verhalten von Kastenfenstern mit Vakuumverglasungen untersucht werden. Im Vergleich dazu werden verschiedene Standardverglasungen mit untersucht. Im Allgemeinen findet man wenig Literatur über das schalltechnische Verhalten von Kastenfenstern. Eine grobe Einordnung bietet die Übersicht in Tabelle 13. Im Wesentlichen wird die Schalldämmung von Fenstern bzw. Kastenfenstern von den folgenden Faktoren bestimmt:

- Verglasung: Art und Dicke der Scheiben, Scheibenzwischenraum (SZR) bei Mehrfachisolierverglasungen (MGI)
- Funktionsfuge: Art und Anzahl der Dichtungen bzw. Dichtungsebenen
- Rahmenkonstruktion: Art und Typ des Rahmens
- Einbaufuge: Art und Ausbildung des Wandanschlusses

Tabelle 13: Schallschutzklassen von Fenstern nach VDI 2719 (es werden hier nur Kastenfenster angegeben)

Schallschutz- klasse	Bewertetes Schalldämm-Maß R'_w (In-situ, Baustelle)	Bewertetes Schalldämm-Maß R_w , (Prüfstand)	Typische Konstruktionen
in dB			
1	25 bis 29	≥ 27	Kastenfenster ohne besondere konstruktive Anforderungen
2	30 bis 34	≥ 32	Kastenfenster ohne besondere konstruktive Anforderungen
3	35 bis 39	≥ 37	Kastenfenster mit einer Dichtungsebene

Schallschutz- klasse	Bewertetes Schalldämm-Maß R'_w (In-situ, Baustelle)	Bewertetes Schalldämm-Maß R_w , (Prüfstand)	Typische Konstruktionen
4	40 bis 44	≥ 42	Kastenfenster mit zwei Dichtungsebenen, Gesamtglasdicke ≥ 8 mm, Scheibenzwischenraum ≥ 100 mm
5	45 bis 49	≥ 47	Kastenfenster mit zwei Dichtungsebenen, Gesamtglasdicke ≥ 12 mm, Scheibenzwischenraum ≥ 100 mm
6	> 50	≥ 52	Kastenfenster mit getrenntem Blendrahmen, besonderer Dichtung, sehr großem Scheibenzwischenraum und Verglasung aus Dickglas

Das Kastenfenster kann im Allgemeinen mit folgenden Maßen definiert werden. Es besteht aus zwei voneinander unabhängigen Flügelrahmen. Diese müssen nacheinander geöffnet werden im Vergleich zu Einfach- und Verbundfenstern. In der Regel besteht der Blendrahmen von Kastenfenstern aus einem System, bei besonderen Anforderungen (baulicher oder schalltechnischer Natur) kann dieser auch getrennt vorliegen. In diesem Fall besitzt jeder Flügelrahmen einen separaten Blendrahmen.

Material

Untersucht wurde ein Kastenfenstersystem mit folgendem Aufbau:

- 2-flügeliges Leistenpfosten-Kastenfenster aus Holz, empfangsraumseitig öffnend mit einer Dichtungsebene innen (2-flügelige Fenster innen und außen), Stockaußenmaß (STAM) (1230 × 1480) mm, Hersteller: Tischlerei Alois Winkler, Maria Schmolln 84, 5241 Maria Schmolln (siehe Abbildung 20)

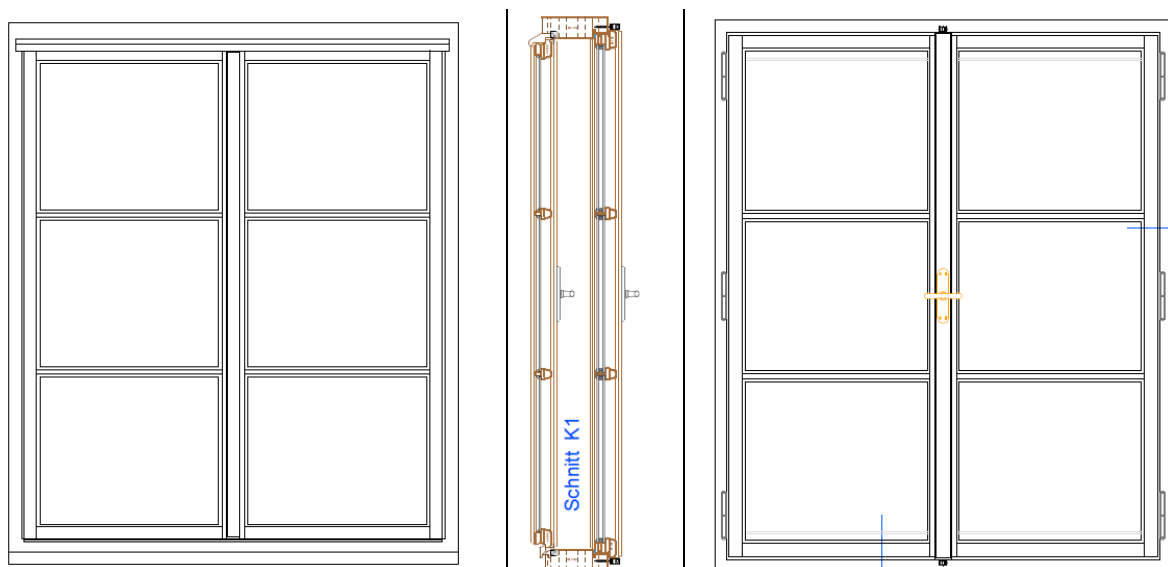


Abbildung 20: Zeichnung des Kastenfenster (erstellt von Tischlerei Alois Winkler), linke Seite Außenansicht, Mitte Schnitt (links außen und rechts innen), rechte Seite Außenansicht

Bei diesem Kastenfenster war der Blendrahmen generell aus Holz gefertigt und durchgehend. Bei einer Messserie war der Blendrahmen aber aus Heraklith-Holzwoleplatten gefertigt. Damit der Scheibenabstand bzw. Verglasungsabstand (SA) zwischen den Flügeln variiert werden konnte war das Kastenfenster so konstruiert, dass verschieden tiefe Blendrahmen zwischen den Flügelrahmen eingefügt werden konnten. Mit dieser Systematik konnten folgende Abstände eingestellt werden (Zuordnung siehe Abbildung 21):

- SA(1) = SA 121 mm, beide Flügelrahmen aus Holz mit einem Abstand von 87 mm und Blendrahmen aus Holz
- SA(2) = SA 171 mm, beide Flügelrahmen aus Holz mit einem Abstand von 137 mm und Blendrahmen aus Holz
- SA(3) = SA 271 mm, beide Flügelrahmen aus Holz mit einem Abstand von 237 mm und Blendrahmen aus Holz
- SA(4) = SA 271 mm, beide Flügelrahmen aus Holz mit einem Abstand von 237 mm und Blendrahmen aus Heraklith

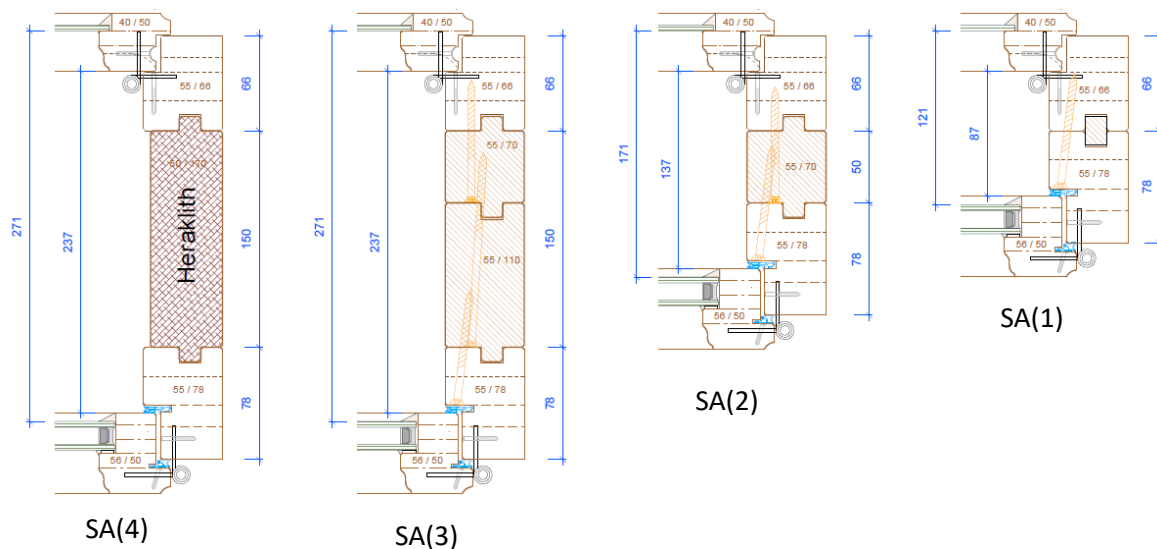


Abbildung 21: Zeichnung des Kastenfenster (erstellt von Tischlerei Alois Winkler), in dem die Scheibenabstände (SA), von rechts nach links) dargestellt sind.

Zur Untersuchung der unterschiedlichen Verglasungsvarianten wurden vier Außenflügelpaare und neun Innenflügelpaare verwendet. Von den jeweils zwei mit und ohne Sprossen ausgeführt waren (siehe

Tabelle 14). Es wurden Einfachgläser (EG), Sicherheitsverbundgläser mit Akustikfolie (VSGa), Mehrscheibenisolierverglasungen (MIG) und Vakuumglas verwendet. Bei dem Vakuumglas war ein VSGa-System dabei bei dem ein Einfachglas mit einer Akustikfolie laminiert war. Der Pillarabstand bei den verwendeten Vakuumgläsern betrug 20 mm × 20 mm. Der Aufbau und die Untersuchung von Vakuumgläsern soll hier näher beschreiben werden. Alle hier verwendeten Vakuumgläser stammen von dem Hersteller FINEO (by AGC), Belgien. Die restlichen EG, VSGa und MIG Verglasungen wurden von einem anderen Hersteller geliefert.

Tabelle 14: Übersicht der untersuchten Verglasungen

Verglasung (Benennung)	SZR	Beschreibung	Flügeltyp	Flächenmasse (Flügel)
	in mm			in kg/m ²
4(S)	--	EG mit Sprossen	außen	15,3
6(S)	--	EG mit Sprossen	außen	19,5
6	--	EG ohne Sprossen	außen	19,4
33.8a	--	VSGa ohne Sprossen	außen	20,2
4	--	EG ohne Sprossen	innen	16,8
44.8a	--	VSGa ohne Sprossen	innen	27,5
4-10-4(S)	10	(Zweischeiben) MIG mit Sprossen	innen	27,7
6-10-4(S)	10	(Zweischeiben) MIG mit Sprossen	innen	32,4
6-10-4	10	(Zweischeiben) MIG ohne Sprossen	innen	31,2
33.8a-10-4	10	(Zweischeiben) MIG ohne Sprossen mit VSGa	innen	32,1
4v4	0.5	Vakuumglas symmetrisch ohne Sprossen	innen	26,5
6v4	0.5	Vakuumglas asymmetrisch ohne Sprossen	innen	32,6
4v4L3a	0.5	Vakuumglas laminiert (L) mit EG (VSGa), asymmetrisch	innen	33,8

Methoden

Messverfahren Schalldämm-Maß R:

Die Luftschallmessungen wurden gemäß ÖNORM EN ISO 10140-2:2010 im Akustik Center Austria (ACA), dem Schalllabor der Holzforschung Austria, durchgeführt. Die Bewertung der Messergebnisse erfolgte nach ÖNORM EN ISO 717-1:2013 im normativ relevanten Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz. Alle Messungen erfolgten aber im bauakustischen Frequenzbereich von 50 Hz bis 5000 Hz. Das ist sinnvoll, um den tiefen Frequenzbereich mit abzudecken und Anpassungswerte berechnen zu können. Diese werden benutzt, um bei den Bewertungen die Frequenzbereiche mit abzudecken die normativ nicht betrachtet werden. Vor allem bei Außenbauteilen wie Fenstern, Außenwänden und Fassaden ist dies ein wichtiger Bestandteil zur Einschätzung des Bauteils.

Bewertetes Schalldämm-Maß und Spektrum-Anpassungswerte:

Die frequenzabhängige Messung der Schalldämmung erfolgt üblicherweise in Terzbändern. In der Praxis ist dies für die akustische Planung von Bauteilen sehr unhandlich. In der Regel wird dort die Einzahlwertangabe (das bewertete Schalldämm-Maß R_w) verwendet. Dies gibt die Luftschalldämmung des jeweiligen Bauteils an. Die Bestimmung erfolgt über den Vergleich der gemessenen Kurve mit einer genormten Bezugskurve. Die Bezugskurve wird so lange verschoben, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen maximal ist, aber nicht größer als 32 dB wird. Ist dieser Zustand erreicht, wird das bewertete Schalldämm-Maß an der verschobenen Kurve bei einer Frequenz von 500 Hz abgelesen und ein ganzzahliger Wert gebildet. Dieser ist in der baulichen Praxis ausreichend und zweckmäßig.

Bei Parameterstudien wie in dieser Untersuchung kann dieses Vorgehen aber zu ungenau sein und die Unterschiede zwischen den einzelnen Parametern werden nicht sichtbar. Aus diesem Grund wurde in diesem Fall der Einzahlwert mit einer Genauigkeit von 0,1 dB und nicht mit 1 dB bestimmt.

Um das bewertete Schalldämm-Maß besser an die menschliche Wahrnehmung anzupassen und um den Frequenzbereich von 50 Hz bis 80 Hz mit zu betrachten, werden Spektrum-Anpassungswerte mit berechnet. Diese Anpassungswerte werden im Bedarfsfall additiv zum Einzahlwert gezählt. Die Werte können sowohl negativ als auch positiv sein und somit R_w verbessern bzw. verringern. Es gibt verschiedene Spektrum-Anpassungswerte auf hier nicht alle eingegangen werden soll. Im Allgemeinen werden bei Außenbauteilen die C_{tr} ($tr = \text{Traffic}$) Anpassungen verwendet, da diese den tieffrequenten Bereich stärker gewichten. Aus diesem Grund werden bei dieser Untersuchung die Anpassungen:

- $C_{tr} = C_{tr,100-5000}$ Betrachtung des tieffrequenten Bereiches im Rahmen des normativen Bereiches
- $C_{tr,50} = C_{tr,50-5000}$ Betrachtung des tieffrequenten Bereiches bei den der erweiterte Frequenzbereich von 50 Hz bis 80 Hz

mitgeführt wird. Da der Einzahlwert mit der Genauigkeit von 0,1 dB bestimmt wird, werden die beiden Anpassungswerte auch mit dieser Genauigkeit benutzt.

Verbesserung der Schalldämmung durch das Kastenfenstersystem

Die Schallschutzwirkung von Kastenfenstern durch Variation des Abstandes, der Blendrahmen und der Verglasungen usw. kann über die Verbesserung dargestellt werden. Für die Frequenzbetrachtung kann Gleichung (3) verwendet werden.

$$\Delta R = R - R_0 \quad (3)$$

R gibt das Schalldämm-Maß des „modifizierten“ Bauteils und R_0 das Schalldämm-Maß des Grundbauteils (an den die Modifikation vorgenommen wurde) an. Fällt ΔR positiv aus entsteht ein Zuwachs und bei negativen Werten eine Verringerung der Schalldämmung. Da ΔR eine frequenzabhängige Größe ist wird diese in der Regel als Terzspektrum dargestellt. Diese Verbesserung kann analog für die Einzahlwertbetrachtung bzw. für Einzahlwertbetrachtung mit Anpassung durchgeführt werden. Die wird mit den zwei Gleichungen (4) und (5) beschrieben.

$$\Delta R_w = R_w - R_{w,0} \quad (4)$$

$$\Delta(R_w + C_{tr}) = (R_w + C_{tr}) - (R_w + C_{tr})_0 \quad (5)$$

R_w und $R_{w,0}$ geben in Formel (4) das bewertete Schalldämm-Maß des Grundbauteils mit und ohne Modifikation an. Für (5) gilt das gleiche und der Index 0 steht für das Grundbauteil. In dieser Gleichung kann die Anpassung C_{tr} durch jede beliebige andere, wie zum Beispiel $C_{tr,50}$ ersetzt werden.

Einfluss der Resonanzfrequenz:

Bei zweischaligen Bauteilen tritt eine Resonanzfrequenz f_R auf die in den meisten Fällen einen entscheidenden Einfluss auf die Schalldämmung hat. Damit lässt sich der Frequenzverlauf bezogen auf die Verbesserung in vier spezifische Bereiche einteilen:

- $f \ll f_R$ Frequenzen die weit unter der Resonanzfrequenz liegen, verhält sich das Bauteil akustisch neutral, das heißt $\Delta R \approx 0$
- $f \approx f_R$ Im Gebiet der Resonanzfrequenz wird das Bauteil sehr „durchlässig“ und die Schalldämmung fällt ab. Das heißt die Verbesserung wird kleiner Null ($\Delta R < 0$).
- $f_R \leq f \leq f_K$ Über der Resonanzfrequenz steigt die Schalldämmung mit 12 dB/Oktave. Damit erreicht man eine starke Verbesserung und somit sollte die Resonanz so tieffrequent wie möglich abgestimmt werden.
- $f \gg f_K$ Bei hohen Frequenzen kann sich eine Abflachung der Schalldämmung ausbilden. Der Punkt, an dem dieses Abflachen auftritt, wird als Knickfrequenz f_K bezeichnet.

Die Resonanzfrequenz kann wie folgt mit Gleichung (6) berechnet werden.

$$f_R = 160 \cdot \sqrt{s'_L \cdot \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (6)$$

In der Formel ist s'_D die dynamische Steifigkeit der Dämmschicht (in diesem Fall Luft) in MN/m^3 , m'_1 die Flächenmasse des jeweiligen Außenflügels in kg/m^2 und m'_2 die Flächenmasse des jeweiligen Innenflügels in kg/m^2 . Die dynamische Steifigkeit der Luftschicht wurde für diesen Fall mit der Beziehung (7) bestimmt.

$$s'_L = \frac{0,111 \text{ MN/m}^2}{d} \quad (7)$$

Mit d ist der Abstand der beiden Schalen (hier SA) in Meter festgelegt. Mit den genannten Annahmen lagen die rechnerisch ermittelten Resonanzfrequenzen in einen Bereich von 30 Hz bis 60 Hz. Aus diesem Grund wird die Resonanzfrequenz bei der Auswertung nicht eingehender betrachtet.

Einbausituation im Fenster-Prüfstand:

Prüfstand: Die Messungen erfolgten im M-Prüfstand (Standardprüfstand für Schallmessungen) des ACA. Der Prüfstand wurde gemäß den Anforderungen an Prüfstände, festgelegt in ÖNORM EN ISO 10140-1:2016 und ÖNORM EN ISO 10140-5:2014, ohne Schallnebenwege errichtet.

Einbausituation: Das Kastenfenster wurde auf der Senderaumseite in die normierte Prüföffnung (Fensteröffnung) mit den Abmessungen $(1500 \times 1250) \text{ mm}^2$ eingebaut. Dafür wurde der äußere Flügelrahmen so eingebaut, dass der Außenflügel bündig mit der Prüfwand abschloss. Da das STAM $(1230 \times 1480) \text{ mm}^2$ betrug wurde umlaufen eine Fuge von 10 mm zwischen Rahmen und Prüföffnung eingestellt. Auf der unteren Laibung der Öffnung wurden zwei Tragklötze (mit einer Dicke von 10 mm), circa 300 mm von den vertikalen Laibungen entfernt platziert. Auf diesen wurde der Rahmen des Kastenfensters aufgesetzt. Zwei vergleichbare Klotzpunkte lagen an der Oberseite der Öffnung. Diese sind nur temporär und dienen dazu das Kastenfenster für den Einbau zu stabilisieren. Diese Fuge wurde dann zuerst senderaumseitig mit Fensterkitt (Illbruck OS201) aufgespritzt. Am Anschluss wurde empfangsraumseitig noch etwas Klemmfilz in die Fuge gestopft und mit Fensterkitt analog zum Senderaum mit Fensterkitt geschlossen. Diese Systematik für den Einbau konnte für die zwei SA 121 mm und 171 mm ausgeführt werden (siehe Abbildung 22).



Abbildung 22: Einbausituation des Kastenfensters bei SA 121 mm und SA 171 mm, links senderraumseitig und rechts empfangsraumseitig

Die Prüföffnung befindet sich in einer doppelschaligen Prüfwand bestehend aus zwei 190 mm dicken Stahlbetonwänden, welche durch einen 30 mm dicken, mit Mineralwolle ausgedämmten, Spalt körperschallbrückenfrei getrennt sind. Auf der Empfangsraumseite beträgt die Prüföffnung (1620 × 1310) mm².

Bei dem Einbau des Kastenfensters mit SA 271 mm war die Einbautiefe größer als die Tiefe der ersten Schale der doppelschaligen Betonwand. Somit ragte das Fenster in die Prüföffnung des Empfangsraumes. Damit war der Spalt größer als das im Senderraum der Fall ist. Dieser wurde mit Trittschalldämmung ausgefüllt und Fensterkitt abgeschlossen (siehe Abbildung 23).



Abbildung 23: Empfangsraumseitige Einbausituation des Kastenfensters bei SA 271 mm

Ergebnisse und Diskussion der Untersuchung

In diesem und den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der durchgeführten Messungen dargestellt. Tabelle 15 zeigt die Übersicht der ermittelten Einzahlwerte aus der Untersuchung (insgesamt 83 Messungen). Für die Ermittlung der Verbesserungen von dem Kastenfenstersystem wurden aber nur einzelne Ergebnisse verwendet. Diese sind in Tabelle 15 gekennzeichnet, um die Übersichtlichkeit zu erhalten.

Aus akustischer Sicht wurden die Verglasungen die hauptsächlich verwendet wurden in zwei Kategorien eingeteilt:

- „schwach“
 - Außen (A) 4 mm EG mit Sprossen
 - Innen (I) 4 mm EG ohne Sprossen und 4-10-4 MIG mit Sprossen
- „stark“
 - Außen (A) 33.8a (VSGa) ohne Sprossen
 - Innen (I) 33.8a-10-4 MIG und 4v4L3a Vakuumglas mit VSGa ohne Sprossen

Der Fokus der Messserie lag prinzipiell bei Vakuumglas mit einem SA(2) mit 137 mm. Zum Vergleich bzw. um spezielle Effekte anzugeben werden auch einzelne Frequenzverläufe gezeigt und diskutiert.

Tabelle 15: Übersicht der ausgeführten Messungen mit den ermittelten Einzahlwerten in dB. Die Werte die Ermittlung der Verbesserung verwendet wurden sind fett geschrieben. * Die Außenflügel abgelebt. ^H der Blendrahmen bestand aus Heraklit

Verglasung Außen	Innen SA Sprossen	Nein	EG	VSGa	Zweischeiben-MIG				Vakuumglas			
			4 Nein	44.8a Nein	4-10-4(S) Ja	6-10-4(S) Ja	6-10-4 Nein	33.8a-10-4 Nein	4v4 Nein	6v4 Nein	4v4L3a Nein	
Nein	121		31,6	34,9	33,5	35,7	35,2	38,3	35,9	36,0	39,0	
4(S)	121	Ja	20,6	38,2		41,0						
6(S)	121	Ja	20,2									
6	121	Nein	20,7									
33.8a	121	Nein	20,5					45,0			45,5	
4(S)	171	Ja		40,1	43,4	43,1	44,0	44,0	46,1	43,5	43,6	46,1
6(S)	171	Ja		40,6	44,0	44,0	44,7	44,8	47,0	44,2	43,6	46,8
6	171	Nein		40,6	44,0	43,9	45,0	44,8	47,0	44,3	43,9	47,0
33.8a	171	Nein		41,1	44,6	44,6	45,4	45,3	47,8	44,4	44,3	47,5
4(S)*	171	Ja	25,2	45,4		48,1			50,7	48,5		50,3
6(S)*	171	Ja	25,0									50,7
6*	171	Nein	24,2									50,8
33.8a*	171	Nein	24,8	45,3		48,7			51,9	48,7		51,3
4(S)	271	Ja		41,7		45,4			49,7			48,2
6(S)	271	Ja										
6	271	Nein										
33.8a	271	Nein							50,2			48,5
4(S) ^H	271	Ja		49,2		50,5			54,5			54,5
6(S) ^H	271	Ja										
6 ^H	271	Nein										
33.8a ^H	271	Nein							56,2			55,9

Außenflügel (A), allein

In Abbildung 24 wird die Systematik der untersuchten Konfiguration dargestellt.

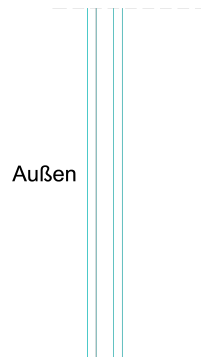


Abbildung 24: Außenflügel (A), allein – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert.

In diesem Fall wurden die Außenflügel allein, ohne Innenflügel, gemessen. Der Referenzflügel (außen) der zur Berechnung der Verbesserung verwendet wurde, hatte ein 4 mm EG mit Sprossen. Die sich daraus ergebenden Werte werden in Abbildung 25 dargestellt. Auf der linken Seite des Diagrammes zeigen sich leichte Schwankungen im Einzahlwert, die sich aus der verwendeten Genauigkeit ergeben. Ohne diese ist kein Unterschied im Einzahlwert erkennbar. Zusätzlich ergeben sich leichte Verbesserungen bei der Verwendung der tiefrequenten Anpassungen. Auf der rechten Seite des Diagrammes werden große Verbesserungen im Einzahlwert und den Einzahlwerten mit den Anpassungen ersichtlich. Für diesen Fall waren die Fugen Außenflügel mit einem Malerkreppband abgeklebt, um eine Dichtungsebene im Außenbereich zu simulieren. Somit kann durch diese Dichtungsebene eine deutliche Steigerung der Schalldämmung erreicht werden.

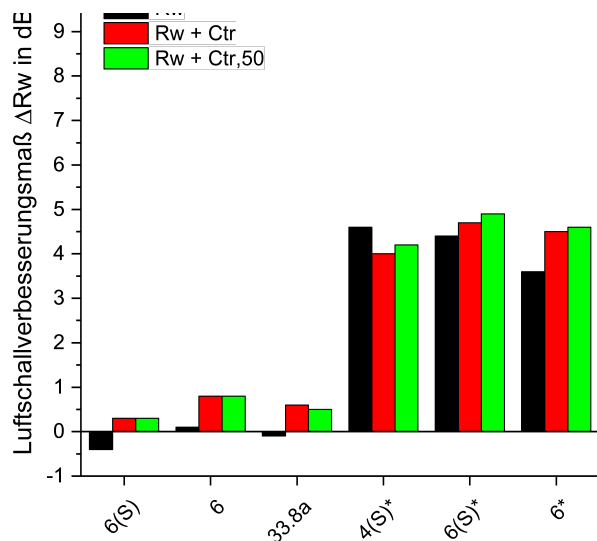


Abbildung 25: Außenflügel (A), allein – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tiefrequenten Anpassungen (links nicht abgeklebt und rechts *abgeklebt)

In Abbildung 26 sind die Frequenzverläufe der gemessenen Außenflügel (A) ersichtlich. Links sind die Flügel ohne Dichtungsebene dargestellt. Bis auf den 100 Hz Einbruch bei den 4 mm Einfachglas liegen die Kurven übereinander. Die verwendeten Verglasungen zeigen prinzipiell

auch wenig Scheibencharakteristik. Der Koinzidenzeibbruch von allen Verglasungen wird bei 2500 Hz gemessen. Für die verwendeten Verglasungen im Außenbereich sollten die Koinzidenzen in den hier angegebenen Frequenzen liegen:

- 6 mm EG bei 2000 Hz bis 2500 Hz
- 4 mm EG bei 3150 Hz
- 33.8a (VSGa) bei 4000 Hz

Das lässt sich scheinbar noch zu den 6 mm Einfachglas zuordnen.

Betrachtet man Abbildung 26 rechts sind die abgeklebten Varianten dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich die Schalldämmung gegenüber der oben angeführten Varianten deutlich verbessert. Des Weiteren liegen die Kurven nicht mehr so eng zusammen. Es treten damit etwas mehr Scheibencharakteristika zu Tage. Die Koinzidenz der 4 mm EG (schwarz) verschiebt sich in das Frequenzband 3150 Hz und passt somit zu der vorherigen Angabe. Der gleiche Effekt tritt für die beiden 6 mm Einfachgläser (rot und grün) auf. Im Fall des 33.8a sollte die Koinzidenz bei 4000 Hz liegen. Sie ist aber im Bereich von 2000 Hz bis 2500 Hz zu finden. Das lässt die Vermutung zu, dass die Akustikfolie in der Verglasung nicht so funktioniert wie sie funktionieren soll.

Prinzipiell ist für diese Verglasungen anzumerken, dass aufgrund der Einbausituation (Außenflügel bündig mit der Prüfwand im Senderraum) ein Nischeneffekt auftritt. Dieser verringert die Ausprägung der Scheibencharakteristik und beeinflusst das Schalldämm-Maß des eingebauten Prüfobjektes. Zusätzlich sieht man, dass die Fuge bei den Außenflügeln ohne Dichtungsebene einen markanten Einfluss hat. Wird eine Dichtung eingebracht tritt mehr Wirkung der Verglasung auf.

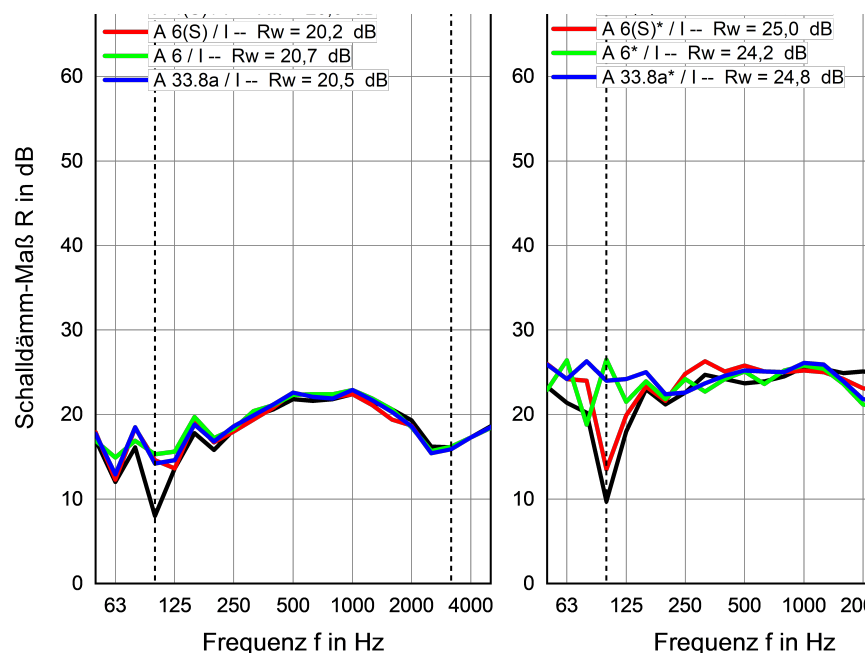


Abbildung 26: Außenflügel (A), allein – Frequenzverläufe der einzelnen Außenflügel (links nicht abgeklebt und rechts *abgeklebt)

Innenflügel (I), allein mit theoretischem SA(2) bei 171 mm

Im zweiten Schritt wurden die Innenflügel (I) allein untersucht, analog zu den Außenflügeln (siehe Abbildung 27). Die Einbautiefe der Innenflügel bei dem theoretischen SA(2) entspricht nahezu den normativen Einbauvorgaben der EN ISO 10140-1:2016 für Fenster und Verglasungen. Aus diesem Grund können die Messdaten der I gut mit den Messdaten von reinen Verglasungen aus der Untersuchung verglichen werden. Der theoretische SA ergibt sich daraus, dass kein Außenflügel bei diesen Messungen vorhanden war.

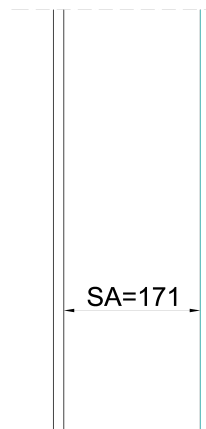


Abbildung 27: Außenflügel (A), allein – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert.

In Abbildung 28 werden die Verbesserungen, die sich bezogen auf den Referenzflügel ergeben, dargestellt. Der I für die Referenz ist ein 4 mm EG ohne Sprossen. Generell ist ersichtlich, dass bei allen verwendeten Verglasungen Verbesserungen bei dem bewerteten Schalldämm-Maß ohne und mit Anpassungen erreicht werden. Die Verbesserungen fallen für die verwendeten Vakuumverglasungen und für die MIG mit VSGa am günstigsten aus.

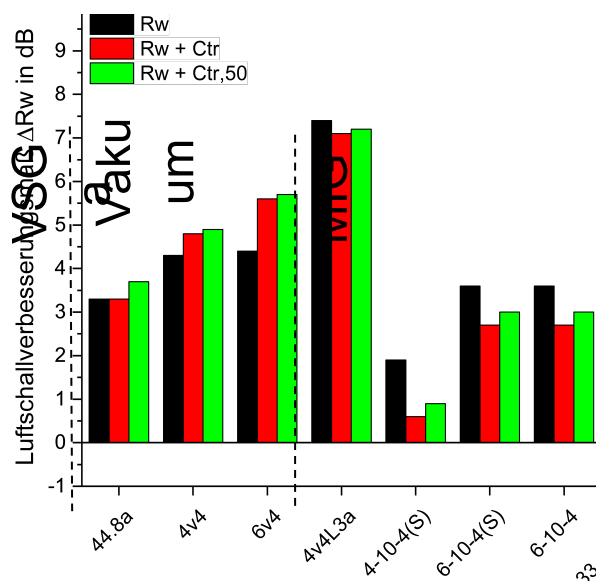


Abbildung 28: Innenflügel (I), allein – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen (von links nach rechts sind VSGa, Vakuum und MIG Verglasungen dargestellt)

Nachfolgend werden einige Frequenzverläufe der Innenflügel mit reinen Verglasungen verglichen. In den meisten Fällen werden die Kurven der Innenflügel in schwarz und die

Verglasung in rot dargestellt. In Abbildung 29 und Abbildung 30 links werden die verwendeten Vakuumverglasungen verglichen. Bei allen Systemen zeigen sich kleinere Abweichungen im tief- und mittelfrequenten Bereich. Im hochfrequenten Bereich passen die Kurven gut zusammen und zeigen auch bei der Koinzidenzfrequenz eine gute Übereinstimmung. Hauptsächlich ergeben sich diese Abweichungen zwischen den Flügeln und den Verglasungen aufgrund der:

- Größe – Die Verglasungen in den Flügeln sind kleiner, deutlich kleiner (da es ein zweiflügeliges Kastenfenster ist) als die reinen Verglasungen.
- Einbausituation – Die Verglasungen sind anders in den Flügeln eingebaut als im Prüfstand selbst. Zusätzlich sind die Flügel in einem Fenster eingebaut und besitzen eine Dichtungsebene.

Trotz dieser Unterschiede passen die Messdaten gut zusammen und zeigen auch beim Vergleich der Einzahlwerte (die in den Diagrammen angegeben sind) nahezu keine Abweichungen. Die R_w -Werte der Verglasungen werden aber mit einer Genauigkeit von 1,0 dB angegeben.

In Abbildung 30 rechts werden die Vakuumsysteme der Innenflügel miteinander verglichen. Die Vakuumverglasung 4v4 hat aufgrund seiner Flächenmasse die niedrigste Schalldämmung von 160 Hz bis 1250 Hz mit der Steigung von 6 dB/Oktave analog zu dem Massengesetz einer 8 mm Einfachglases. Die anderen beiden Vakuumverglasungen haben infolge ihrer höheren (fast gleichen) Flächenmasse eine höhere Schalldämmung im mittelfrequenten Bereich. Für die 6v4 bricht die Schalldämmung eher ein als bei dem 4v4L3a, da die Koinzidenz bei 2500 Hz auftritt. Durch die Akustikfolie mit der laminierten 3 mm EG bei der 4v4L3a verschiebt sich der Einbruch zu 3150 Hz, der auch bei dem 4v4 System auftritt. So erreicht die Vakuumverglasung mit VSGa den höchsten Einzahlwert mit 39,0 dB.

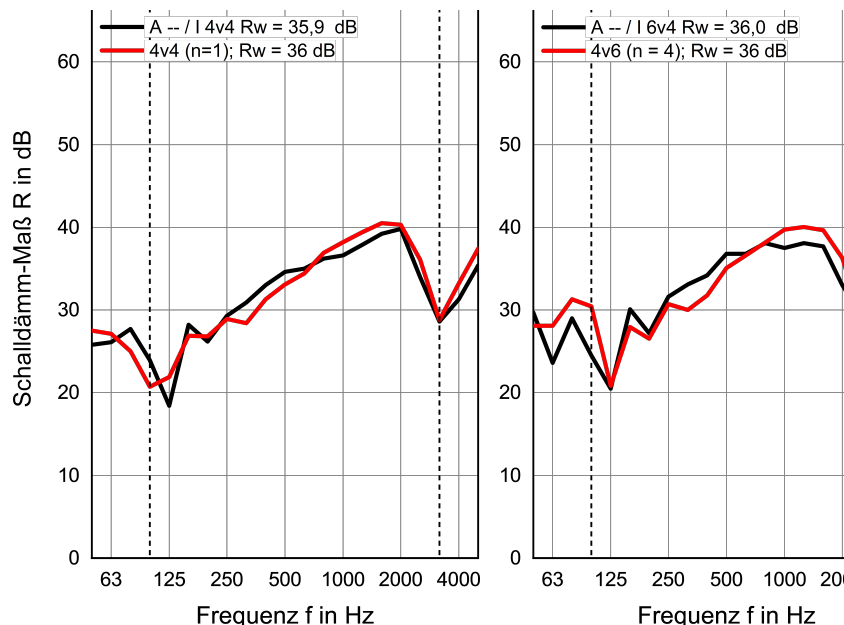


Abbildung 29: Innenflügel (I), allein – Frequenzverläufe von einzelnen Innenflügel im Vergleich zu einer reinen Verglasung (links Vakuumglas 4v4, symmetrisch und rechts Vakuumglas 4v6, asymmetrisch)

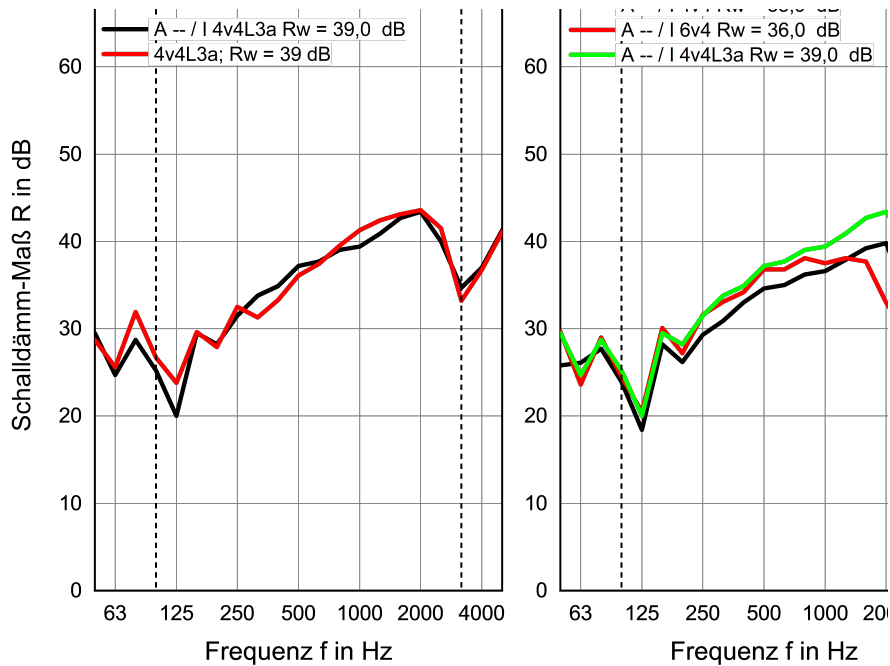


Abbildung 30: Innenflügel (I), allein – Frequenzverläufe von einzelnen Innenflügel im Vergleich zu einer reinen Verglasung (links Vakuumglas 4v4, symmetrisch und rechts Vakuumglas 4v6, asymmetrisch)

Der Vergleich der 4 mm EG ist in Abbildung 31 auf der linken Seite zu sehen. Zusätzlich sind in diesem Diagramm noch die zwei Außenflügelmessungen eingetragen. Zwischen I und reiner Verglasung treten wie bei dem Vakuumssystem leichte Abweichungen im tief- und mittelfrequenten Bereich auf. Im hochfrequenten Bereich passen die Kurven gut zusammen. Der Koinzidenzeinbruch ist bei dem I nicht so stark ausgeprägt wie bei der reinen Verglasung. Größere Abweichungen zu diesen zwei Kurven zeigen die zwei kurven des A. Die liegt an den in vorerghenden Abschnitt angeführten Gründen. Es soll verdeutlichen, dass die Scheibencharakteristik bei den Außenflügel-Messungen deutlich beeinflusst wird.

Das rechte Diagramm in Abbildung 31 zeigt den Vergleich der 44.8a Verglasung. Die Abweichungen der Kurven liegen wieder in den vorher angeführten Bereichen. Was aber auffällt, ist dass der Koinzidenzeinbruch deutlich verschoben ist zwischen I und reiner Verglasung. Zusätzlich wurde noch eine Messkurve einer 44.2 VSGA (in grün) eingetragen. Der Koinzidenzeinbruch dieser passt gut zu dem des I. Das lässt den Schluss zu, dass die Akustikfolie in diesem Fall nicht so funktioniert wie sie sollte. Das heißt es zeigt sich eher das akustische Verhalten einer VSG Verglasung.

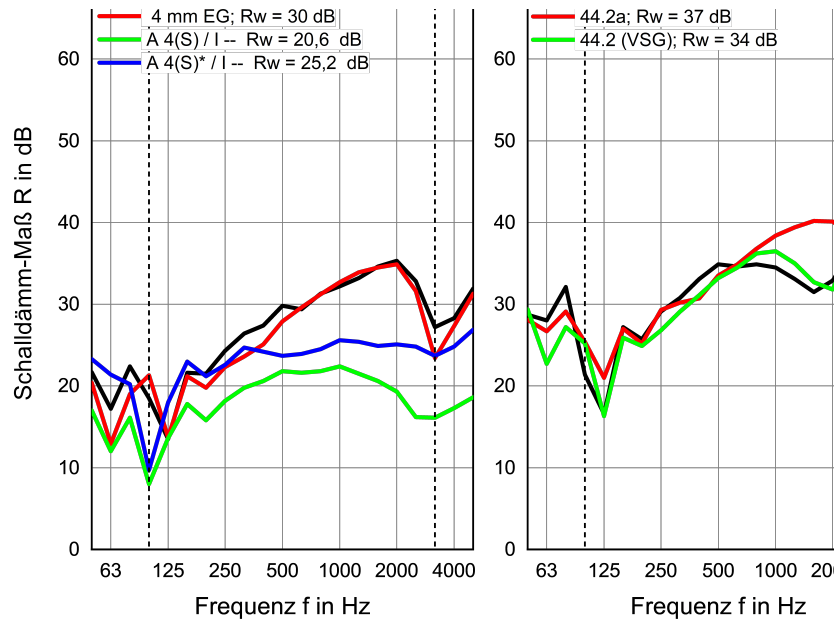


Abbildung 31: Innenflügel (I), allein – Frequenzverläufe von einzelnen Innenflügel im Vergleich zu einer reinen Verglasung (links 4 mm EG mit den zwei Außenflügeln ohne und mit zusätzlicher Dichtungsebene und rechts VSGa/VSG System)

Im Folgenden wird noch zwei Vergleiche der Innenflügel untereinander diskutiert. Zum Ersten der Einfluss von Sprossen in den Flügeln. Diese Sprossen sind echte Glasteiler, also nicht nur aus optischen Gründen aufgeklebt. Damit sind die Größen dieser Verglasungen in diesen I geringer gegenüber dem System ohne Sprossen. Die Messkurven dazu sind in Abbildung 32 auf der linken Seite dargestellt. Hier zeigen sich Abweichungen der Messungen im Bereich von 160 Hz bis 800 Hz, der sich aufgrund der Sprossen einstellt. Des Weiteren wird die Breite des Koinzidenzeinbruches etwas beeinflusst. Für den Fall ohne Sprossen ist der Einbruch etwas breiter ausgeprägt. Diese Abweichungen machen sich in diesem Fall nicht im Standard Einzahlwert bemerkbar.

In Abbildung 32 rechts wird eine MIG-Verglasung ohne und mit Akustikfolie verglichen. Bei der 6-10-4 MIG (ohne Akustikfolie) ist im Gegensatz zu der MIG 33.8a-10-4 (mit Akustikfolie) ersichtlich, dass sich die Schalldämmung ab 800 Hz deutlich abfällt. Der Koinzidenzeinbruch der 6-10-4 Verglasung liegt bei 2500 Hz bis 3150 Hz. Bei der MIG mit der Akustikfolie ist er zu höheren Frequenzen verschoben in den Bereichen 3150 Hz bis 4000 Hz. Aufgrund dieser Veränderungen ergibt sich eine Verbesserung im Einzahlwert von 3,1 dB.

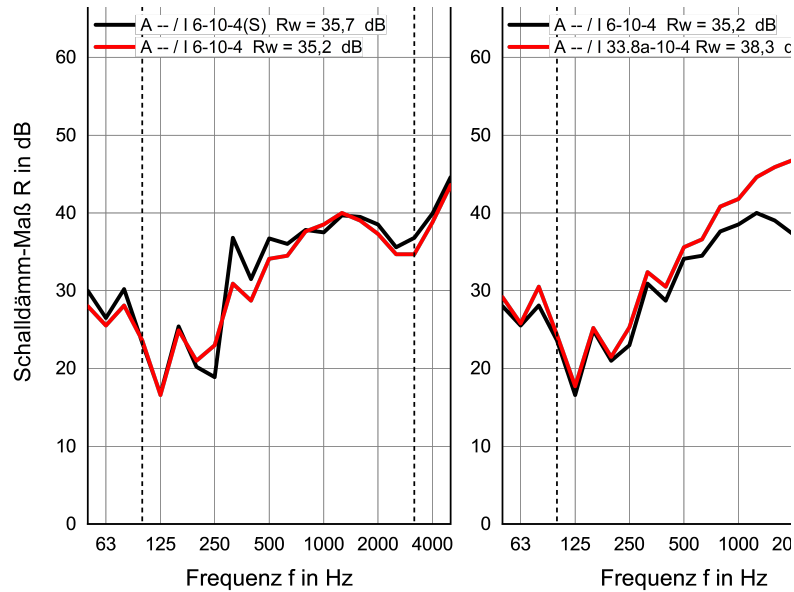


Abbildung 32: Innenflügel (I), allein – Frequenzverläufe von einzelnen Innenflügeln (links 6-10-4 MIG mit und ohne Sprossen und rechts 6-10-4 MIG vs. 33.8a-10-4 MIG mit Akustikfolie)

Von Innenflügel (I) allein zum Kastenfenster mit SA(1) 121 mm

Von den vorherigen Messungen der einzelnen Außen- und Innenflügel ergibt sich die Frage: Was passiert, wenn man vor den Innen- einen Außenflügel setzt. Diese Verbesserungen, bezogen auf die Referenz (Innenflügel mit 4 mm EG), sind in Abbildung 33 angegeben. Es ist ersichtlich, dass durch die Verwendung eines Außenflügels deutliche Verbesserungen erzielt werden können. Diese betreffen das bewertete Schalldämm-Maß ohne und mit tieffrequenten Anpassungen. Im Fall des Einzahlwertes liegen die Verbesserungen in einem Bereich von 6 dB bis 14 dB.

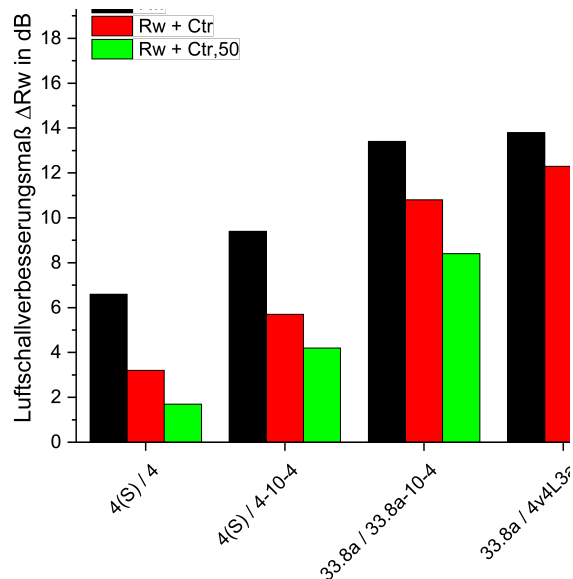


Abbildung 33: Vom Innenflügel zum Kastenfenster mit SA(1) – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen

Kastenfenster mit SA(1) 121 mm

In dem aktuellen Abschnitt wird das gesamte Kastenfenster als System (siehe Abbildung 34) betrachtet und auch die Verbesserung wird auf das schwächste Kastenfenster bezogen.

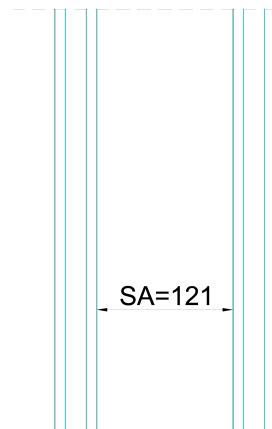


Abbildung 34: Kastenfenster SA(1) – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert.

Das Referenzkastenfenster für die Berechnung der Verbesserung ist (A 4(S) / I 4) das heißt:

- A: 4 mm EG (mit Sprossen)
- I: 4 mm EG (ohne Sprossen)
- mit SA(1) 121 mm

Dieses Kastenfenster wird bei allen nachfolgenden Verbesserungen als Referenz verwendet. Die Verbesserungen (siehe Abbildung 35), die sich bezogen auf ein Kastenfenster ergeben, fallen viel kleiner aus als bei dem reinen Innenflügel. Bei den schwachen Verglasungen liegen diese im Bereich von 2 dB bis 4 dB. Bei den starken Verglasungen zwischen 6 dB bis 8 dB. Die Verbesserungen werden auch mit den tieffrequenten Anpassungen erzielt.

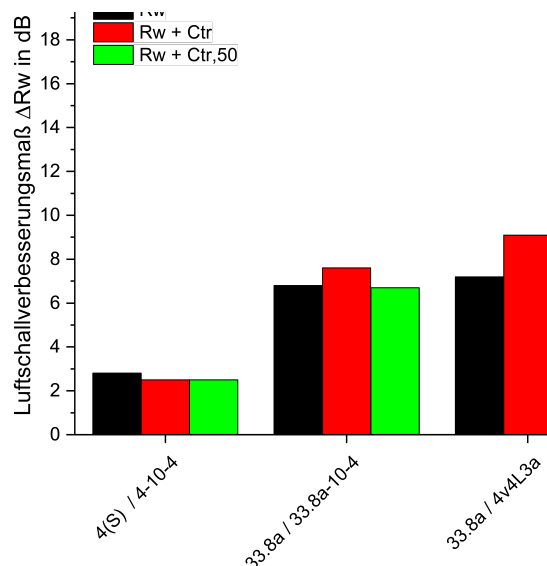


Abbildung 35: Kastenfenster mit SA(1) – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen

Für ausgewählte Kastenfenstersysteme werden auch Frequenzverläufe dargestellt. Zum einen wird das Kastenfenster mit der Scheibenkombination A 4(S) / I 4 (schwach) und zum

anderen mit der Scheibenkombination A 33.8 / I 4v4L3a (stark) mit dem jeweiligen SA verwendet. In diesem Fall SA(1) mit 121 mm (siehe Abbildung 36). Das Kastenfenster ist grün dargestellt. Zusätzlich sind der Außenflügel (allein) in schwarz und Innenflügel (allein) in rot eingezeichnet. Dies dient zum Vergleich und um das Verhalten des Kastenfensters besser einschätzen zu können. Aus beiden Diagrammen ist ersichtlich, dass die tieffrequente Schalldämmung des Kastenfensters im Gebiet von 50 Hz bis 100 Hz unter der des reinen Innenflügels liegt. Ab 125 Hz über den gesamten Bereich ist die Schalldämmung des Kastenfensters dann besser. Der 125 Hz Einbruch, der bei dem Innenflügel auftritt, kann durch das Kastenfenster in beiden Fällen deutlich reduziert werden. Zusätzlich wurde für die angeführten Systeme noch die Resonanzfrequenz $f_{R,KF,SA(1)}$ berechnet, die sich durch die beiden Flügel und den jeweiligen SA ergibt:

- $f_{R,KF,SA(1)} = 55$ Hz (Abbildung 36, links) → Die Resonanzfrequenz liegt im unteren Grenzbereich der Messung. Würde aber miterfasst werden. Eventuell ist es der Einbruch, der sich bei 63 Hz zeigt. Es kann aber nicht eindeutig zugeordnet werden.
- $f_{R,KF,SA(1)} = 44$ Hz (Abbildung 36, rechts) → Die Resonanzfrequenz liegt außerhalb des Messbereiches und wird nicht mit erfasst.

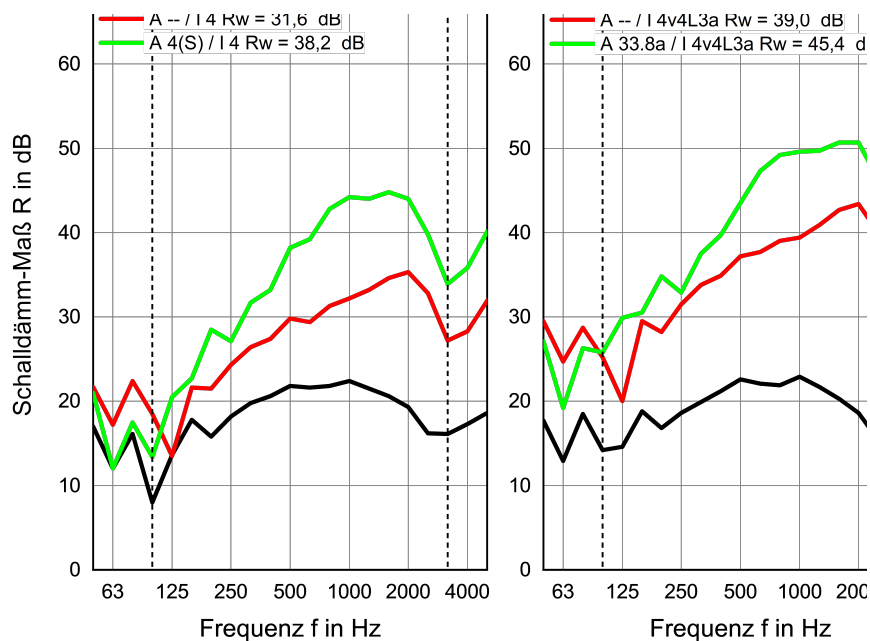


Abbildung 36: Kastenfenster mit SA(1) bei 121 mm – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links A 4(S) / I 4 (schwach) und rechts A 33.8 / I 4v4L3a (stark)). Die Kastenfenster sind in grün, die Außenflügel (allein) in schwarz und die Innenflügel (allein) in rot dargestellt.

Kastenfenster SA(1) 121 mm zu SA(2) 171 mm

In diesem Abschnitt wird der SA um 50 mm vergrößert. Das heißt von 121 mm auf 171 mm (siehe Abbildung 37).



Abbildung 37: Kastenfenster SA(2) – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert

Die Vergrößerung des SA um 50 mm bringt eine Verbesserung des Einzahlwertes ohne und mit Anpassungen. Bei den starken Verglasungen überschreiten die Verbesserungen mit den Anpassungen die Verbesserung des reinen Einzahlwertes. Bezieht man die Verbesserung auf das Diagramm vorher (Abbildung 38) ergeben sich Veränderungen der jeweiligen Scheibenkonfiguration im Bereich 2 dB bis 4 dB für den Einzahlwert.

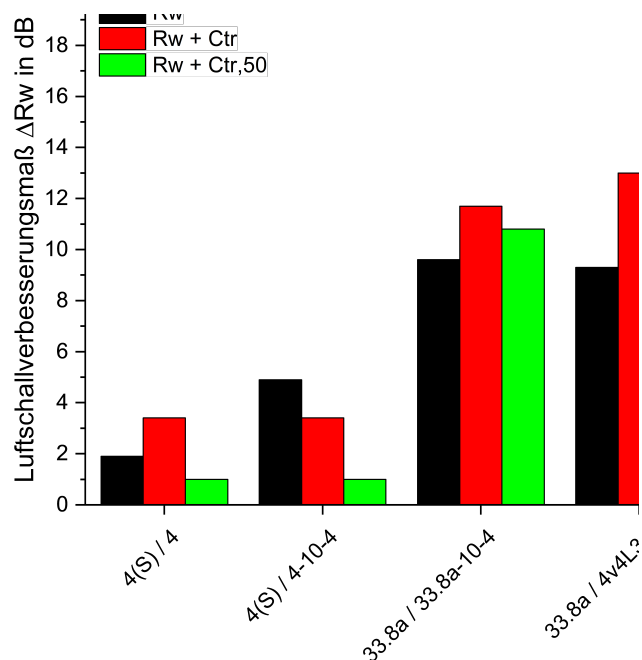


Abbildung 38: Kastenfenster mit SA(2) – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen

Für die Frequenzverläufe (siehe Abbildung 39) wird ersichtlich, dass die tieffrequente Schalldämmung des schwachen Kastenfensters wieder unter der des reinen Innenflügels liegt. Ab 125 Hz über den gesamten Bereich hinweg ist die Schalldämmung dann günstiger. Dieser Bereich wird bei der starken Verglasung schon ab 63 Hz erreicht. Des Weiteren ist die Schalldämmung im tieffrequenten Bereich des starken Kastenfensters deutlich besser gegenüber dem schwachen Kastenfenster. Die berechnete Resonanzfrequenz der beiden Systeme liegt bei:

- $f_{R,KF,SA(1)} = 51 \text{ Hz}$ (Abbildung 39, links) → Die Resonanzfrequenz liegt im unteren Grenzbereich der Messung. Würde aber miterfasst werden. Eventuell ist es der Einbruch, der sich bei 80 Hz zeigt. Sie kann aber nicht eindeutig zugeordnet werden.
- $f_{R,KF,SA(1)} = 40 \text{ Hz}$ (Abbildung 39, rechts) → Die Resonanzfrequenz liegt außerhalb des Messbereiches und wird nicht mit erfasst.

Prinzipiell verschiebt sich die Resonanzfrequenz zu tieferen Frequenzen, wenn der SA vergrößert wird.

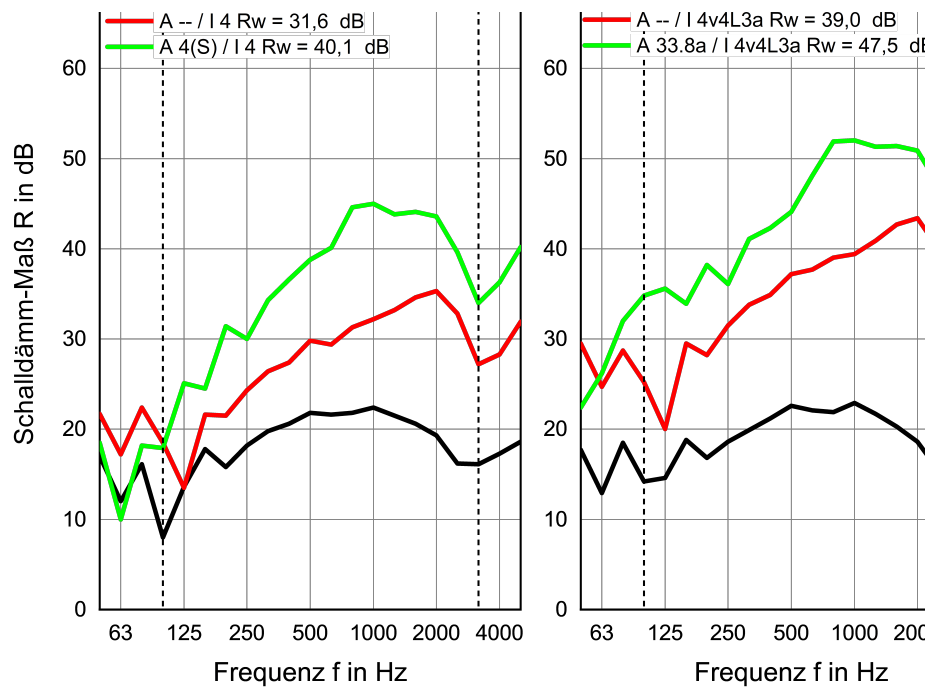


Abbildung 39: Kastenfenster mit SA(2) bei 171 mm – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links A 4(S) / I 4 (schwach) und rechts A 33.8 / I 4v4L3a (stark)). Die Kastenfenster sind in grün, die Außenflügel (allein) in schwarz und die Innenflügel (allein) in rot dargestellt.

Kastenfenster SA(1) 121 mm zu SA(2) 171 mm* mit zusätzlicher Dichtungsebene im Außenbereich

Für diese Messungen wurde der gleiche Scheibenabstand wie im Absatz davor verwendet. Hier wurde aber eine zusätzliche Dichtungsebene im Außenbereich mit Mahlerkrepp simuliert (siehe Abbildung 40).



Abbildung 40: Kastenfenster SA(2) – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert. Bei dieser Konfiguration wurde eine zusätzliche Dichtungsebene im Außenbereich mit Mahlerkrepp verwendet

Für diese Modifikation zeigen sich deutliche Verbesserungen für den Einzahlwert ohne und mit tieffrequenten Anpassungen. Das heißt, durch die Dichtung kann eine hohe Steigerung der Schalldämmung erreicht werden. Wie bei SA(2) ohne Dichtung sind die tieffrequenten Verbesserungen höher als die des Einzahlwertes. Bezieht man die Verbesserung auf das Diagramm vorher (Abbildung 38), ergeben sich Veränderungen der jeweiligen Scheibenkonfiguration im Bereich 4 dB bis 5 dB für den Einzahlwert.

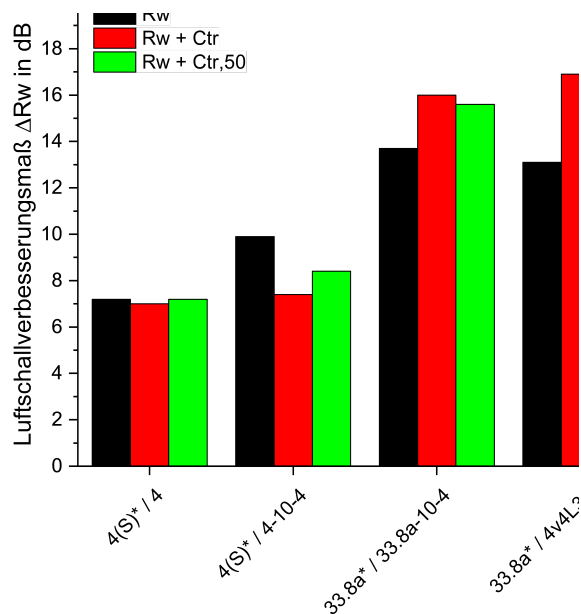


Abbildung 41: Kastenfenster mit SA(2)* und zusätzlicher Dichtung im Außenbereich – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen

Für die Frequenzverläufe (siehe Abbildung 42) wird ersichtlich, dass die tieffrequente Schalldämmung des schwachen und des starken Kastenfensters ab 63 Hz über der des reinen Innenflügels liegt. Dieses Verhalten kann über den gesamten Bereich hinweg gehalten werden. Der Einbruch bei 125 Hz des Innenflügels bei beiden Systemen wird durch das Kastenfenster abgefangen. Für die Resonanzfrequenz ergeben sich zu dem Absatz davor keine Verschiebungen, da der Abstand nicht verändert wurde. Die Messdaten lassen die Vermutung zu, dass die Resonanzfrequenz außerhalb aber knapp an der Grenze des

Messbereiches liegt, da bei beiden Systemen ein starker Anstieg der Schalldämmung ab 50 Hz vorliegt.

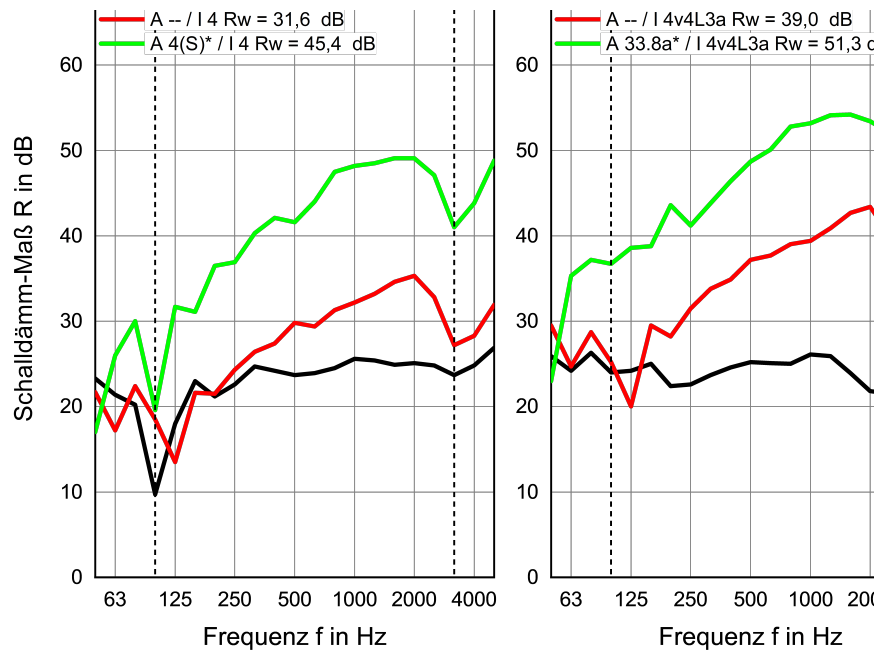


Abbildung 42: Kastenfenster mit SA(2)* bei 171 mm mit zusätzlicher Dichtung im Außenbereich – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links A 4(S) / I 4 (schwach) und rechts A 33.8 / I 4v4L3a (stark)). Die Kastenfenster sind in grün, die Außenflügel (allein) in schwarz und die Innenflügel (allein) in rot dargestellt.

Kastenfenster SA(1) 121 mm zu SA(3) 271 mm

Eine weitere Vergrößerung des SA um 100 mm auf 271 mm wurde untersucht (siehe Abbildung 43).

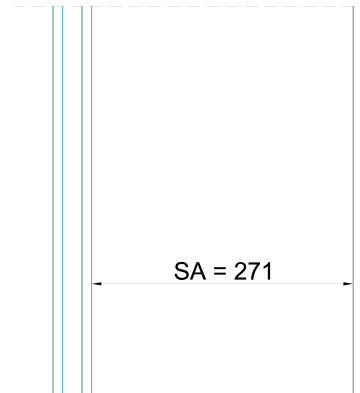


Abbildung 43: Kastenfenster SA(3) – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert.

Bei diesem SA konnte eine Verbesserung der Einzahlwerte ohne und mit Anpassungen erreicht werden. Für diesen Fall sind die Verbesserungen mit den tieffrequenten Anpassungen immer größer als die des Einzahlwertes allein. Vergleicht man diese Verbesserungen mit:

- Denen in Abbildung 38 d.h. SA(2) ergeben sich Veränderungen bei der jeweiligen Verglasung im Bereich von 1 dB bis 2 dB
- Denen in Abbildung 35 d.h. SA(1) ergeben sich Veränderungen bei der jeweiligen Verglasung im Bereich von 3 dB bis 6 dB
- Denen in Abbildung 41 d.h. SA(2)* ergeben sich Veränderungen bei der jeweiligen Verglasung im Bereich von -3 dB bis -2 dB

Daraus kann man entnehmen, dass es günstiger ist eine Dichtungsebene im Außenbereich einzufügen als den Abstand zu erhöhen (sofern die natürlich möglich ist). Die zusätzliche Vergrößerung des Abstandes um 100 mm bringt nur einen kleinen Zuwachs bezogen auf den Einzahlwert.

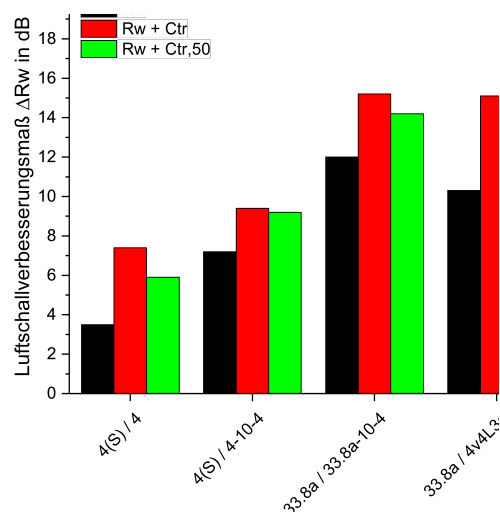


Abbildung 44: Kastenfenster mit SA(3) – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen

Die Frequenzverläufe in Abbildung 45 zeigen beide ab 63 Hz eine bessere Schalldämmung als der Innenflügel allein. Dieses Verhalten kann über den gesamten Frequenzbereich gehalten werden. In dieser Konfiguration wird auch der 125 Hz Einbruch des Innenflügels überdeckt. Die berechnete Resonanzfrequenz der beiden Systeme liegt bei:

- $f_{R,KF,SA(1)} = 47 \text{ Hz}$ (Abbildung 45, links) → Die Resonanzfrequenz liegt außerhalb des Messbereiches und wird nicht mit erfasst.
- $f_{R,KF,SA(1)} = 36 \text{ Hz}$ (Abbildung 45, rechts) → Die Resonanzfrequenz liegt außerhalb des Messbereiches und wird nicht mit erfasst.

Die Resonanzfrequenzen verschieben sich weiter zu tieferen Frequenzen, da der SA weiter vergrößert wird. Die Messdaten lassen die Vermutung zu, dass die Resonanzfrequenz außerhalb, aber knapp an der Grenze des Messbereiches liegt, da bei beiden Systemen ein starker Anstieg der Schalldämmung ab 50 Hz vorliegt.

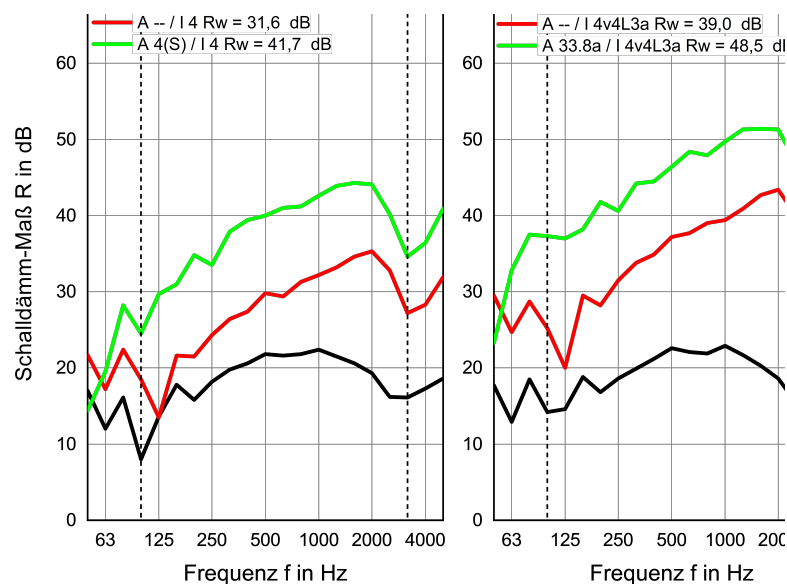


Abbildung 45: Kastenfenster mit SA(3) bei 271 mm – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links A 4(S) / I 4 (schwach) und rechts A 33.8 / I 4v4L3a (stark)). Die Kastenfenster sind in grün, die Außenflügel (allein) in schwarz und die Innenflügel (allein) in rot dargestellt.

Kastenfenster SA(1) 121 mm zu SA(4)H 271 mm

Der letzte Scheibenabstand, der untersucht wurde, ist der gleiche Abstand (siehe Abbildung 46) wie bei SA(3) mit dem Unterschied, dass das Material des Blendrahmens gewechselt wurde. Der Holz Blendrahmen wurde gegen einen aus Heraklith ausgetauscht.



Abbildung 46: Kastenfenster SA(4)^H – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert.

In Abbildung 47 sind die Verbesserungen dargestellt, die sich bezogen auf den Referenzflügel ergeben. In dieser Konfiguration werden selbst mit den schwachen Verglasungen sehr hohe Verbesserungen erreicht. Das gilt für den reinen Einzahlwert und für die Anpassungen. Mit diesem Blendrahmen und dem SA wurden von allen untersuchten Aufbauten die höchsten Verbesserungen erzielt. Vergleicht man diese Verbesserungen mit:

- Denen in Abbildung 44 d.h. SA(3) ergeben sich Veränderungen bei der jeweiligen Verglasung im Bereich von 5 dB bis 7 dB
- Denen in Abbildung 38 d.h. SA(2) ergeben sich Veränderungen bei der jeweiligen Verglasung im Bereich von 7 dB bis 9 dB
- Denen in Abbildung 35 d.h. SA(1) ergeben sich Veränderungen bei der jeweiligen Verglasung im Bereich von 9 dB bis 11 dB
- Denen in Abbildung 41 d.h. SA(2)* ergeben sich Veränderungen bei der jeweiligen Verglasung im Bereich von 2 dB bis 4 dB

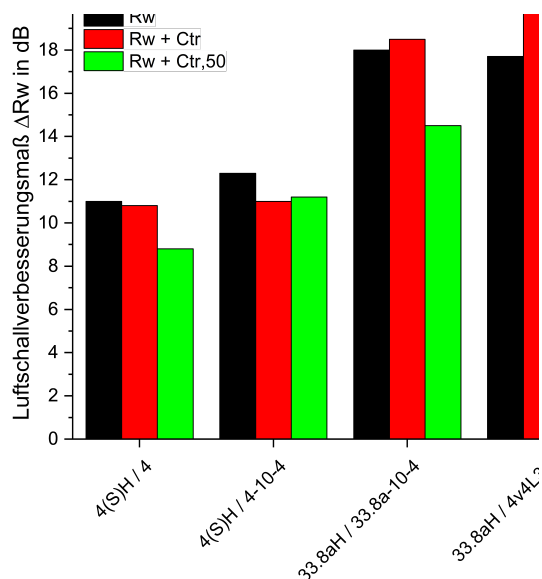


Abbildung 47: Kastenfenster mit SA(4)^H – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen

Die Frequenzverläufe der gemessenen Kastenfenster-Konfigurationen sind in Abbildung 48 angegeben. In diesen ist es auch so, dass ab 63 Hz die Schalldämmung des Kastenfensters größer ist als die des reinen I. Dies kann dann über den gesamten Frequenzbereich gehalten werden. Für die starke Verglasung ist das aber im tiefen Frequenzbereich deutlich enger gegenüber den vorherigen zwei Konfigurationen. Für die Resonanzfrequenz ergeben sich zu dem vorhergehenden Absatz keine Verschiebungen, da der Abstand nicht verändert wurde.

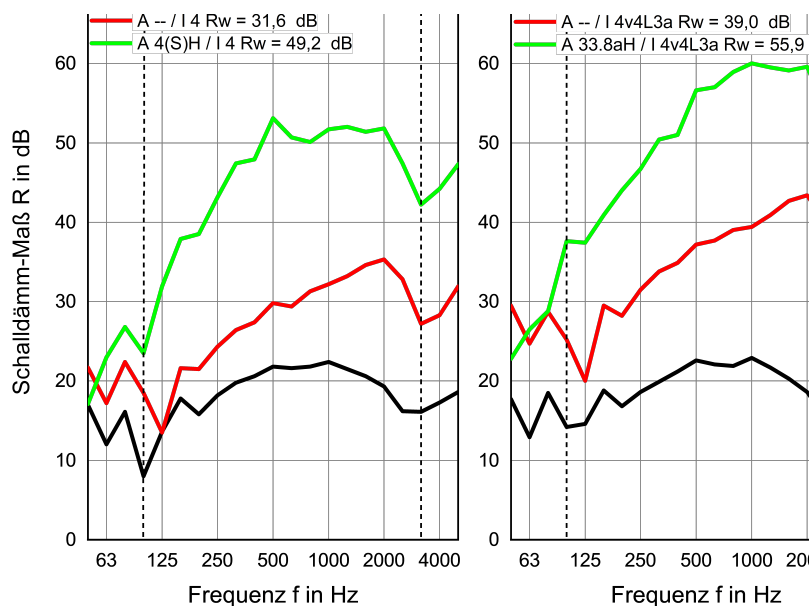


Abbildung 48: Kastenfenster mit SA(4)^H bei 271 mm – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links A 4(S) / 4 (schwach) und rechts A 33.8 / 4v4L3a (stark)). Die Kastenfenster sind in grün, die Außenflügel (allein) in schwarz und die Innenflügel (allein) in rot dargestellt.

Zusammenfassung der akustischen Untersuchungen

In diesem Absatz sollen die Ergebnisse aus den Untersuchungen zusammengefasst werden. Im ersten Schritt soll dies für die Verglasungen ausgeführt werden. In Abbildung 49 auf der linken Seite wird die Verglasung im Außenflügel beibehalten und die Vakuumverglasungen im Innenbereich ausgetauscht. Die wurde bei SA(2) ohne Dichtung im Außenbereich durchgeführt. Aufgrund der geringsten Flächenmasse hat das System A 33.8 / I 4v4 (schwarze Kurve) die geringste Schalldämmung im tief- und mittelfrequenten Bereich. Das System A 33.8 / I 4v4L3a (blaue Kurve) hat die größte Flächenmasse und somit die höchste Schalldämmung in diesen zwei Bereichen. Die rote Kurve liegt mit der Schalldämmung zwischen den beiden Scheibenkonfigurationen. Die jeweiligen Koinzidenzeinbrüche zeigen sich an den Frequenzen, die bei den reinen Vakuumverglasungen in Untersuchung gemessen wurden. Auf der rechten Seite von Abbildung 49 wird der I beibehalten und der Außenflügel getauscht. Hier zeigen sich die größten Änderungen in einem Bereich von 63 Hz bis 250 Hz. Ab 315 Hz aufwärts zeigen sich wenig Einflüsse aufgrund des A. Die Außenflügel prägen vor allem im tieffrequenten Bereich die Schalldämmung des Kastenfensters. Im mittel- und hochfrequenten Bereich wird die Schalldämmung hauptsächlich durch den Innenflügel geprägt.

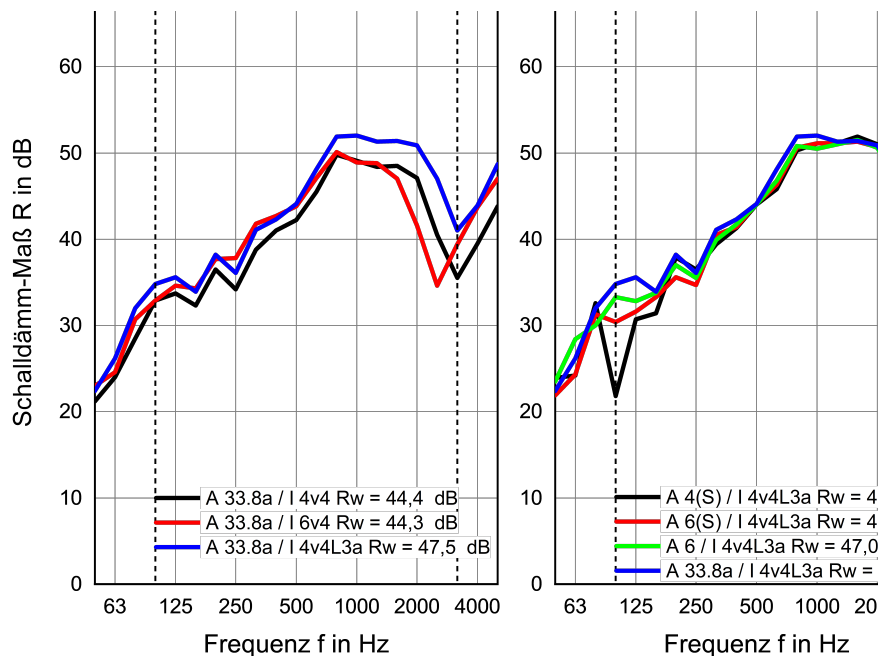


Abbildung 49: Kastenfenster mit SA(2) bei 171 mm – Frequenzverläufe von mehreren Scheibenkonfigurationen (links A wird beibehalten und I mit Vakuumverglasungen geändert und rechts A wird geändert und I mit 4v4L3a beibehalten)

In Abbildung 50 wird der Änderung des SA bei einer schwachen (A 4(S) / I 4) und einer starken (A 33.8 / I 4v4L3a) Verglasung diskutiert. Es werden zuerst nur die SA(1), SA(2) und SA(3) ohne Dichtungsebene und ohne Heraklith-Blendrahmen behandelt. Der hauptsächliche Einfluss bei der Änderung des SA liegt zwischen 50 Hz und 500 Hz. Danach gibt es noch Änderungen, aber diese fallen nicht so groß aus. Die Unterschiede die sich im tief- und mittelfrequenten Bereich für die Vergrößerung des Abstandes ergeben sind drastisch. Dies zeigt sich aber nicht, wenn man nur den Einzahlwert betrachtet, der auch in Abbildung 50

angegeben ist. In den Balkendiagrammen mit den Verbesserungen hat sich dies schon bei den verwendeten Anpassungen angedeutet. Bezogen auf den Einzahlwert bringt die Vergrößerung des Abstandes nur wenig, wenn man die Tiefe betrachtet. Soll die tieffrequente Schalldämmung erhöht werden ist die Vergrößerung des Abstandes ein gut geeignetes Mittel.

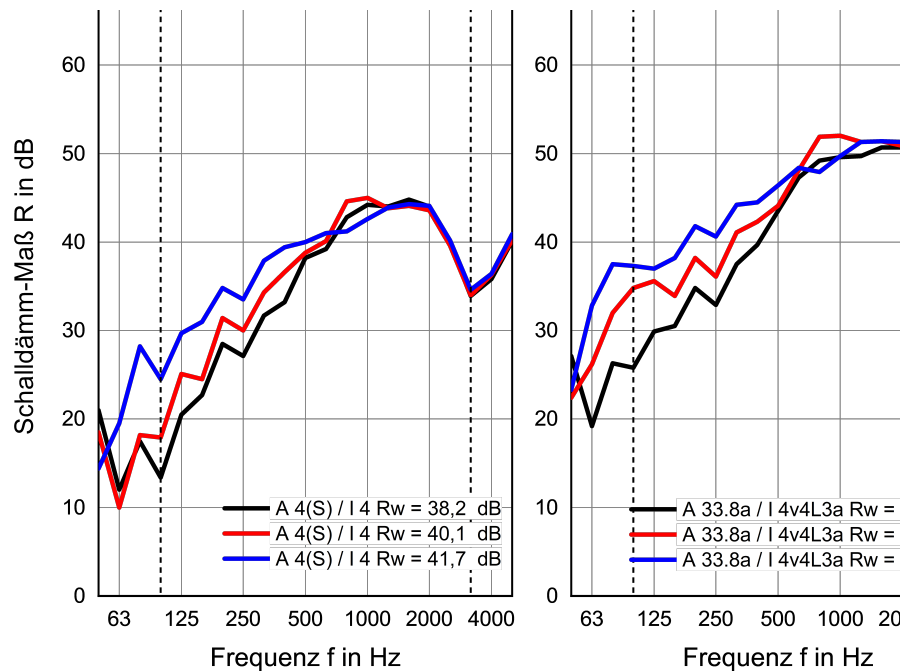


Abbildung 50: Kastenfenster mit verschiedenen SA – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links schwache Verglasung A 4(S) / I 4 und rechts starke Verglasung A 33.8 / I 4v4L3a) mit SA(1) in schwarz, SA(2) in rot und SA(3) in blau.

In Abbildung 51 wird der SA(3) mit 271 mm mit dem SA(2)* mit zusätzlicher Dichtungsebene und SA(4) mit Heraklith-Blendrahmen verglichen. Auf der linken Seite werden die Frequenzverläufe von einer schwachen und auf der rechten Seite die einer starken Verglasung dargestellt. Für die schwache Verglasung ist ersichtlich, dass es im tieffrequenten Bereich Unterschiede gibt, die jedoch vergleichsweise (zu Abbildung 50) gering ausfallen. Große Unterschiede treten ab einer Frequenz von 125 Hz auf und werden ab dieser Stelle über den gesamten Frequenzbereich gehalten. Ab 125 Hz hat das Kastenfenster mit SA(3) die geringste Schalldämmung unabhängig von der Verglasung. Ab diesem Punkt zeigt das Kastenfenster mit SA(2)* eine günstigere Schalldämmung gegenüber dem System SA(3). Das heißt mit einem geringeren Abstand, aber zusätzlicher Dichtungsebene im Außenbereich kann eine höhere Schalldämmung erreicht werden. Eine weitere Steigerung ist noch möglich, wenn das Material des Blendrahmens geschickt gewählt wird. Ab 125 Hz zeigt der größte SA mit diesem Blendrahmen die höchste Schalldämmung über den gesamten Bereich.

Tieffrequent im Bereich von 50 Hz bis 100 Hz verschieben sich die Verhältnisse etwas. Bei der schwachen Verglasung zeigt das System mit SA(3) die geringste Schalldämmung und das mit SA(2)* die höchste. Dafür ist SA(2)* der Einbruch bei 100 Hz deutlich ausgeprägter. Das Kastenfenster mit SA(4) liegt in diesem Bereich zwischen den beiden anderen Konfigurationen. Bei der starken Verglasung sind die Systeme SA(3) und SA(2)* fast deckungsgleich und zeigen eine hohe Schalldämmung. Dem gegenüber ist die tieffrequente

Schalldämmung deutlich niedriger verglichen mit den anderen beiden Konfigurationen. Aus welchem Grund dieser Effekt auftritt, sollte in weiteren Untersuchungen geklärt werden. Ein weiterer Punkt, der zu untersuchen ist, wie wirkt es sich aus, wenn der Heraklith-Blendrahmen verputzt wird. In dieser Untersuchung war das Heraklith nicht verputzt. Ein weiterer interessanter Faktor ist ein getrennter Blendrahmen. Das heißt, kann die Schalldämmung durch einen getrennten Blendrahmen noch weiter gesteigert werden?

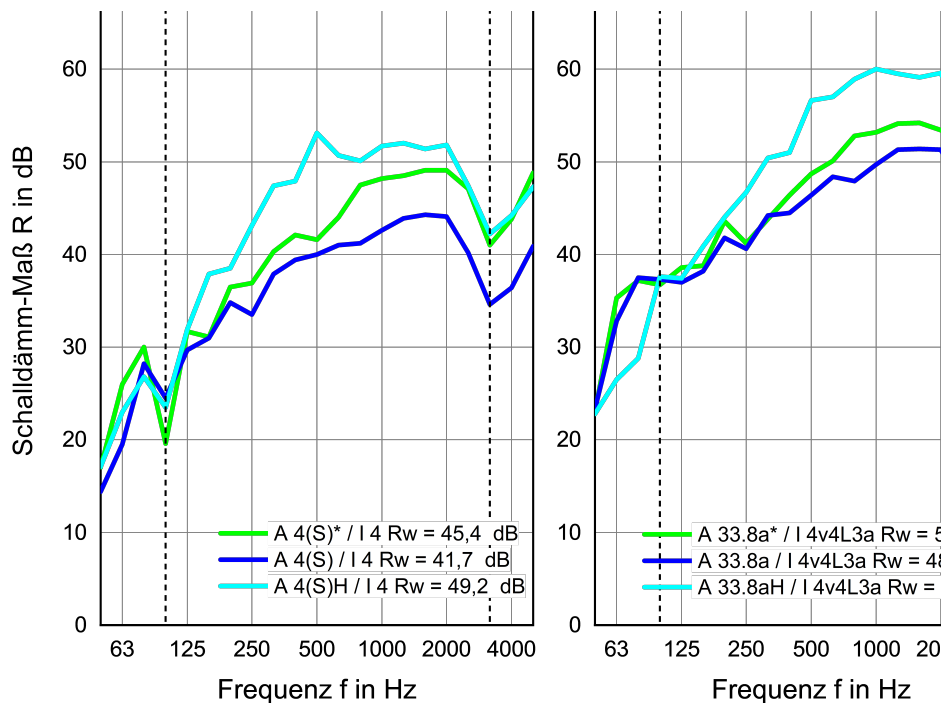


Abbildung 51: Kastenfenster mit verschiedenen SA – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links schwache Verglasung A 4(S) / I 4 und rechts starke Verglasung A 33.8 / I 4v4L3a) mit SA(2)* (mit zusätzlicher Dichtungsebene) in grün, SA(3) in blau und SA(4) (mit Heraklith-Blendrahmen) in cyan.

Die gute akustische Performance der Vakuumverglasungen konnte bei den Kastenfenster nicht voll ausgeschöpft werden. Das liegt zum einen daran, dass bei einem Kastenfenster viel von der Konfiguration abhängt und beeinflusst werden kann. In einem nächsten Schritt sollte das Kastenfenster weiter optimiert werden, um das volle Potential der Verglasungen ausschöpfen zu können.

5.3.3. Stoßfestigkeit

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, das Vakuumglas aus 2x ESG (Einscheibensicherheitsglas) geringe Widerstand gegen eine Stoßbelastung aufweisen. Die im Rahmen des Projektes verwendeten Vakuumgläser der Fa. AGC bestehen aus 2x Floatglas und können ein- oder beidseitig in VSG (Verbundsicherheitsglas) ausgeführt werden. Damit sind bessere Stoßfestigkeiten zu erwarten, das Niveau der Verbesserung ist durch entsprechende Stoßfestigkeitsuntersuchungen nachzuweisen.

Material und Methoden

Zur Beurteilung der Stoßfestigkeit wurden folgende Fenster und Verglasungen untersucht:

- Fixverglasung aus Holz, STAM 1420 x 1678 mm, Vakuum-Verglasung 4v4, LS Nr. 719/2020/1
- Fixverglasung aus Holz, STAM 1420 x 1678 mm, Vakuum-Verglasung mit 1x VSG (aus 1x 3 mm Floatglas und 1x 4 mm Floatglas mit 0,76 mm Folie): 3/4v4, LS Nr. 719/2020/2
- Fixverglasung aus Holz, STAM 1420 x 1678 mm, Vakuum-Verglasung mit 2x VSG (aus 1x 3 mm Floatglas und 1x 4 mm Floatglas mit 0,76 mm Folie): 3/4v4/3, LS Nr. 719/2020/5
- Fixverglasung aus Holz, STAM 1420 x 1678 mm, 2-Scheibenisolierverglasung 4/18/8, LS Nr. 719/2020/1 neu verglast

Die Größe der Glasscheibe betrug jeweils 1230 x 1480 mm. Die Glaslagerung, bei den Vakuum-Verglasungen, erfolgte innenseitig am Holz des Glasfalzes mit Dichtstoffvorlage und außenseitig in der Dichtstoff-Dreieckfase. Bei dem 2-Scheibenisolierverglasung erfolgte die Glaslagerung innenseitig am Holz des Glasfalzes mit einem Vorlegeband (8 x 3 mm) und außenseitig wurde das Glas mit Holzklötzen fixiert. Zusätzlich war zwischen dem Glas und den Holzklötzen ein Vorlegeband (8 x 3 mm) montiert.

Zur Beurteilung der Stoßfestigkeit wurde jeweils ein 50 kg schwerer Zwillingsreifen (Stoßkörper gemäß EN 12600) aus unterschiedlichen Fallhöhen von außen (in Richtung Glasfalz) auf drei definierte Punkte der Fixverglasung gemäß EN 13049 gependelt (siehe Abbildung 52). Für jede Fallhöhe wurde einmal einer der Eckpunkte, ein Mittelpunkt der Längskante und einmal die Mitte des Glases belastet. Dabei dürfen in diesem Fall laut EN 13049 weder ein Ellipsoid (400 x 300 mm) durch eine entstandene Öffnung passen, noch Teile auf gefährdende Art und Weise losgelöst werden oder die Masse eines losgeösten Teils größer als 50 g betragen.



Abbildung 52: Links, Ansicht einer der Fixverglasungen von außen, eingebaut im Prüfstand der Holzforschung Austria; Rechts, Pendel mit Zwillingsreifen (Stoßkörper)

Ergebnisse

Vakuum-Verglasung 4v4

Abbildung 53 illustriert den Stoßfestigkeitsversuch für die Vakuum-Verglasung 4v4 und Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse.

Fallhöhe 20 mm:

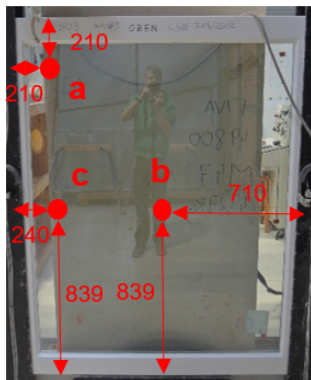


Abbildung 53: Vakuum-Verglasung 4v4: Auftreffpunkte des Pendels und Abstände in mm von der Rahmen-Außenkante

Tabelle 16: Vakuum-Verglasung 4v4: Ergebnistabelle bei Fallhöhe 20 mm

Auftreffpunkte in Prüfreihefolge	Beobachtungen	Ellipsoid passt durch Öffnung?	Teile auf gefährdende Art und Weise losgelöst?	Masse eines losgeösten Teils größer als 50 g?
b: Scheibenmitte	Keine	Nein	Nein	Nein
c: Mitte Längskante	Keine	Nein	Nein	Nein
a: nahe linker oberer Ecke	Glasbruch	Nein	Nein	Ja: 50,1 g Anforderung nicht erfüllt

Beim Auftreffen des Stoßkörpers nahe der linken oberen Ecke ist die Vakuumglasscheibe gebrochen (siehe Abbildung 54) und es haben sich mehrere Teile losgelöst, wobei das größte Stück ein Gewicht von 50,1 g aufwies. Damit wurden die Anforderungen in Anlehnung an EN 13049 nicht erfüllt.

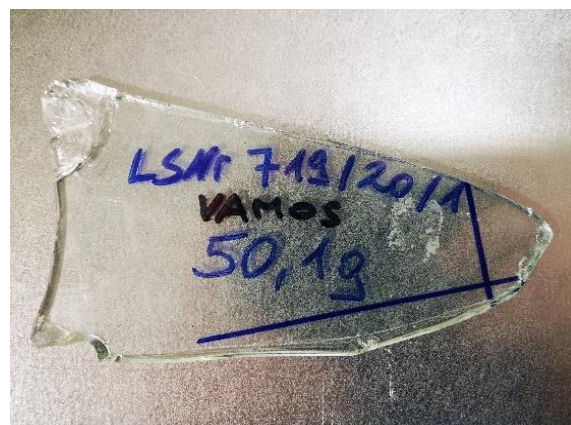


Abbildung 54: Vakuum-Verglasung 4v4: Glasbruch am Auftreffpunkt a und größtes losgelöstes Glas-Bruchstück

Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4

Abbildung 53 und 56 illustriert den Stoßfestigkeitsversuch für die Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4 mit zwei Fallhöhen und Tabelle 17 und 18 zeigt die Ergebnisse.

Die VSG-Scheibe hat sich auf der bewitterten Seite (Außenseite) befunden, auf welche gependelt wurde.

Fallhöhe 20 mm:

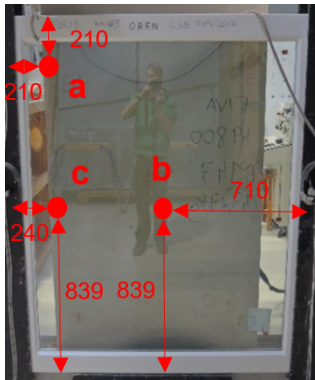


Abbildung 55: Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4 (Fallhöhe 20 mm): Auftreffpunkte und Abstände in mm von Rahmen-Außenkante

Tabelle 17: Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4: Ergebnistabelle bei Fallhöhe 20 mm

Auftreffpunkte in Prüfreihefolge	Beobachtungen	Ellipsoid passt durch Öffnung?	Teile auf gefährdende Art und Weise losgelöst?	Masse eines losgeösten Teils größer als 50 g?
a: nahe linker oberer Ecke	Keine	Nein	Nein	Nein
c: Mitte Längskante	Keine	Nein	Nein	Nein
b: Scheibenmitte	Keine	Nein	Nein	Nein

Es waren keine Beschädigungen an der Fixverglasung festzustellen. Die Anforderungen in Anlehnung an EN 13049 wurden erfüllt und der Test wurde mit der Fallhöhe 50 mm fortgesetzt.

Fallhöhe 50 mm:

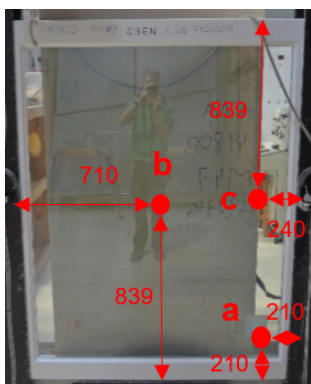


Abbildung 56: Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4 (Fallhöhe 50 mm): Auftreffpunkte und Abstände in mm von Rahmen-Außenkante

Tabelle 18: Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4: Ergebnistabelle bei Fallhöhe 50 mm

Auftreffpunkte in Prüfreihefolge	Beobachtungen	Ellipsoid passt durch Öffnung?	Teile auf gefährdende Art und Weise losgelöst?	Masse eines losgeösten Teils größer als 50 g?
b: Scheibenmitte	Keine	Nein	Nein	Nein
c: Mitte Längskante	Glasbruch, leichte Risse an rechter Längskante	Nein	Nein	Nein
a: nahe rechter unterer Ecke	Glasbruch	Nein	Nein	Ja: 272 g Anforderung nicht erfüllt

Beim Auftreffen am Auftreffpunkt a ist die VSG-Scheibe auf der Außenseite der Vakuumglasscheibe gebrochen und es haben sich mehrere Teile vom Floatglas auf der Innenseite losgelöst (siehe Abbildung 57 und 58), wobei das größte Stück ein Gewicht von 272 g aufwies. Damit wurden die Anforderungen in Anlehnung an EN 13049 nicht erfüllt.



Abbildung 57: Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4: Rissbildung im Glas bei Auftreffpunkt c; Ansicht von Innenseite

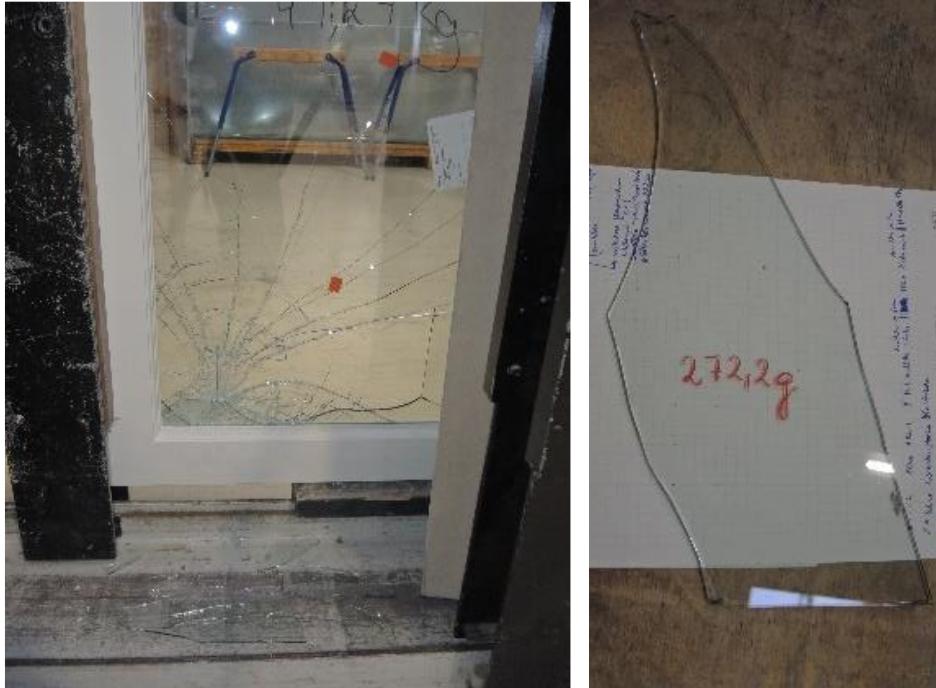


Abbildung 58: Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4: gesplittertes Glas bei Auftreffpunkt a und größtes losgelöstes Teil; Ansicht von Innenseite

Vakuum-Verglasung mit 2x VSG 3/4v4/3

Bei dieser Versuchsreihe wurden folgende Fallhöhen gemessen: 20, 50, 100, 200, 300, 450 und 700 mm. Bei einer Fallhöhe von 50 mm war eine leichte Rissbildung in der Mitte der rechten Längskante zu beobachten. Bei einer Fallhöhe von 100 mm ist bei der Ecke rechts oben, in der Mitte der Scheibe und in der Mitte der linken Längskante das Glas gesprungen. Bei einer Fallhöhe von 200 mm ist bei der Ecke links unten das Glas gesprungen. Bei einer Fallhöhe von 300 mm kam es bei der Ecke rechts unten zu weiterem Glasbruch. Bei einer Fallhöhe von 450 mm kam es in der Mitte der rechten Längskante und der Mitte der Scheibe zu weiterem Glasbruch. Es haben sich jedoch nie Teile losgelöst, welche mehr als 50 g wogen.

Fallhöhe 700 mm:

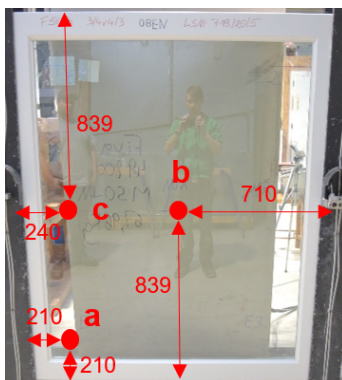


Abbildung 59: Vakuum-Verglasung mit 2x VSG 3/4v4/3: Auftreffpunkte in mm und Abstände von Rahmen-Außenkante

Tabelle 19: Vakuum-Verglasung mit 2x VSG 3/4v4/3: Ergebnistabelle bei Fallhöhe 700 mm

Auftreffpunkte in Prüfreihefolge	Beobachtungen	Ellipsoid passt durch Öffnung?	Teile auf gefährdende Art und Weise losgelöst?	Masse eines losgeösten Teils größer als 50 g?
b: Scheibenmitte	Glasbruch	Nein	Nein	Nein
c: Mitte Längskante	Glasbruch	Nein	Nein	Nein
a: nahe linker unterer Ecke	Glasbruch	Nein	Nein	Nein

Bei der Belastung durch den Zwillingsreifen auf den Auftreffpunkten ist das Glas zwar gebrochen, durch die VSG-Scheiben haben sich jedoch nur kleine Splitter des Glases losgelöst (siehe Abbildung 60), wobei keines mehr als 50 g wog. Die Anforderungen laut EN 13049 wurden erfüllt und es wurde Klasse 4 erreicht.



Abbildung 60: Vakuum-Verglasung mit 2x VSG 3/4v4/3: Ansicht von der Innenseite nach dem Versuch

2-Scheibenisoliervglas 4/18/8

Um einen Vergleich zu den Vakuumgläsern ziehen zu können, wurde der Rahmen mit der LS Nr. 719/2020/1 mit einer Isolierglasscheibe neu verglast, wobei sich die 4 mm Scheibe auf der bewitterten Seite (Außenseite) befand. Es wurde also auf die 4 mm Scheibe gependelt.

Bei dieser Versuchsreihe wurden folgende Fallhöhen gemessen: 50, 100, 200 und 300 mm. Bei den Fallhöhen 50, 100 und 200 mm waren keine Beschädigungen an der Scheibe zu beobachten.

Fallhöhe 200 mm:

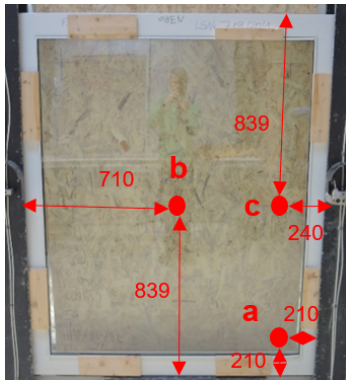


Abbildung 61: 2-Scheibenisoliertes Glas 4/18/8 (Fallhöhe 200 mm): Auftreffpunkte und Abstände in mm von Rahmen-Außenkante

Tabelle 20: 2-Scheibenisoliertes Glas 4/18/8: Ergebnistabelle bei Fallhöhe 200 mm

Auftreffpunkte in Prüfreihefolge	Beobachtungen	Ellipsoid passt durch Öffnung?	Teile auf gefährdende Art und Weise losgelöst?	Masse eines losgeösten Teils größer als 50 g?
a: nahe rechter unterer Ecke	Keine	Nein	Nein	Nein
c: Mitte Längskante	Keine	Nein	Nein	Nein
b: Scheibenmitte	Keine	Nein	Nein	Nein

Es waren keine Beschädigungen an der Fixverglasung festzustellen. Die Anforderungen laut EN 13049 wurden erfüllt und es wurde Klasse 1 erreicht. Anschließend wurde der Test mit einer Fallhöhe von 300 mm fortgesetzt.

Fallhöhe 300 mm:

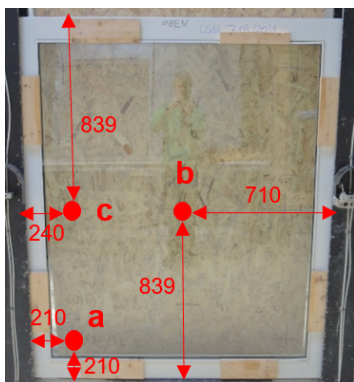


Abbildung 62: 2-Scheibenisoliertes Glas 4/18/8 (Fallhöhe 300 mm): Auftreffpunkte und Abstände in mm von Rahmen-Außenkante

Tabelle 21: 2-Scheibenisoliertes Glas 4/18/8: Ergebnistabelle bei Fallhöhe 300 mm

Auftreffpunkte in Prüfreihefolge	Beobachtungen	Ellipsoid passt durch Öffnung?	Teile auf gefährdende Art und Weise losgelöst?	Masse eines losgeösten Teils größer als 50 g?
b: Scheibenmitte	Keine	Nein	Nein	Nein

c: Mitte Längskante	Glasbruch der 4 mm Scheibe	Nein	Nein	Ja: 265,5 g Anforderung nicht erfüllt
a: nahe linker unterer Ecke	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt	nicht durchgeführt

Beim Auftreffen, des Zwillingreifers auf den Punkt c ist die Isolierglasscheibe gebrochen und es haben sich mehrere Teile der 4 mm Float-Glasscheibe losgelöst, wobei das größte Stück ein Gewicht von 265,5 g aufwies. Damit wurden die Anforderungen laut EN 13049 nicht erfüllt und die Klasse 2 wurde nicht erreicht.

Conclusio

Die durchgeführten Stoßfestigkeitsversuche (Pendelschlagversuch gemäß EN 13049) sind in Tabelle 22 zusammengefasst:

Tabelle 22: Zusammengefasste Stoßfestigkeitsversuche

Fallhöhe / Verglasung	20 mm	50 mm	100 mm	200 mm	300 mm	450 mm	700 mm
Vakuum-Verglasung 4v4	nicht bestanden	---	---	---	---	---	---
Vakuum-Verglasung mit 1xVSG 3/4v4	bestanden	nicht bestanden	---	---	---	---	---
Vakuum-Verglasung mit 2xVSG3/4v4/3	bestanden	bestanden	bestanden	bestanden	bestanden	bestanden	bestanden
2-Scheiben-isolierglas 4/18/8	bestanden *	bestanden	bestanden	bestanden	nicht bestanden	---	---
		*Hier wurde kein Versuch durchgeführt, die Klassifizierung erfolgte aufgrund der bestanden höheren Fallhöhe.					

Ein einfaches Vakuumglas mit zwei 4 mm Float-Glasscheiben hat eine sehr geringe Stoßfestigkeit. Wird die Vakuumverglasung einseitig mit einer VSG-Scheibe ausgeführt, bietet diese schon einen höheren Widerstand gegen Anpralllasten, jedoch immer noch weniger als bei handelsüblichem 2-Scheibenisolierglas. Wird bei Vakuumverglasungen beidseitig VSG eingesetzt, erreicht man eine hohe Stoßfestigkeit, welche auch höher ist als die einer Isolierglasscheibe mit 4 mm Floatglas. Ursache für die geringe Stoßfestigkeit von Vakuumglas sind die Pillar, die als Abstandhalter in einem Raster von 20 mm über die gesamte Glasfläche verteilt sind, und beim Aufprall punktuelle Spannungsspitzen erzeugen, die sehr rasch zum Glasbruch führen. Damit haben sich die Ergebnisse aus dem Projekt VIG-SYS-Reno bestätigt, wobei damals anstelle von Floatglas ESG-Scheiben zum Einsatz gekommen sind.

5.3.4. Einbruchhemmung

Die einbruchhemmenden Eigenschaften eines historischen Kastenfensters wurden bisher, soweit bekannt, noch nicht untersucht. Anhand eines Standard Prototyps soll ausgelotet werden, inwieweit Anforderungen der Widerstandsklasse WK2/RC2 erfüllt werden können bzw. wo die potenziellen Schwachpunkte der Standardkonstruktion liegen.

Material und Methoden

Zur Beurteilung der einbruchhemmenden Eigenschaften wurde folgender Prototyp (Abbildung 63) untersucht.

- Prototyp: 2-flügeliges Leistenpfosten-Kastenfenster aus Holz mit Klipp-Klapp-Oberlichte, zur nicht bewitterten Seite öffnend (2-flügelige Fenster und Oberlichte innen) bzw. zur bewitterten Seite öffnend (Oberlichte außen), STAM: 1510 x 2510 mm, Hersteller: Tischlerei Alois Winkler, Maria Schmolln 84, 5241 Maria Schmolln



Abbildung 63 Ansicht des Prototyps von Angriffsseite

Die Versuche wurden gemäß den zur Beurteilung der einbruchhemmenden Eigenschaften relevanten Prüfnormen durchgeführt, um Vergleiche zu marktüblichen Fensterkonstruktionen ziehen zu können. Zur Ermittlung der einbruchhemmenden Eigenschaften wurde der Prototyp mit Ausnahme der Klipp-Klapp-Oberlichte folgenden Untersuchungen unterzogen.

- | | |
|----------------------------|--------------------|
| • Allgemeine Festlegungen | gemäß ÖNORM B 5338 |
| • Anforderungen | gemäß EN 1627 |
| • statische Belastung | gemäß EN 1628 |
| • dynamische Belastung | gemäß EN 1629 |
| • manuelle Belastungstests | gemäß EN 1630 |

Anmerkungen:

- zur Bewertung wurde jeweils „nur“ die äußere Fensterebene (äußerer Flügel) herangezogen und die innere Fensterebene blieb dabei unberücksichtigt.
- zu ÖNORM B 5338 und EN 1627: In diesen Normen ist festgelegt, welche Belastungen das Element standhalten muss und wie ein Versagen zu beurteilen ist. Für die

Versuche wurde die für Fenster meist angewandte Widerstandsklasse WK2/RC2 als Anforderung festgelegt.

- zur statischen Belastung: es wird in WK2/RC2 auf definierte Punkte eine Kraft von 3 kN aufgebracht.
- zur dynamischen Prüfung: Diese wurde nach den Ergebnissen der statischen Belastung nicht durchgeführt (es würde in WK2/RC2 ein Pendelschlagversuch mit einem 50 kg Doppelreifen aus einer Fallhöhe von 450 mm auf definierte Punkte durchgeführt werden).
- zu manuellen Belastungstests: die Belastung in WK2/RC2 erfolgt mit Werkzeugsatz A2 (im wesentlichen Schraubendreher bis 365 ± 25 mm Länge) für 3 Minuten und ein Versagen tritt ein, wenn eine definierte Öffnung geschaffen wurde.

Ergebnisse

Statische Belastung

Im Zuge der statischen Belastungsversuche wurde zuerst die Verriegelung (Treibriegel) im oberen und unteren Stulpbereich (siehe Tabelle 23, Abbildung 64 und Abbildung 65) belastet.

Tabelle 23: statische Belastung, Element öffnet nicht zur Angriffsseite (Öffnungsseite)

Belastungspunkt	Spaltlehre passt durch Öffnung	Beobachtung
Gfl V1	ja	Bei äußerer Flügelebene Vierkantbolzen verbogen und aus Verriegelung herausgedrückt. Innere Flügelebene war nicht eingehängt.
Gfl V4	ja	Bei äußerer Flügelebene Vierkantbolzen verbogen und aus Verriegelung herausgedrückt, des Weiteren bei der inneren Flügelebene den unteren Vierkantbolzen aus Verriegelung herausgedrückt.

Legende: HS = Hauptschloss, ZV = Zusatzverriegelung, B = Band, BS = Bandsicherung, STV = Stehflügelverriegelung, Gfl = Gehflügel, Stfl = Stehflügel



Abbildung 64: Links: statische Belastung des Gehflügels im oberen Stulpbereich (Belastungspunkt Gfl V1); Rechts: Verformung des äußeren Treibriegels



Abbildung 65: Links: statische Belastung des Gehflügels im unteren Stulpbereich (Belastungspunkt Gfl V4), der äußere Flügel verformt sich so stark, dass er bereits auf den inneren Flügel drückt; Rechts: Verformung des inneren Treibriegels!

Aufgrund der großen Verformungen wurden die Anforderungen der EN 1627 in Widerstandsklasse RC2 NICHT erfüllt. Das Verriegelungssystem ist für ein nach innen öffnendes Fenster an dieser Stelle deutlich zu schwach dimensioniert.

Anschließend wurde die Schließseite eines nach außen öffnenden Fensters (siehe Tabelle 24) beim Glasanschluss belastet, d. h. dass die Last so aufgebracht wurde, dass sich die Glasscheibe am Holz des Glasfalzes nicht abstützen konnte, sondern die Belastung Richtung Kittfuge erfolgte.

Tabelle 24: statische Belastung, Element öffnet zur Angriffsseite (Schließseite)

Belastungspunkt	Spaltlehre passt durch Öffnung	Beobachtung
Füllung 3 E9	nein	keine
Füllung 3 E10	nein	keine
Füllung 3 E11	nein	keine
Füllung 3 E12	nein	keine
Füllung 3 E13	nein	keine
Füllung 3 E14	nein	keine
Füllung 3 E15	nein	keine
Füllung 3 E16	nein	keine

Legende: HS = Hauptschloss, ZV = Zusatzverriegelung, B = Band, BS = Bandsicherung, STV = Stehflügelverriegelung, Gfl = Gehflügel, Stfl = Stehflügel

Die Anforderungen der EN 1627 in Widerstandsklasse RC2 werden von der Glasanbindung für ein nach außen öffnendes Fenster erfüllt.

Manuelle Belastung

Im Anschluss wurden die noch nicht belasteten Flügel eines manuellen Einbruchsversuches mit dem Werkzeugsatz A2 (z. B. Schraubendreher 365 ±25 mm Länge) unterzogen. Die Belastung erfolgt einmal bandseitig und einmal im Bereich der Anbindung des Glases zum Flügel (Füllung) (siehe Tabelle 25 und Abbildung 66).

Tabelle 25: manuelle Belastung, Element öffnet nicht zur Angriffsseite (Öffnungsseite)

Belastungsbereich	Werkzeugsatz	Widerstandszeit [m'ss"]	Beobachtungen
Bandseite Stfl	A2	3'06"	Keine durchgangsfähige Öffnung geschaffen.
Füllungsanbindung Füllung F3	A2	1'39"	Durchgangsfähige Öffnung geschaffen.

Legende: HS = Hauptschloss, ZV = Zusatzverriegelung, B = Band, BS = Bandsicherung, STV = Stehflügelverriegelung, Gfl = Gehflügel, Stfl = Stehflügel, SD = Schraubendreher



Abbildung 66: Links: nach manueller Belastung der Glasanbindung geöffnetes Glasfeld
Rechts: Beschädigungen am bandseitigen Stehflügel nach manueller Belastung

Die Anforderungen der EN 1627 in Widerstandsklasse RC2 werden von der Bandseite erfüllt. Die Glasanbindung hielt der Belastung nicht stand.

Conclusio

Die Versuche zu den einbruchhemmenden Eigenschaften eines nachgebauten historischen Kastenfensters haben gezeigt, dass die Anforderungen gemäß ÖNORM B 5338 bzw. EN 1627 in Widerstandsklasse WK2/RC2 nicht erfüllt werden konnten. Ursache dafür ist eine deutlich zu schwach dimensionierte Treibriegelverriegelung im Bereich des Stulpes und die Ausführung der Glasanbindung nur mit Kittfase.

Um die Anforderungen zu erfüllen, wäre eine Redimensionierung des Kastenfensters notwendig. Dies würde aber das Erscheinungsbild der historischen Fenster deutlich verändern. Es müsste das Verriegelungssystem und die Glasanbindung grundlegend geändert werden (mehr und verstärkte Verriegelungspunkte, keine Kittfase als Glasanschluss), dieses würde wiederum deutlich größere Profilquerschnitte mit sich bringen, damit dem Anspruch,

den die Kastenfenster in ihrem Erscheinungsbild haben, nicht wesentlich zu ändern zuwiderlaufen.

5.3.5. Vakuumglas im Differenzklima

Material und Methode

Zur Beurteilung der Verformung und der Kondenswasserneigung eine Vakuumglasscheibe (kein Kastenfenster!) im Differenzklima wurde folgendes Fenster untersucht (siehe auch Abbildung 67).

- Fixverglasung aus Holz, STAM 1420 x 1678 mm, Verglasung: 4v4, LS Nr. 719/2020/1

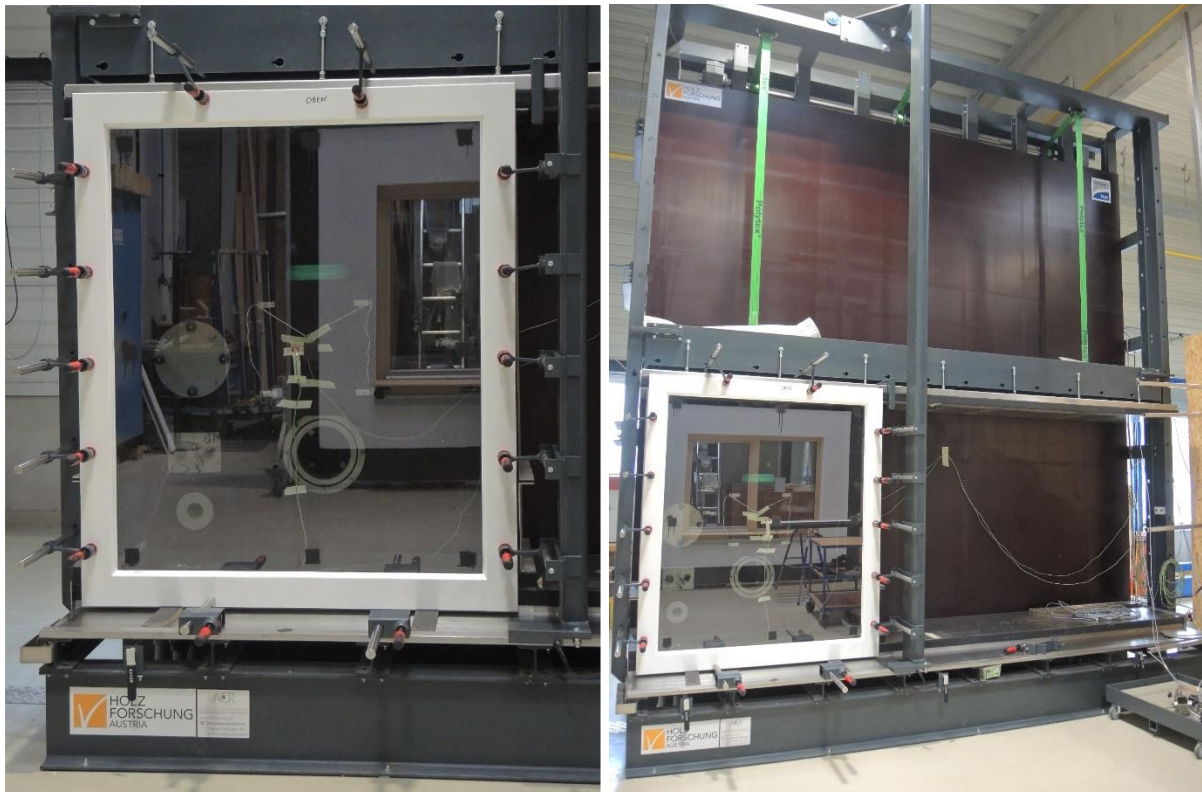


Abbildung 67: Ansicht der Fixverglasung von innen, eingebaut in den Klimaprüfstand der Holzforschung Austria

Das Verhalten der Fixverglasung wurde bei folgender Klimalast (Soll-Klimata) untersucht.

- Innenklima 20 °C / 46 %, Außenklima -15 °C

Die Außen- und die Innentemperaturen betragen zu Versuchsbeginn etwa 20° C. Das Außenklima wurde innerhalb von etwa einer Stunde auf -15 °C gesenkt und für 24 Stunden gehalten. Danach wurde die Außentemperatur wieder auf +20 °C aufgeheizt, die Temperatur für etwa 3 Stunden gehalten und anschließend der Versuch beendet.

Während dem Differenzklimaversuch wurden folgende Messwerte laufend aufgezeichnet.

- Temperatur außen in °C
- Temperatur innen in °C
- Relative Luftfeuchtigkeit innen in %

- Temperatur Glasoberfläche außen in Scheibenmitte in °C

- Temperatur Glasoberfläche innen in Scheibenmitte in °C
- Verformung des Glases bei der Ecke links oben in mm
- Verformung des Glases bei der Kante links mittig in mm
- Verformung des Glases bei der Ecke links unten in mm
- Verformung des Glases bei der Kante mittig oben in mm
- Verformung des Glases in Scheibenmitte in mm
- Verformung des Glases bei der Kante mittig unten in mm

Abbildung 68 und 69 zeigt illustriert die Messpunkte.

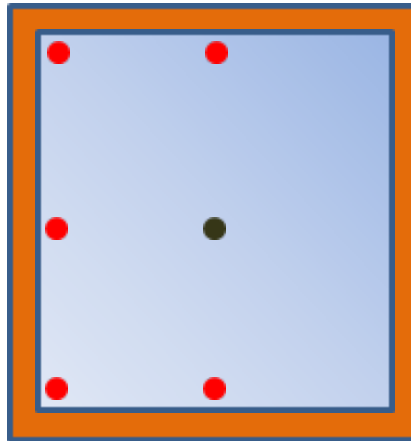


Abbildung 68: Skizze der Fixverglasung (Ansicht von innen), Messpunkte der laufenden Glasoberflächentemperaturmessung (schwarzer Punkt) und Verformungsmessung (rote Punkte und schwarzer Punkt)

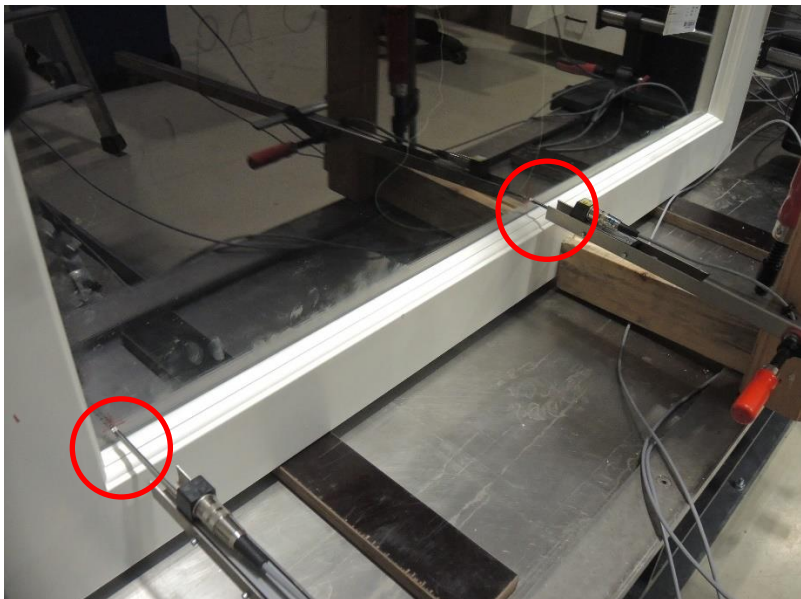


Abbildung 69: laufende Verformungsmessung auf der Innenseite des Glases

Zusätzlich zu den laufenden Messungen wurden während dem Versuch zu sieben Zeitpunkten folgende Messwerte bestimmt (Abbildung 70).

- Temperatur Glasoberfläche innen bei der Ecke links oben in °C
- Temperatur Glasoberfläche innen bei der Kante links mittig in °C
- Temperatur Glasoberfläche innen bei der Ecke links unten in °C

- Temperatur Glasoberfläche innen bei der Kante mittig oben in °C
- Temperatur Glasoberfläche innen in Scheibenmitte in °C
- Temperatur Glasoberfläche innen bei der Kante mittig unten in °C
- Temperatur Glasoberfläche innen bei der Ecke rechts oben in °C
- Temperatur Glasoberfläche innen bei der Kante rechts mittig in °C
- Temperatur Glasoberfläche innen bei der Ecke rechts unten in °C

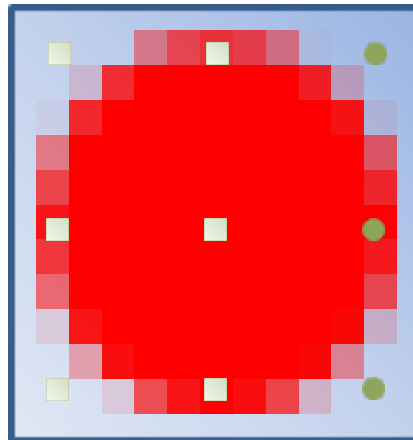


Abbildung 70: Skizze der Fixverglasung (Ansicht von innen), Messpunkte der Glasoberflächentemperaturmessungen auf der Innenseite (grüne Punkte)

Die Temperaturen der Glasoberfläche wurden mit einem Infrarot-Thermometer etwa 5 cm von den Kanten entfernt gemessen (Abbildung 71).

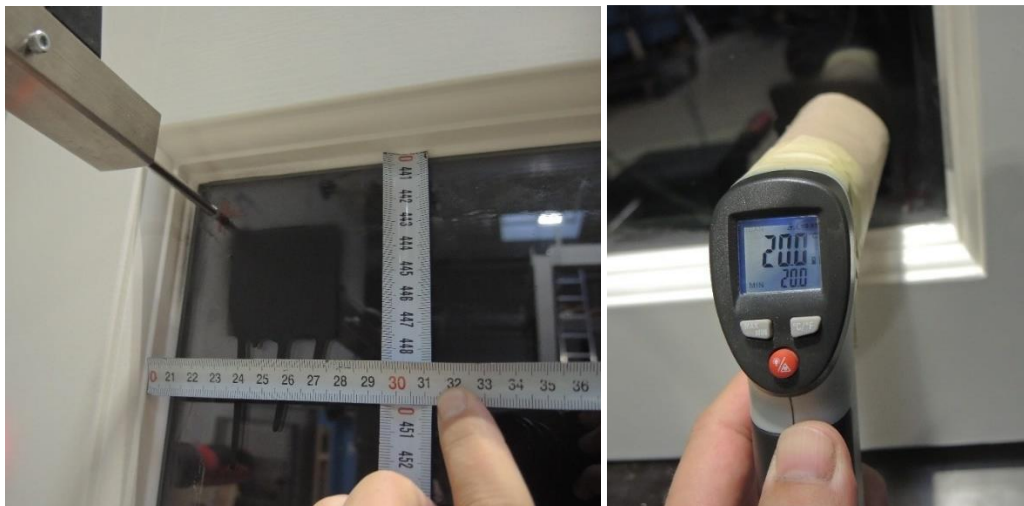


Abbildung 71: links: Temperatur-Messbereich (schwarzer Bereich) und daneben in der Ecke Verformungsmessfühler; rechts Messung der Glasoberflächentemperatur mittels Infrarot-Thermometer

Zu den oben genannten sieben Zeitpunkten wurde die Fixverglasung auch hinsichtlich Kondensatbildung auf Grundlage der „Bewertungshilfe Kondensat“ bewertet. Laut dieser Bewertungshilfe wird das Ausmaß des Kondensats bezogen auf die Fläche und bezogen auf die Kondensatmenge klassifiziert. Die Klassen sind im Folgenden gelistet.

Ausmaß des Kondensats bezogen auf die Fläche:

- P punktuell
- L linienförmig
- T teilflächig

- V vollflächig

Ausmaß des Kondensats bezogen auf die Kondensatmenge:

- 0 kein Kondensat
- 1 geringfügig benetzt (beschlagen)
- 2 Tropfen sichtbar, jedoch nicht abrinnend
- 3 abrinnende Tropfen, Lackenbildung am/im Fenster
- 4 abrinnende Tropfen, Lackenbildung an angrenzenden Oberflächen
- E Eisbildung

Ergebnisse

Das folgende Diagramm (Abbildung 72) zeigt den Temperaturverlauf über die Versuchsdauer auf den Glasoberflächen innen und außen, sowie die Innen- und Außentemperatur.

Während der Klimatisierung (innen +20 °C / außen -15 °C) war die Temperatur in Scheibenmitte der Vakuumglasscheibe 4/v/4 relativ konstant. Im Mittel betrug diese auf der Innenseite +17,3 °C und auf der Außenseite -13,5 °C. Das ist eine Temperaturdifferenz von 30,8 °C auf den gegenüberliegenden Seiten der 8 mm dicken Vakuumglasscheibe.

Nach der Klimatisierung passten sich die Glasoberflächentemperaturen wieder etwa den Innen- bzw. Außentemperaturen von etwa 20 °C an.

Hinweis: Der zackige Kurvenverlauf der Außentemperatur zu Versuchsende hängt mit der automatisierten Beheizung der Außenklimakammer zusammen.

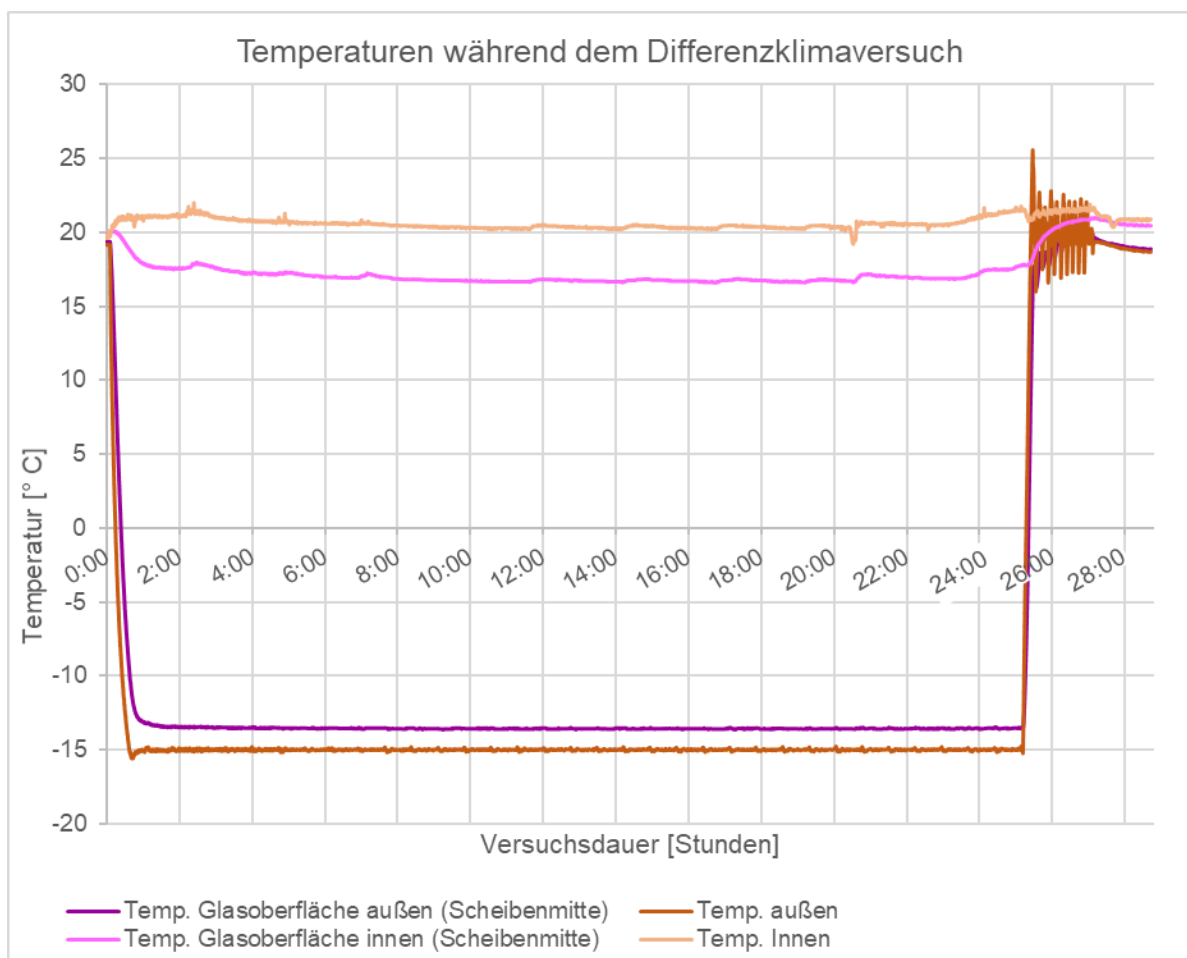
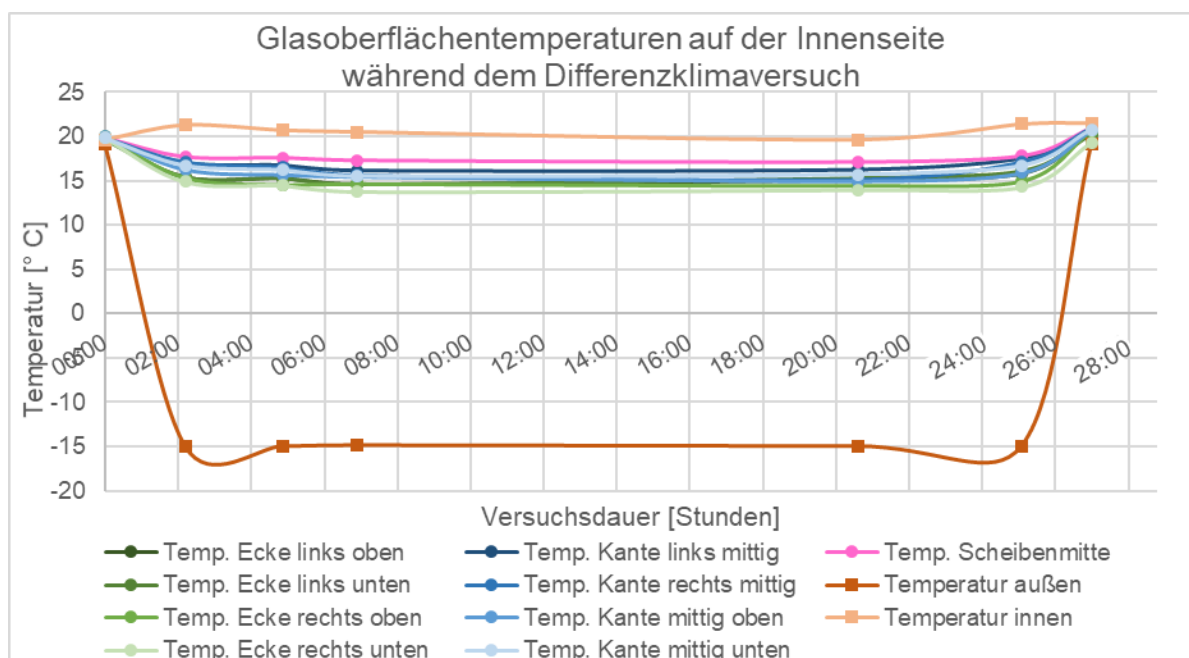


Abbildung 72: Temperaturen während dem Differenzklimaversuch

Die folgenden Diagramme (Abbildung 73) zeigen die, zu den Messzeitpunkten gemessenen, Glasoberflächentemperaturen auf der Innenseite sowie die Innen- und Außentemperatur.

Während der Klimatisierung (innen +20 °C / außen -15 °C) waren die Glasoberflächentemperaturen auf der Innenseite relativ konstant. Mit im Mittel 17,5 °C in Scheibenmitte bestätigen diese zusätzlichen Messungen die Ergebnisse der laufenden Temperaturmessung. Die Messwerte in der Mitte der Scheibenkanten lagen zwischen 15,0 °C und 17,5 °C. In den Scheibenecken wurden die geringsten Temperaturen gemessen. Diese lagen zwischen 13,8 °C und 16,7 °C. Nach der Klimatisierung passten sich die Glasoberflächentemperaturen wieder etwa den Innen- bzw. Außentemperaturen von etwa 20 °C an.

Es wird davon ausgegangen, dass die Oberflächentemperaturen sinken, je näher bei der Kante bzw. der Ecken gemessen wird. Die Messpunkte lagen, bedingt durch den Versuchsaufbau, etwa 5 cm von den Kanten / Ecken entfernt.



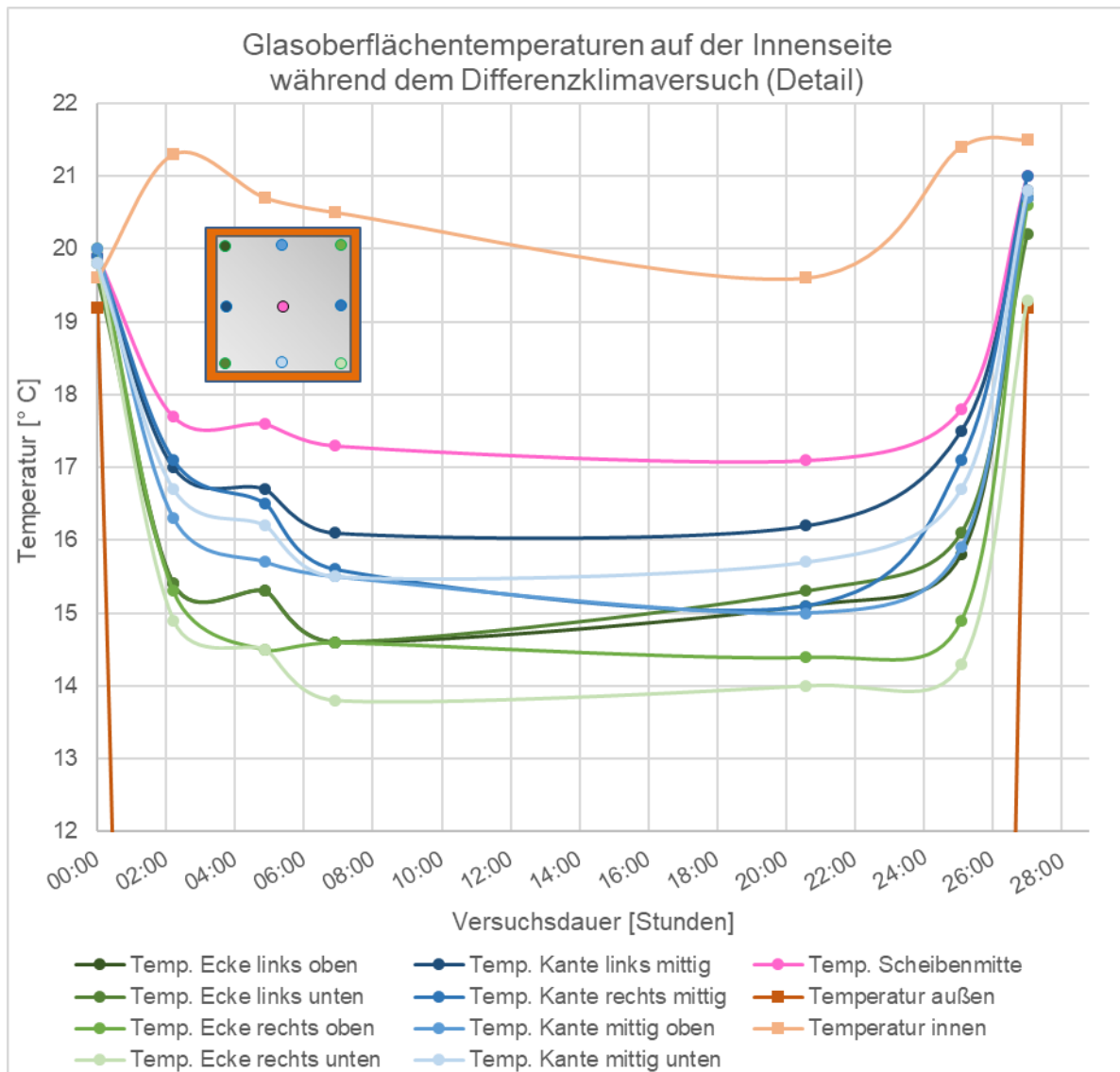


Abbildung 73: Temperaturen während dem Differenzklimaversuch. oben: Übersicht, unten Detailansicht

Das folgende Diagramm (Abbildung 74) zeigt die Verformung des Glases an definierten Messpunkten sowie die Innen- und Außentemperatur über die Versuchsdauer.

Hinweis: positive Werte = Verformung Richtung Innenseite / negative Werte = Verformung Richtung Außenseite.

Während der Klimatisierung waren die Verformungen an den einzelnen Messpunkten relativ konstant. Mit im Mittel +5,5 mm Verformung Richtung Innenseite wurde in Scheibenmitte erwartungsgemäß die höchste Verformung gemessen (Abbildung 75). Die Messwerte in der Mitte der Scheibenkanten lagen im Mittel bei +0,6 mm bis +0,8 mm. In den Ecken verformte sich die Scheibe Richtung Außenseite. Hier wurden die geringsten Verformungen von im Mittel -0,3 mm bis -0,4 mm gemessen.

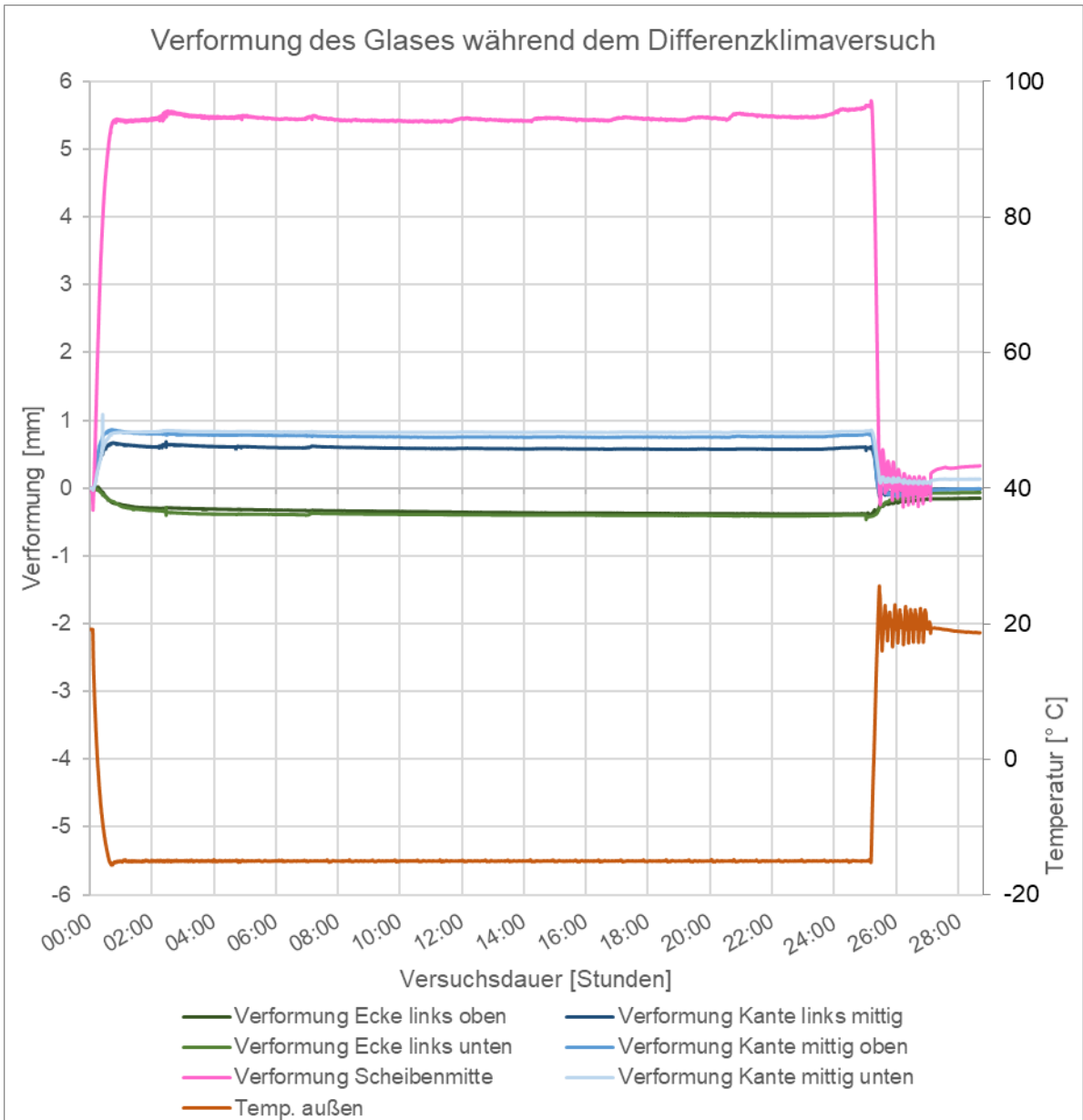


Abbildung 74: Verformung des Glases während dem Differenzklimaversuch.
positive Werte = Verformung nach innen / negative Werte = Verformung nach außen



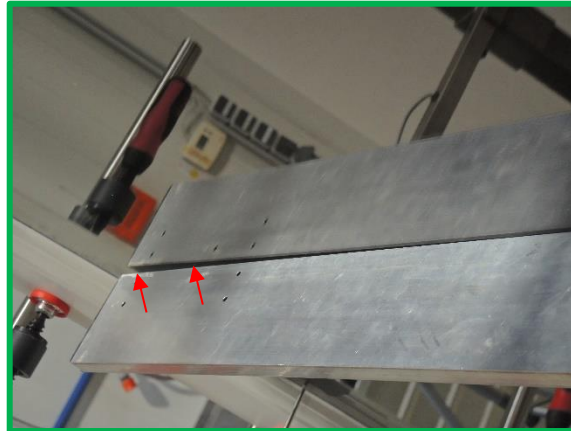


Abbildung 75: Verformung des Glases während des Differenzklimaversuchs: Die Messlatte auf dem Glas liegt in der Scheibenmitte auf, rechts und links ist ein Spalt.

Während der Klimatisierung (innen $+20\text{ °C}$ / außen -15 °C) wurde Kondensatbildung auf der Innenseite des Glases beobachtet. Die Taupunkttemperatur bei einem Innenklima von etwa 20 °C / 46% liegt bei $8,0\text{ °C}$. Die während dem Differenzklimaversuch gemessenen Oberflächentemperaturen lagen deutlich darüber ($\geq 13,8\text{ °C}$). Es ist jedoch anzunehmen, dass die Temperaturen näher bei der Kante / Ecke geringer sind, als etwa 5 cm davon entfernt, wie es bei der Glasoberflächentemperaturmessung der Fall war.

In der Tabelle 26 ist das Ausmaß des Kondensats den Klassen laut „Bewertungshilfe Kondensat“ zugeordnet.

Tabelle 26: Bewertung des Kondensats während des Differenzklimaversuchs

Versuchsdauer [Stunden]	Außentemperatur und Innenklima	Ausmaß des Kondensats bezogen auf die ...		Bemerkung
		Fläche	Kondensatmenge	
00:00	außen 19°C innen 20°C / 45 %	-	-	-
02:15	außen -15°C innen 20°C / 46 %	L	1	4-seitig beim Glasanschluss
05:00		L	1	4-seitig beim Glasanschluss
		T	2	in allen Glasecken
07:00		L	2	beim Glasanschluss unten und seitlich
		L	3	beim Glasanschluss oben
20:30		T	3	in allen Glasecken
		L	2	beim Glasanschluss unten und seitlich
		L	3	beim Glasanschluss oben
25:00		T	3	in allen Glasecken
		L	2	beim Glasanschluss unten und seitlich
27:00	außen 19°C innen 21°C / 45 %	L	2	oben und unten beim Glasanschluss

Ausmaß des Kondensats bezogen auf die Fläche:

- P punktuell
- L linienförmig
- T teilflächig
- V vollflächig

Ausmaß des Kondensats bezogen auf die Kondensatmenge:

- 0 kein Kondensat
- 1 geringfügig benetzt (beschlagen)
- 2 Tropfen sichtbar, jedoch nicht ab rinnend
- 3 ab rinnende Tropfen, Lackenbildung am/im Fenster
- 4 ab rinnende Tropfen, Lackenbildung an angrenzenden Oberflächen
- E Eisbildung

Die Vakuumglasscheibe (kein Kastenfenster) zeigt bei den gewählten Klimabedingungen erwartungsgemäß Kondenswasser im Glasanschlussbereich (siehe Abbildung 76 bis Abbildung 78).

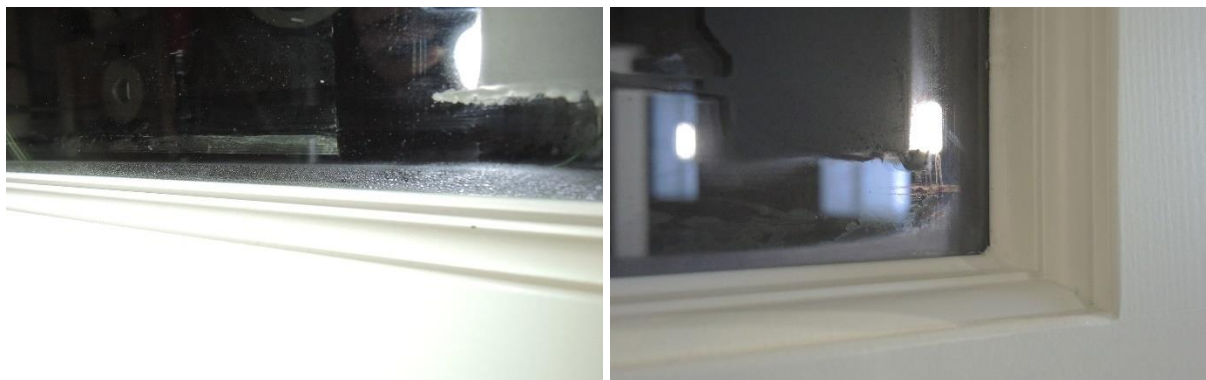


Abbildung 76: Beispiele für Kondensat: Klasse 1 (geringfügig benetzt (beschlagen); links linienförmig (L), rechts teilflächig (T))



Abbildung 77: Beispiel für Kondensat: Klasse 2 (Tropfen sichtbar, jedoch nicht ab rinnend); teilflächig (T)



Abbildung 78: Beispiele für Kondensat: Klasse 3 (abrinnende Tropfen, Lackenbildung am/im Fenster); oben linienförmig (L), unten teilflächig (T)







5.4. Performance Monitoring der Kastenfenster unter realen Bedingungen

5.4.1. Übersicht des Monitoringsystems und der Testobjekte

Bezugnehmend auf objektspezifische Gegebenheiten und den technischen Möglichkeiten bei den ausgewählten Objekten wurde entweder eine Variante „Standard“ oder „Detaillierte“ realisiert. Bei der zweiten Version wurden zusätzliche Temperaturmesspunkte und eine Messung des Wärmeflusses vorgesehen. Diese Variante war auch aufgrund der notwendigen Sensorverkabelung mit einem wesentlichen Mehraufwand verbunden. Die dabei notwendige Verkabelung erforderte Kabeldurchführung und entsprechende Bohrungen im Stock bzw. Flügel welche nach Abbau des Monitorings wieder instand zu setzen waren.

Die Tabelle 27 gibt hierzu einen Überblick mit den Details wie Lage, Sanierungsvariante und Art der Verglasung, Monitoring-Variante und welche Ausführungskonfigurationen den einzelnen in der Analyse verwendeten Fensterkürzel. Bei den Testfenstern mit VIG wurden je nach Standortsituation Testfenster mit VIG ($U_g=0,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) am Innen- oder/und Außenflügel entweder als Bestandssanierungs- oder neues Kastenfenster realisiert. Die Referenzfenster ohne VIG waren ebenfalls standortspezifisch entweder klassisch als Einscheibenverglasung oder mit Zweischeibenisolierverglasung mit einem U_g -Wert von $1,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ am Innenflügel realisiert.

Tabelle 27: Übersicht der Objekte, Sanierungsvariante und Details hinsichtlich Monitoring- und Fenstervarianten

		Objekt					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
		Puchberg	Wien Grinzing	Wien TU	Wilhering	Salzburg	Innsbruck
							
Sanierungs- variante	Glastausch	Sanierung der Außenflügel	Sanierung mit Tausch des Außen- bzw. Innenflügels	Kastenfenster -Neubau mit VIG oder IG	Kastenfenster -Neubau mit VIG oder IG	Kastenfenster -Neubau mit VIG oder IG	
Monitoring	Standard	Standard	Detailliert	Standard	Standard	Detailliert	
F1: VIG am Innenflügel	✓	-	✓	✓	✓	✓	
F2 VIG am Außenflügel	✓	✓	✓	-	✓	✓	
F3: Referenz	✓ Original float/float	-	✓ Original float/float	✓	✓ IG innen	✓ IG innen	

Da die fünf Teststandorte über ganz Österreich (Wien, Wilhering/Linz, Puchberg/Wels, Salzburg und Innsbruck) verteilt sind, wurde für eine kontinuierliche Datenerfassung ein

webbasiertes Monitoring-Konzept konzipiert und realisiert. Aufgrund der COVID19-bedingten Einschränkungen und der daraus resultierenden reduzierten Reisemöglichkeiten war es notwendig, von einer ursprünglichen Offline-Datenerfassung mit einzelnen Loggern auf ein Online-Fernüberwachungskonzept zu wechseln. Dafür wurden die zwei IoT-basierte (Internet of Things) Monitoring-Varianten (Standard und Detailliert) entwickelt. Die Variante „Detailliert“ nutzt eine präzise Datenlogger- und Sensorkombination, welche normalerweise für Labormessungen benutzt wird. Zusammen mit einem Minicomputer (Arduino Yun) und ein UMTS-Modem werden die aufgezeichneten Daten über einen Restful-Service weiter an den Monitoring-Server des Forschungsbereichs „Bauphysik und Bauökologie E259/3“ der TU Wien - Fakultät Architektur übertragen. Die zweite Variante „Standard“ ist eine kostengünstigere Lösung, die handelsübliche low-cost LoraWan (Dragino LHT65 (Dragino 2021a)) Sensorknoten, ein LoraWan-Gateway (Dragino LPS8 (Dragino 2021b)) und denselben Mikrocomputer mit UMTS-Modem für die Datenübertragung verwendet.

Tabelle 28 zeigt die Details der verwendeten Geräte, der erfassten physikalischen Größen und dessen Wertebereiche sowie die Genauigkeit der Sensoren. Zusätzlich zu den werksüblichen Tests wurde eine Validierung der Temperatursensoren in einem Klimatestschrank bei relevanten Temperaturen (0, 10, 20 °C) durchgeführt. Die Verteilung der aufgezeichneten Werte, mit Ausnahme der externen Temperatursensoren des Standard Konzepts (Dragino LHT65 mit Dallas DS18B20 Temperatursensor), waren in einem Bereich mit plus minus 0,1 K um den Durchschnitt. Die Verteilung dieser Validierungsmessungen der externen Temperatursensoren (Dallas DS18B20 mit Dragino LHT65) der Variante „Standard“ zeigte mit etwa 0,4 °C eine größere, aber durchaus noch akzeptable Schwankung.

Um eine Vergleichbarkeit der Messdaten zu ermöglichen, wurde an allen Standorten eine idente Sensorpositionierung verwendet. Abbildung 79 veranschaulicht die Lage der Sensoren mit einer Ansicht und einem Schnitt des Kastenfensters. Oberflächentemperatur wurden an repräsentativen Punkten in der Mitte (20 cm von der Unter- und Seitenkante) und der Unterkante (20 cm von der Ecke) der Verglasung angebracht und sind in der Abbildung mit grünen Punkten dargestellt. An zwei der Standorte wurde die Variante "Detailliert" ausgeführt wobei zusätzlich zwei Temperatursensoren an den Glaskanten (mit grünen Punkten und blauer Beschriftung dargestellt) zum Einsatz kamen. Die zusätzlichen Glastemperatursensoren wurden sowohl auf der Innenseite (Messpunkt 21 bis 24) als auch auf dem äußeren Fensterflügel (Messpunkt 41 bis 44) installiert. Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit wurden an Positionen mit 20 cm Abstand von unten und 4,5 cm vor der Innenverglasung (Messpunkt 11), der Außenverglasung (Messpunkt 31) und vor der Außenverglasung (Messpunkt 51) erfasst. Die "Detailliert"-Ausführung verfügte zusätzlich noch über eine Messung des Wärmeflusses auf der Innenseite des Innenflügels direkt neben der Oberflächentemperaturmessung am Messpunkt 21.

Tabelle 28: Übersicht des verwendeten Equipments der Monitoring-Varianten „Standard“ und „Detailliert“.

Device	Messgröße Sensor	Bereich	Genauigkeit
Detailliert	Microcomputer Arduino YUN	Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit	-20 ... 80 °C typ. ±0.3 K bei 25 °C ±0.4 K bei 10 ... 40 °C
	+	Ahlborn FHAD46C0	5 ... 98 % rF ±1.8 % rF bei 10 ... 90 % rF
	USB UMTS Modem	Oberflächentemperatur	
	+	NTC-Temperatursensor und Ahlborn ZA9040FS2- Eingangsstecker	-50 ... 125 °C ±0.1 K bei 0 ... 30 °C
Datenlogger Ahlborn ALMEMO® MA2890-9	Wärmefluss	0 ... 5200 W.m ⁻²	5% bei 23 °C
Standard	Microcomputer Arduino YUN	Lufttemperatur und relative Feucht	-40 ... 80 °C typ. ±0.3 K bei 5...60 °C ±0.8 K bei -40 ... 80 °C
	+	LoraWan-node Dragino LHT65 mit	
	USB UMTS Modem	Sensiron SHT20-Sensor	0 ... 100% rF typ. ±3 % rH bei 20 ... 80 % rF
	+	Oberflächentemperatur	
	LoraWan Gateway	Externe Temperatursensor	-55 ... 125 °C ±0.5 K bei 10 ... 85 °C
Dragino LPS8	(Dallas DS18B20) für LoraWan node Dragino LHT65	±2 K bei -55 ... 125 °C	

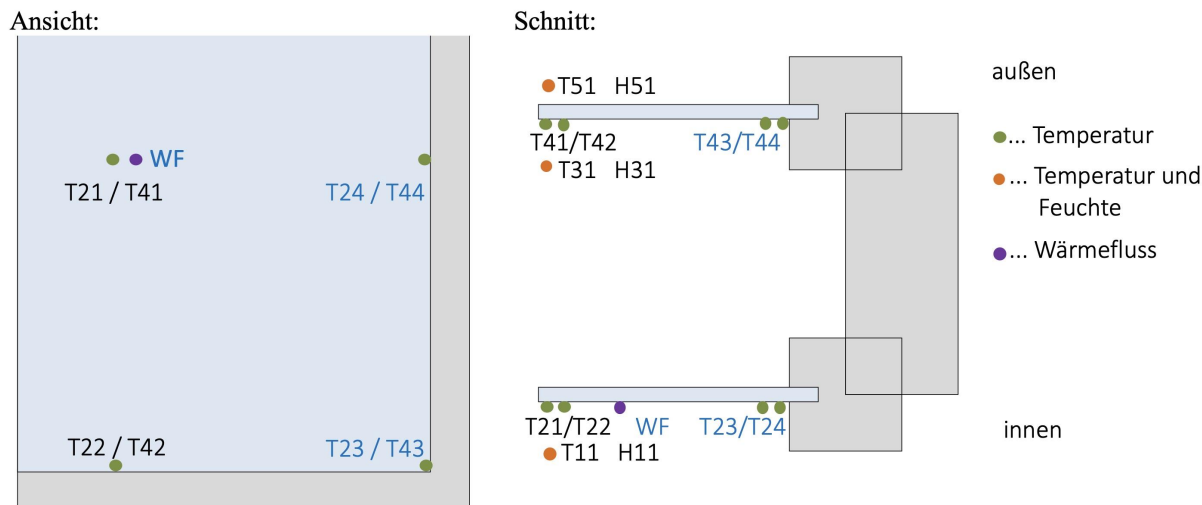


Abbildung 79: Übersicht der Sensorpositionen in Ansicht (links) und Schnitt (rechts).

5.4.2. Ergebnisse des kontinuierlichen Monitorings

Die Objektauswahl mit den sechs Standorten und den vorliegenden spezifischen Bedingungen führte zu insgesamt fünfzehn Testfenster und folglich zu einer Variabilität an Konfigurationen mit unterschiedlichen Gläsern. Bis auf die Standort P2 - Wien Grinzing und P4 – Wilhering wurde jeweils ein Standard-/Referenzfenster zusammen mit zwei Vakuumglas-Testfenster messtechnisch erfasst. Daher konnte in Folge für diesen Standort auch ein direkter Vergleich zwischen Vakuumglas innen oder außen als auch mit dem objektspezifischen Referenzfenster mit Einscheiben- oder Zweischeibenisolierverglasung durchgeführt werden. Am Standort Wilhering wurde je ein Kastenfenster mit Vakuumglas und eines mit Isolierglas am Innenflügel mit dem Monitoringsystem ausgestattet. Der Standort P2 – Wien Grinzing stellte aufgrund der Eigentümer- und Denkmalschutzsituation einen besonderen Fall dar bei dem die Realisierung anderer Ausführung als Vakuumglas am Außenflügel nicht möglich war. Deswegen wurde nur ein Fenster und einem verkürzten Zeitraum erfasst.

Mit dem zuvor beschriebenen Messkonzept wurden über annähernd ein Jahr jene Daten zur Bewertung der thermischen Performance unter realen Nutzungsbedingungen gesammelt. Hauptfokus der in Folge dargestellten Analysen und Ergebnissen liegt in der Bewertung des realen Wärmeübergangs, dem damit verbundenen U-Wert und der Abschätzung möglicher Risiken hinsichtlich lokaler Kondensationserscheinungen.

Bestimmung des In-Situ-U-Wertes in der Winterperiode 2020/2021

Die Daten der Winterperiode 2020/2021 zeigen, wie die aufgezeichnete reale thermische Performance der Kastenfenster-Prototypen mit Vakuumglas weitgehend den theoretischen Erwartungen entspricht. Die anschließende Analyse bezieht sich dabei auf Daten von kalten Wintertagen im Zeitraum vom 01.11.2020 bis 01.03.2021. Der resultierende In-situ U-Werte (siehe Abbildung 80) wurde entsprechend der Gleichungen 1 und 2 entsprechend der ISO 9869 für die Standorte P3 - Wien TU und P6 - Innsbruck, welche mit einer Monitoring-Variante „Detailliert“ ausgestattet waren, berechnet. In dieser Analyse wurden nur jene Datensätze aus Nächten mit Außenlufttemperaturen unter 5°C und innerhalb eines Zeitfenster von 1 Stunde vor und nach dem Außentemperaturminimum berücksichtigt. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass die Messsituation einer stationären Situation am ehesten entspricht. Aufgrund

der geringen Speichermasse der Verglasungen erschien ein länger nächtlicher Zeitraum oder eine Langzeitmittelung als nicht zielführend. Zu beachten ist, dass die In-Situ gemessenen U-Werte grundsätzlich sich von der Lokalisierung als U_g -Werte verstehen würden, jedoch durch den Rahmen (U_f) beeinflusst sind. Damit ist eine 1:1 Vergleichbarkeit mit berechneten U_g -Werten nicht gegeben, nichtsdestotrotz können die gemessenen Werte Anhaltspunkte zur Performance des Glases bzw. des Fensters geben. Da bei der Anwendung von Vakuumglas die den Wert beeinflussenden Holzrahmen stets eine höhere Wärmeleitung aufweisen dürften, ist der berechnete U_g -Werte vermutlich immer kleiner (besser) als der gemessene. Nachstehende Formeln 8 und 9 zeigen die weithin bekannte Berechnung von Lambda-Wert und U-Wert.

$$\lambda = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{si,j} - T_{se,j})} \quad (8)$$

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{si} + R_{\lambda} + R_{se}} = \frac{1}{R_{si} + \frac{1}{\lambda} + R_{se}} \quad (9)$$

q ... Wärmefluss

T_{si} ... Oberflächentemperatur Innen

R_{si} ... Übergangswiderstand Innen

R_{se} ... Übergangswiderstand Außen

T_{se} ... Oberflächentemperatur Außen

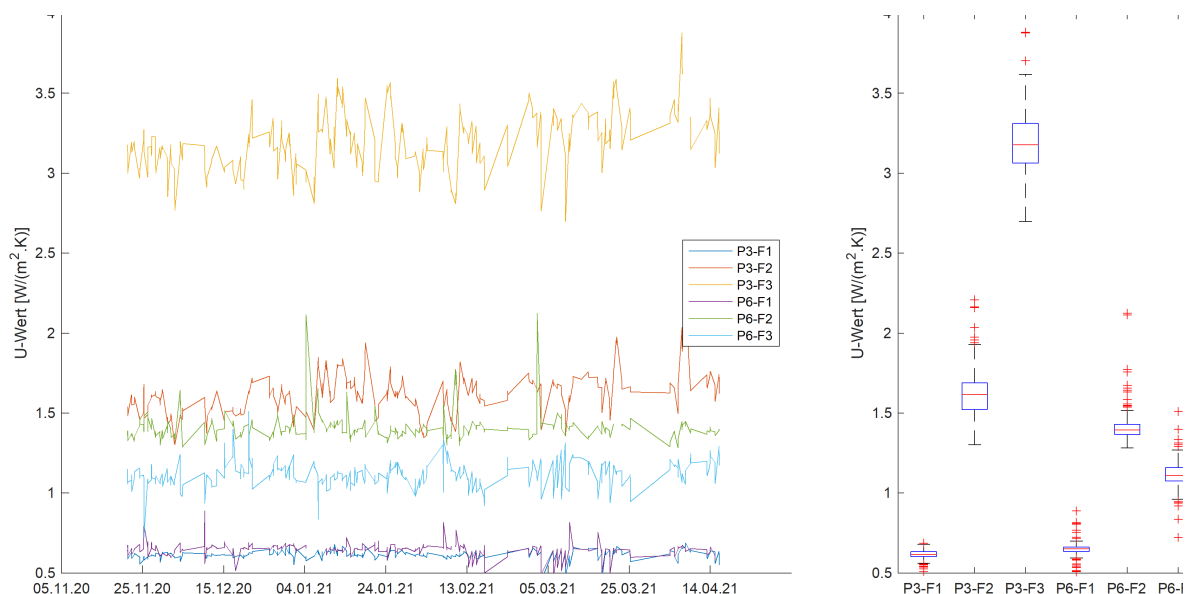


Abbildung 80: In-Situ U-Werte der Standorte TU Wien (P3) und Innsbruck (P6).

Zur Interpretation der Werte aus Abbildung 80 müssen diese mit theoretischen Werten für die verschiedenen Glaskombinationen von Innen- / Außenflügel verglichen werden:

- 3 mm Float-Glas / 3mm Float-Glas mit 2,80 Wm-2 K-1
- 3 mm Float-Glas / Zweischeibenisolierverglasung mit 0,91 Wm-2 K-1
- 3 mm Float-Glas / VIG mit 0,62 Wm-2 K-1.

Vor allem die Versionen mit VIG am Innenflügel schneiden hinsichtlich des Wärmetransports mit In-situ U-Werten um 0,6 Wm-2 K-1 sehr gut ab. Die Ausführungen mit VIG am Außenflügel schnitten jedoch mit 1,4 / 1,6 Wm-2 K-1 deutlich schlechter ab. Dies ist eventuell durch einen (erhöhten) Luftaustausch des Zwischenraums verursacht worden. Um dieser Frage und dem resultierenden Risiko der Kondensatbildung und Vereisung am Außenflügel im Detail nachzugehen wurden im Februar genau optische Vorort Inspektion in Folge von kalten Nächten durchgeführt. Bis auf den Standort P2 - Wien Grinzing waren keine Kondensatbildungen zu erkennen. In Wien-Grinzing war jedoch ein signifikanter Kondensationseffekt (siehe Abbildung 81) zu erkennen. Dies war sicher auch durch die zu diesem Zeitpunkt stattfindenden Innenausbauarbeiten und die damit höhere Luftfeuchtigkeit im Vergleich zu den anderen Testumgebungen und der mangelhaften inneren Dichtebene (insbesondere große Leckagen im Stulpbereich) begünstigt.



Abbildung 81: Kondensation am 11.2.2021 am Standort P2 - Wien Grinzing.

Bestimmung Kondensationsneigung in der Winterperiode 2020/2021

Eine detaillierte Bewertung des Kondensationsrisikos erfolgte nach erster Analyse der Gesamtdaten an einem Zeitraum mit sehr kalten Wintertage (10. bis 13.) im Februar 2021. Um die Einflüsse der einfallenden Sonneneinstrahlung und eine folglich Falscheinschätzung zu vermeiden, wurden aus den Datensätzen jene der Nachtstunden für die Berechnung verwendet. Im Detail wurde die Einschätzung des Risikos der oberflächlichen Kondensatbildung auf Basis der aufgezeichneten Oberflächentemperaturen und den zugehörigen f-Werte (entsprechend der Gleichung 10) durchgeführt.

$$f_{TMP} = \frac{T_{TMP} - T_e}{T_i - T_e} \quad (10)$$

f_{TMP} ... Temperaturfaktor am Messpunkt

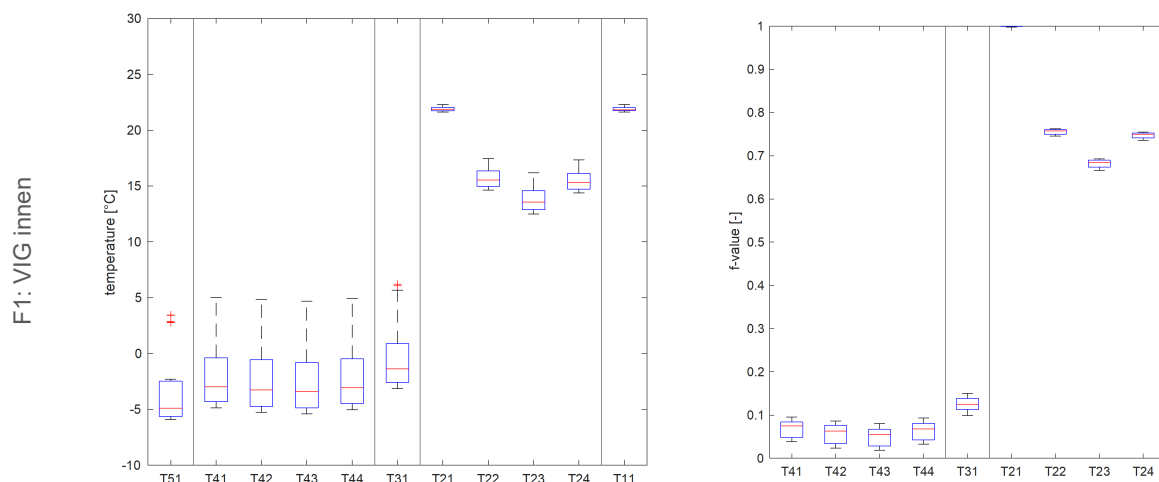
T_{TMP} ... Oberflächentemperatur am Messpunkt

T_e ... Außenlufttemperatur

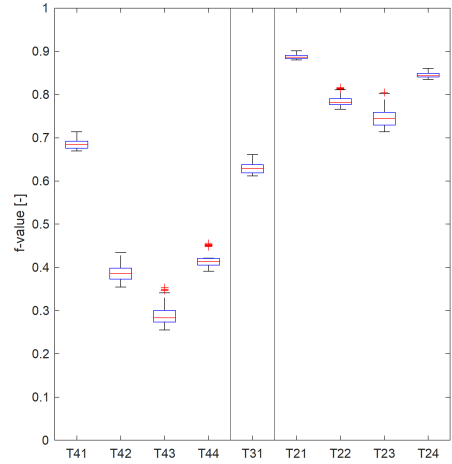
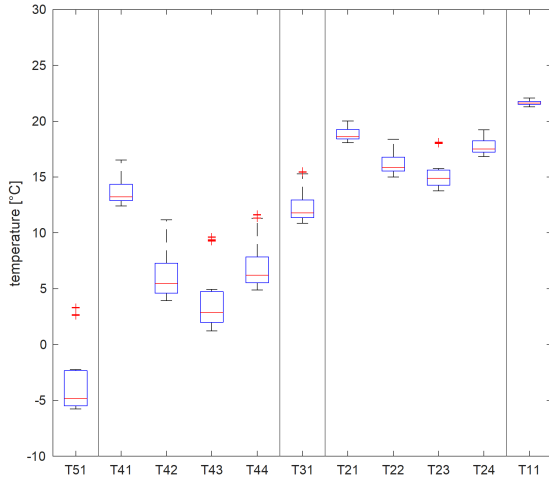
T_i ... Innenraumlufttemperatur

Abbildung 82 und Abbildung 83 zeigen die Verteilung der Temperaturen (rechts) und der f-Werte (links) der Standorte P3 - TU Wien und P6 – Innsbruck. An beiden Standorten zeigen jene Testfenster mit VIG am Innenflügel einen relativ hohen f-Werten am Innenflügel und somit kein Kondensationsrisiko. Testfenster mit VIG am Außenflügel scheinen in dieser Hinsicht (siehe kritischen Randpunkt - T23) noch etwas besser zu sein als jenes Fenster mit VIG an der Rauminnenseite. VIG außen kann dennoch in der Realität problematisch sein kann, wenn ein Luftaustausch (Undichtigkeit am Innen- und Außenflügel) zwischen innen und dem Luftzwischenraum des Kastenfensters stattfindet. Dies kann zu kritischen Kondensationssituation speziell an den Glasecken führen da alle f-Werte für das VIG außen unter 0.7 (Schwellenwert für Kondensationsrisiko) liegen. Dies ist sowohl am Standort P3 - TU Wien und P6 - Innsbruck zu sehen. Aufgrund von Sensorproblemen konnten für das Testfenster F1 (VIG innen) am Standort P6 - Innsbruck keine Daten für den Messpunkt T23 erfasst werden.

Die Verteilung der Temperaturen und der berechneten f-Werte für die Standorte mit "Standard"-Monitoring (P1 - Puchberg, P2 - Wien Grinzing, P4 - Wilhering und P5 – Salzburg) sind in Abbildung 84 und Abbildung 85 angeführt und zeigen ein sehr ähnliches Bild hinsichtlich Kondensationsrisiko.



F2: VIG außen



F3: Original – Float/Float

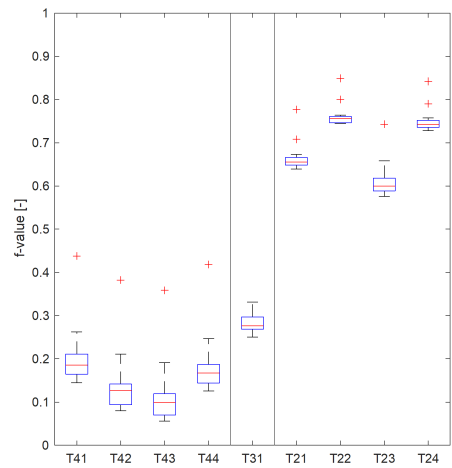
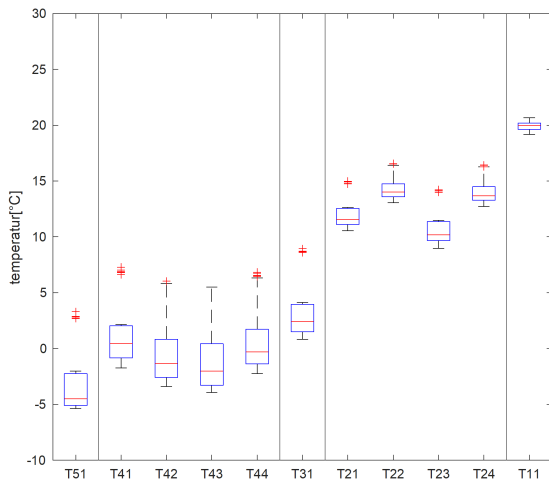
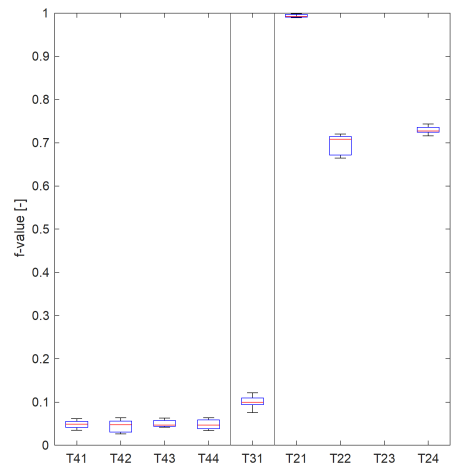
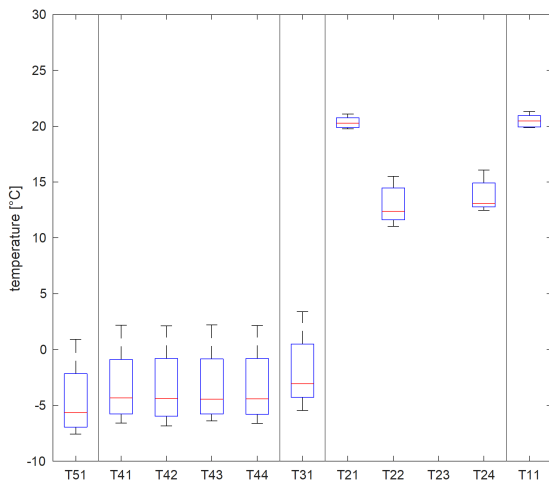
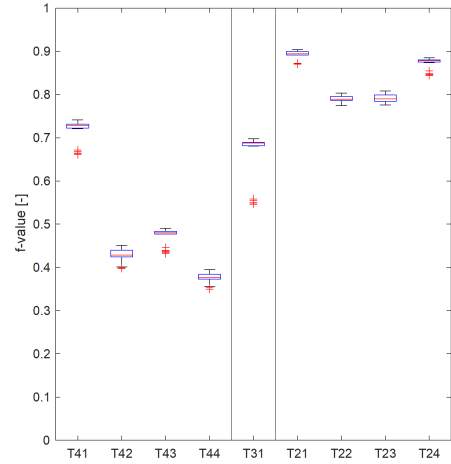
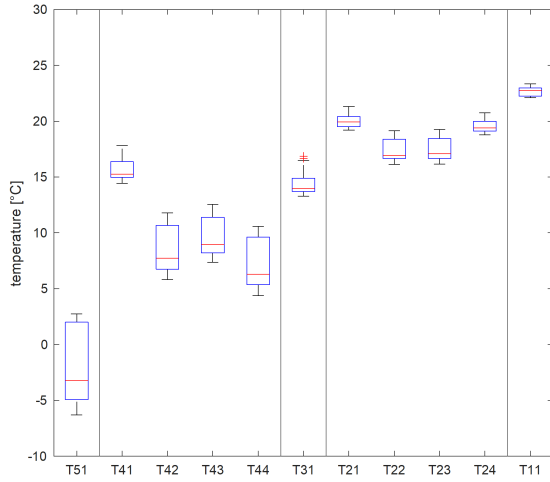


Abbildung 82: Verteilung der gemessenen Temperaturen (links) und berechneten f-Werte (rechts) für den Standort Wien TU-Wien (P3) in sehr kalten Nächten im Februar 2021 (10. bis 12.02.2021).

F1: VIG innen



F2: VIG außen



F3: Original – ISO innen

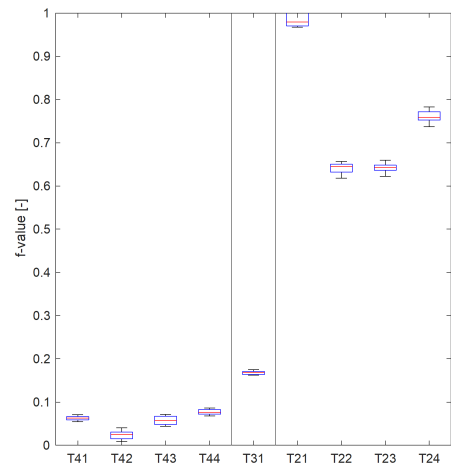
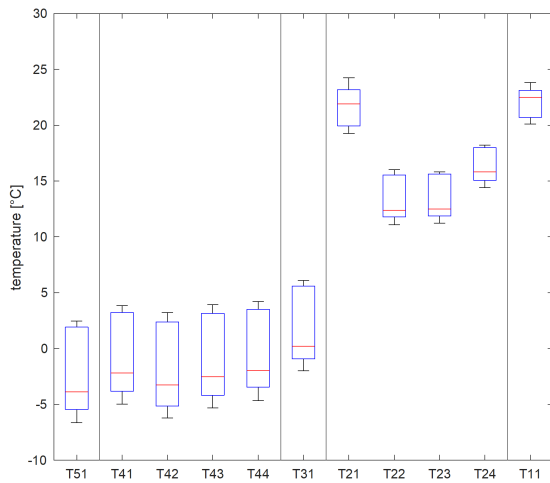


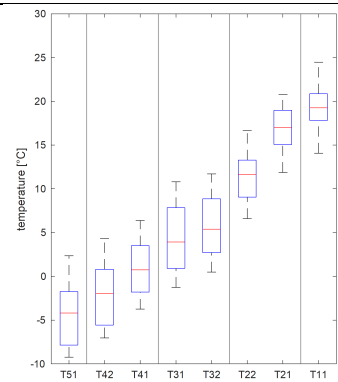
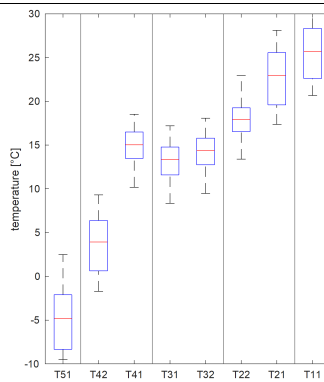
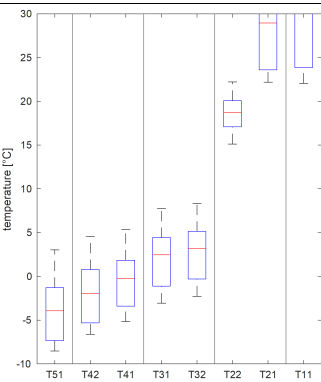
Abbildung 83: Verteilung der gemessenen Temperaturen (oben) und berechneten f-Werte (unten) für den Standort Innsbruck (P6) in sehr kalten Nächten im Februar 2021 (10. bis 12.02.2021).

F1: VIG innen

F2: VIG außen

F3: Original oder ISO innen

P1: Puchberg / Wels



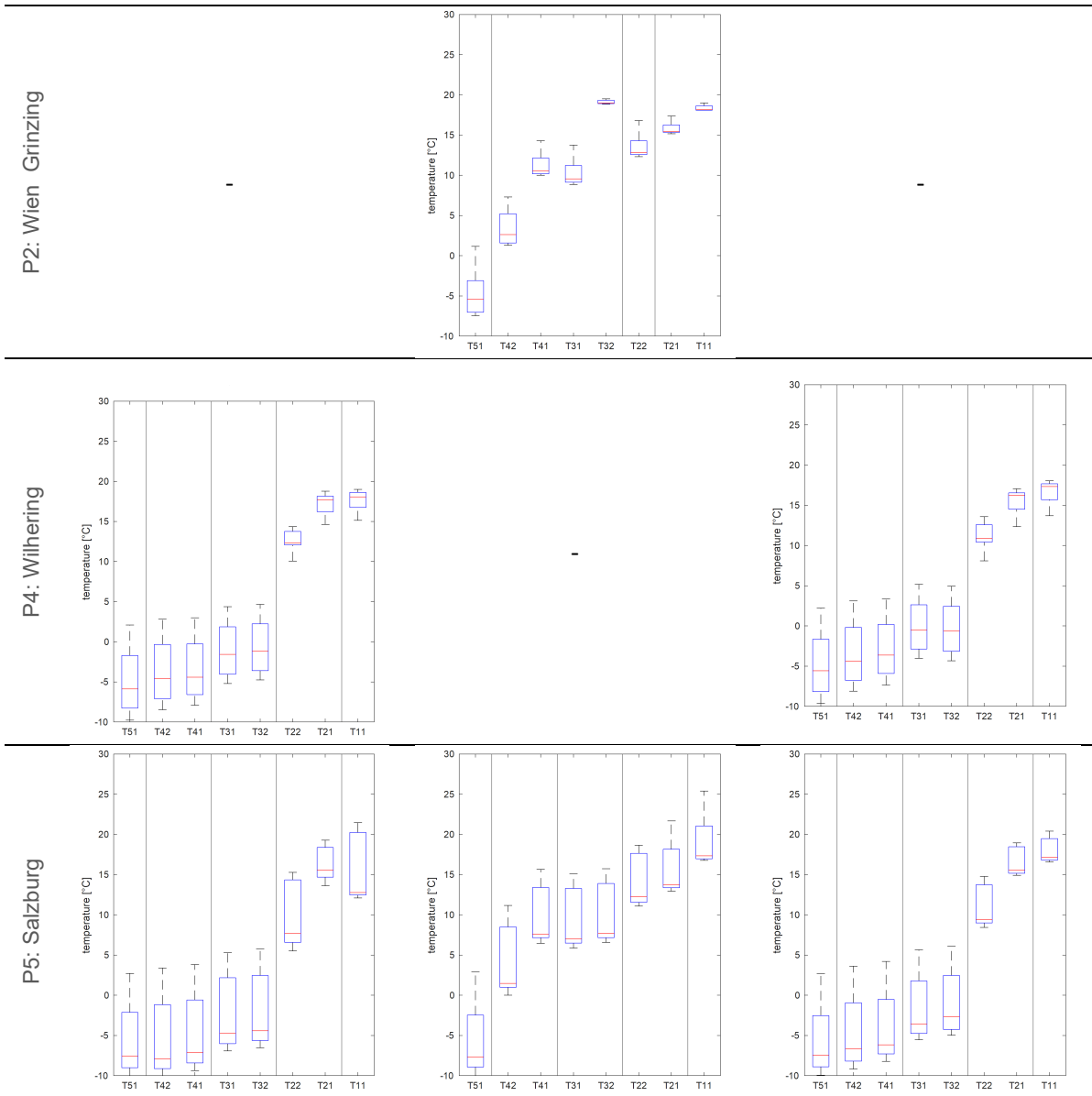
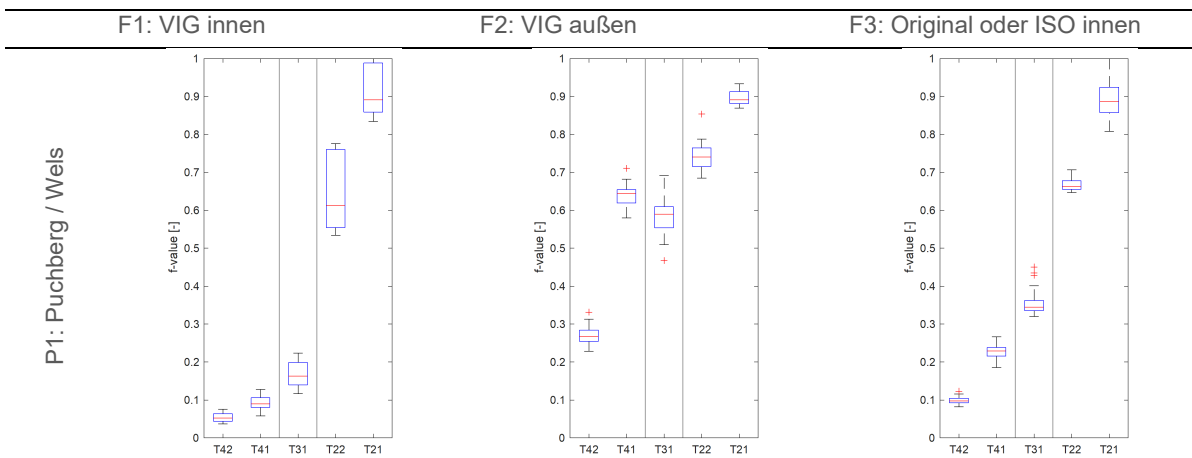


Abbildung 84: Verteilung der berechneten f-Werte der Standorte Puchberg, Wien-Grinzing, Wilhering und Salzburg in sehr kalten Nächten im Februar 2021 (10. bis 12.02.2021).



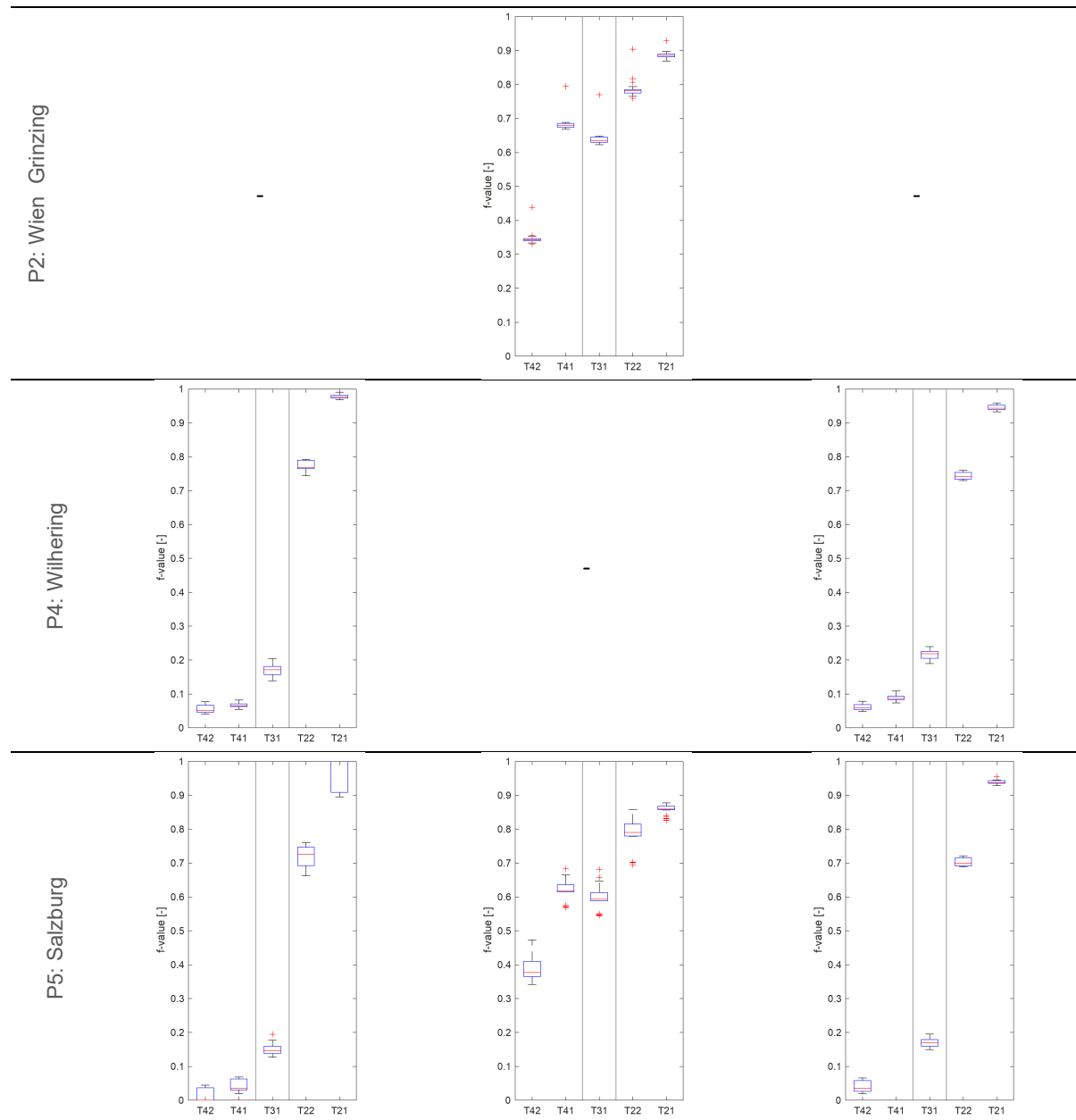


Abbildung 85: Verteilung der berechneten f-Werte der Standorte Puchberg, Wien-Grinzing, Wilhering und Salzburg in sehr kalten Nächten im Februar 2021 (10. bis 12.02.2021).

Kondensationstest mit unterschiedlichen Dichtungssituationen am Prüfstand der HFA

Aufgrund der in Wien Grinzing durch optische Kontrolle erfassten Kondensatbildung am Außenflügel wurde zusätzlich Tests am Prüfstand der HFA geplant und durchgeführt. Ein aus dem Projekt „VigSysReno“ vorhandener Prototyp mit VIG auf eine Flügelebene diente hier als Testobjekt und ermöglichte die Nachstellung unterschiedlicher Dichtungssituation in Anlehnung an Gegebenheiten der realen Testfenster. Die Kontrollen in Wien Grinzing verdeutlichten durch das Kondensat am Außenflügel (mit VIG) und der besonders Situation (nur einer Dichtungsebene am Außenflügel) der Bedarf einer detaillierteren Analyse, welche mittelst Tests am Prüfstand bessere Erkenntnis über den Einfluss der Dichtungssituation liefern kann. Konkret wurden im April 2021 insgesamt 13 Fälle mit unterschiedlichen Dichtungskonstellationen am Klimaprüfstand der HFA realisiert und deren Auswirkung auf die Oberflächentemperaturen untersucht. Um eine gute Vergleichbarkeit zu den realen

Messungen zu ermöglichen, wurde auch hier das Messkonzept in der Ausführung „Detailliert“ mit exakt den gleichen Messpunkten realisiert. Wie in Tabelle 29 ersichtlich wurden bis auf zwei Fälle (C8 und C9) alle Vergleichstest mit demselben Klima-Sollwerten jedoch unterschiedlichsten Dichtungssituationen durchgeführt. Im ersten Fall C1 wurde eine perfekt funktionierende Dichtebene Innen und Außen durch Abklebung der Spalten realisiert. In den folgenden Test (C2 bis C7) wurde unterschiedliche Fälle mit Undichtigkeiten in der Dichtebenen am Außenflügel ohne Dichtung am Innenflügel in Anlehnung an die Situation in Wien Grinzing realisiert umso den Einfluss dieser in der Praxis auftretenden Problematik speziell bei alten Beschlägen und Falzausbildungen nachzugehen. Weiters wurden auch mit den Tests C8 und C9 zwei extremere Klima-Sollwerte mit -15°C Außentemperatur im ersten Fall und 70% relative Luftfeuchte Innen im zweiten Fall untersucht. Ergänzend zu diesen Testfällen wurde mit C11 bis C13 drei Fälle mit VIG an der Rauminnenseite am Prüfstand getestet. Die Situation bei dem Bauwerk in Wien Grinzing muss allerdings als seltener Ausnahmefall verstanden werden, grundsätzlich spricht nichts gegen eine Anwendung außen, wenn die innere Dichtebene entsprechend ausgeführt wird.

Tabelle 29: Übersicht der Testfälle und der zugehörigen Dichtungssituation sowie der eingestellten Sollwerte für das Außen- und Innenklima am Klimaprüfstand der HFA

Test	Dichtungssituation		Klima-Sollwert	
	Außenflügel	Innenflügel	Innen	Außen
C1	dicht abgeklebt	dicht abgeklebt	20°C/50%	-5°C
C2	dicht abgeklebt	undicht	20°C /50%	-5°C
C3	Undicht	undicht	20°C /50%	-5°C
C4	ohne Dichtung unten	undicht	20°C /50%	-5°C
C5	ohne Dichtung unten und oben	undicht	20°C /50%	-5°C
C6	dicht abgeklebt nur Stulp undicht	undicht	20°C /50%	-5°C
C7	ohne Dichtung oben	undicht	20°C /50%	-5°C
C8	ohne Dichtung unten	undicht	20°C /50%	-15°C
C9	ohne Dichtung unten	Undicht	20°C /70%	-5°C
C10	ohne Dichtung unten und oben	Flügel offen	20°C /50%	-5°C
C11	dicht abgeklebt	dicht abgeklebt	20°C /50%	-5°C
C12	dicht abgeklebt	undicht	20°C /50%	-5°C
C13	Undicht	undicht	20°C /50%	-5°C

Um eine besser visuelle Vergleichbarkeit der einzelnen Teste zu ermöglichen, wurde die Temperatur und zugehörigen Luftfeuchtwerte der einzelnen Messpunkte im Carrier-

Diagramm als spezifische Luftfeuchtegehalt über die Temperatur dargestellt. Die gewählte Darstellung ermöglicht eine gute Abschätzung der Reserve hinsichtlich Kondensatbildung bzw. in welchem Umfang damit zu rechnen ist. Für die jeweiligen Glasoberflächentemperaturen (T21, T22, T23, T24, T41, T42, T43 und T44) wurden die zugehörigen spezifischen Luftfeuchtwerte der Innenluft bzw. der Luft im Fensterzwischenraum verwendet. In den folgenden Abbildungen wurden die entsprechenden Paare der Temperatur- und Feuchtemesswerte mit einer identen Nummerierung der Messpunkte M11 bis M51 gekennzeichnet.

Abbildung 86 zeigt die Situation der Testfälle C1 bis C7 mit VIG am Außenflügel und den zuvor beschriebenen Dichtungssituationen. Im Fall C1 (in Dunkelblau dargestellt) bei dem eine perfekt abschließende Dichtung durch Verklebung der Falzfugen mit Klebeband am Innen- und Außenflügel realisiert wurde zeigt hier selbst an den Randleisten der Außenflügel (M42, M43 und M44) keine Kondensationsgefahr. Ganz anders verhalten sich jene Fälle wo keine Innenflügeldichtung (wie auch real in Wien Grinzing) vorhanden sind. Speziell die Fälle C2, C3 und C6 mit M43 zeigen hier einen Zustand mit entsprechend hohem Kondensat. Der Fall C4, wo am Außenflügel die untere Dichtung entfernt wurde, zeigte in der Darstellung im Carrier-Diagramm keine besonders auffallende Kondensationsneigung war jedoch in bei der optischen Überprüfung der Fall bei dem eine sehr hohe Kondensatbildung zu erkennen war. Da diese Situation auch dem Ist-Zustand der Dichtungssituation in Wien Grinzing am ehesten gleicht wurde zwei weitere Versuche (Abbildung 87) mit kälterer Außentemperatur (-15°C im Fall C8) und höhere Luftfeuchten Innen (70% im Fall C9) durchgeführt. In beiden Fällen ist das hohe Kondensationsrisiko auch im Carrier-Diagramm (siehe Abbildung 88) eindeutig ersichtlich. Auch die optische Überprüfung zeigte eine entsprechende Kondensatbildung an den Glasscheiben, den Glasfasen, Falzen und Teilen der Beschläge.

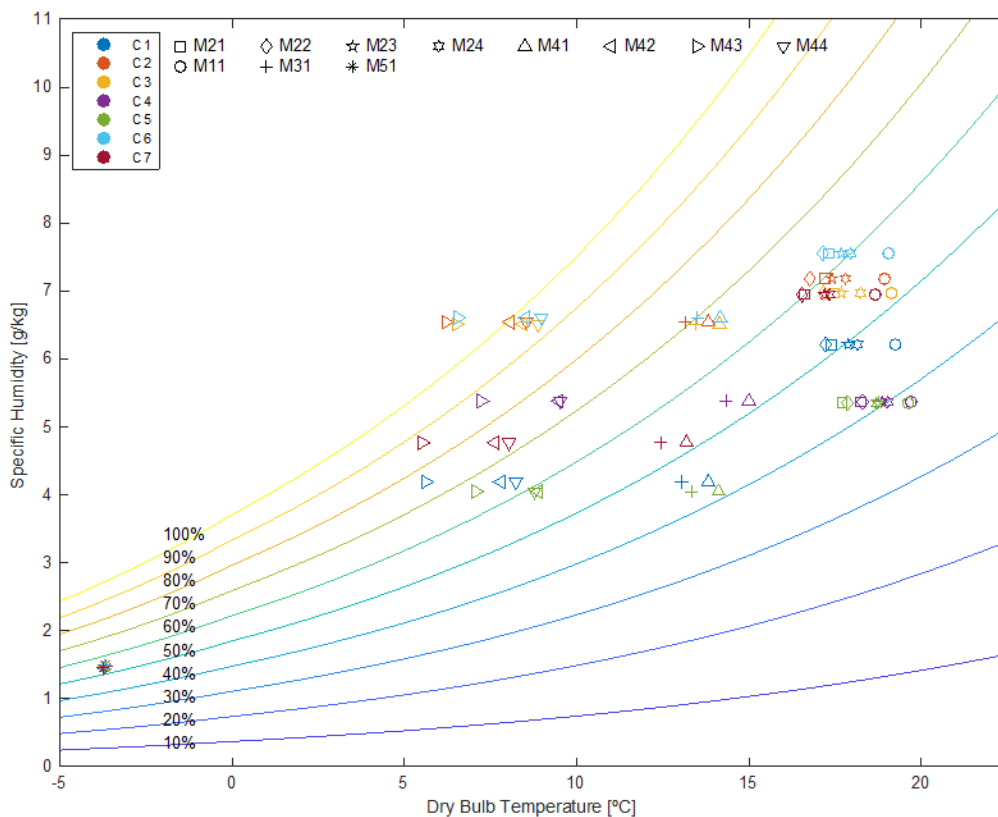


Abbildung 86: Darstellung der Temperatur und des spezifischen Luftfeuchtegehalts der einzelnen Messpunkte im Carrier-Diagramm für die Testfälle C1 bis C7.

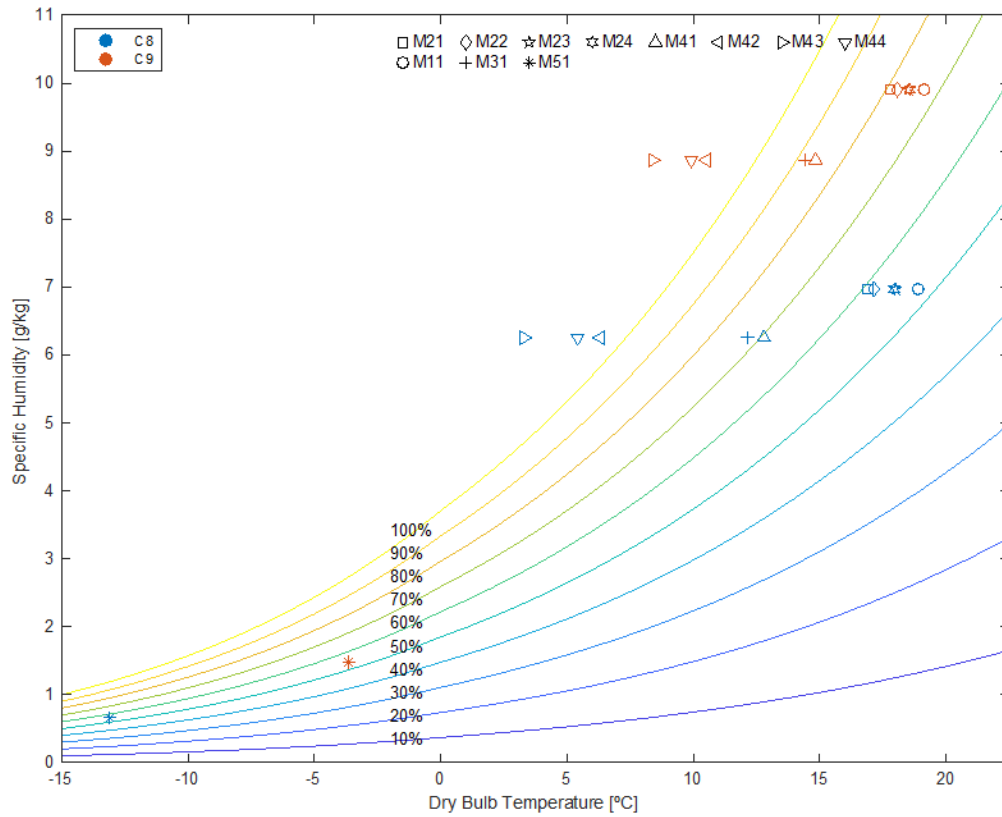


Abbildung 87: Darstellung der Temperatur und des spezifischen Luftfeuchtegehalts der einzelnen Messpunkte im Carrier-Diagramm für die Testfälle C8 und C9.

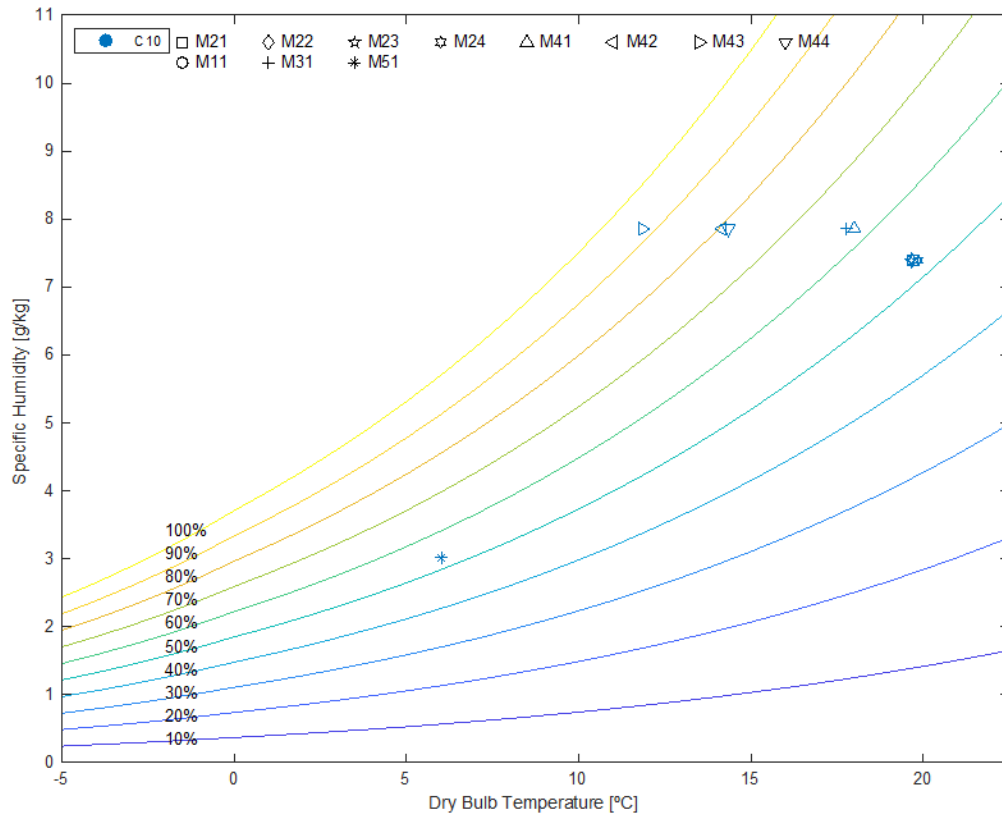


Abbildung 88: Darstellung der Temperatur und des spezifischen Luftfeuchtegehalts der einzelnen Messpunkte im Carrier-Diagramm für den Testfall C10.

Aus Gründen der Vollständigkeit wurden zusätzlich noch drei Fälle mit VIG am Innenflügel am Klima-Prüfstand getestet. Wie in Abbildung 89 ersichtlich ergibt sich bei den Fällen C11 und C12 ein Kondensationsrisiko, welches sich vor allem mit Anlaufen der Außenscheiben und Eisbildung an den Bändern bemerkbar macht. Im Fall C13 zeigt sich bei Undichtigkeit am Innen- und Außenflügel ein optimaler Zustand ohne Kondensation sowohl im Carrier-Diagramm als auch bei den optischen Aufnahmen im Testversuch.

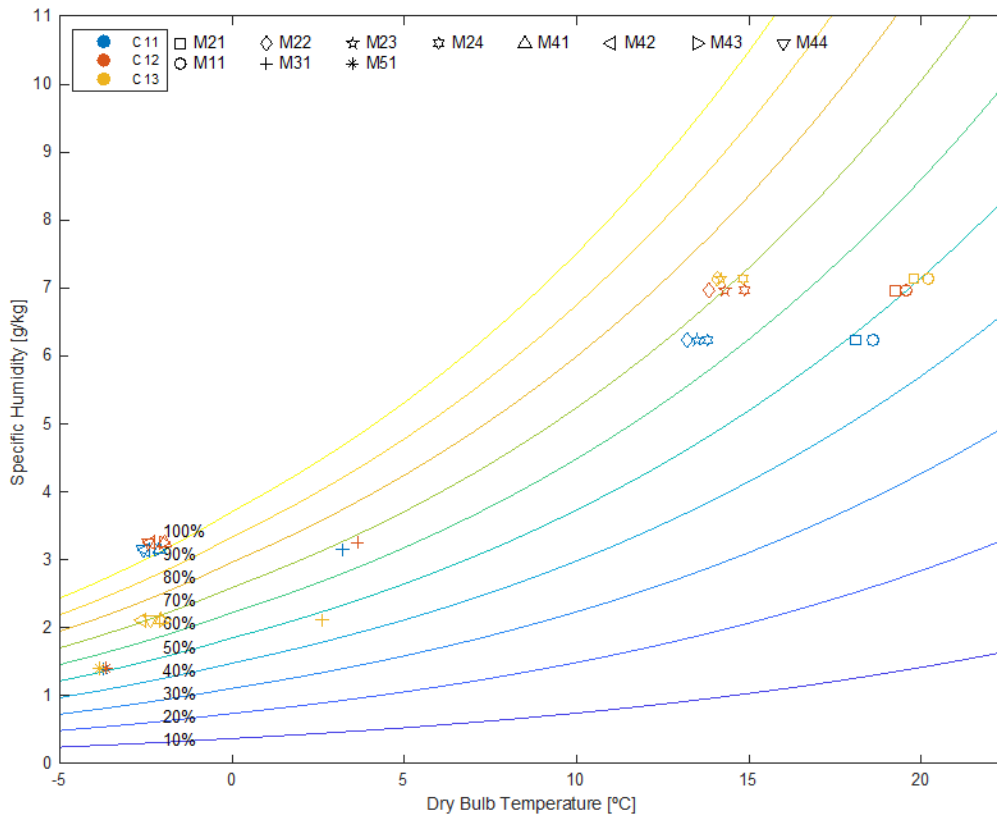


Abbildung 89: Darstellung der Temperatur und des spezifischen Luftfeuchtegehalts der einzelnen Messpunkte im Carrier-Diagramm für die Testfälle C11 bis C13.

Sommerlicher thermische In-situ-Performance

Die sommerliche Performance wurde an möglichst warmen Tagen im Frühsommer 2021 untersucht. Konkret wurde hierzu der Temperaturverlauf und dessen Verteilung untersucht. Je nach Standort und vorhandener Daten wurden die Temperaturverläufe der Varianten an warmen sonnenstarken Tagen gegenübergestellt. Nur die Standorte P3 – TU Wien, P4 – Wilhering und P5 - Salzburg konnten aufgrund der selben Randbedingungen (Raumzugehörigkeit und Ausrichtung) der Testfenster für die sommerliche Untersuchung verwendet werden.

Abbildung 90 zeigt die Temperaturverläufe (links) und Verteilungen (rechts) dieser im Zeitraum 30.3.2021 bis 2.4.2021. Eindeutig zu erkennen ist hier die geringere Erwärmung des Zwischenraums (T31) unter tags als auch die etwas geminderte Abkühlung in der Nacht. Bei der Betrachtung der Temperaturverläufe an der Raumseite des Innenflügels (T21...T24) wirkt sich diese jedoch nur unwesentlich aus. Eine genaue Betrachtung Wärmeflusses (siehe Abbildung 91) zeigt hier im Vergleich zur reinen Temperaturanalyse ein besseres Verhalten der Ausführung mit VIG am Innenflügel (F1) da hier der Wärmefluss nach Außen über den Tag wie durch den Mittelwert ersichtlich ein höher ist.

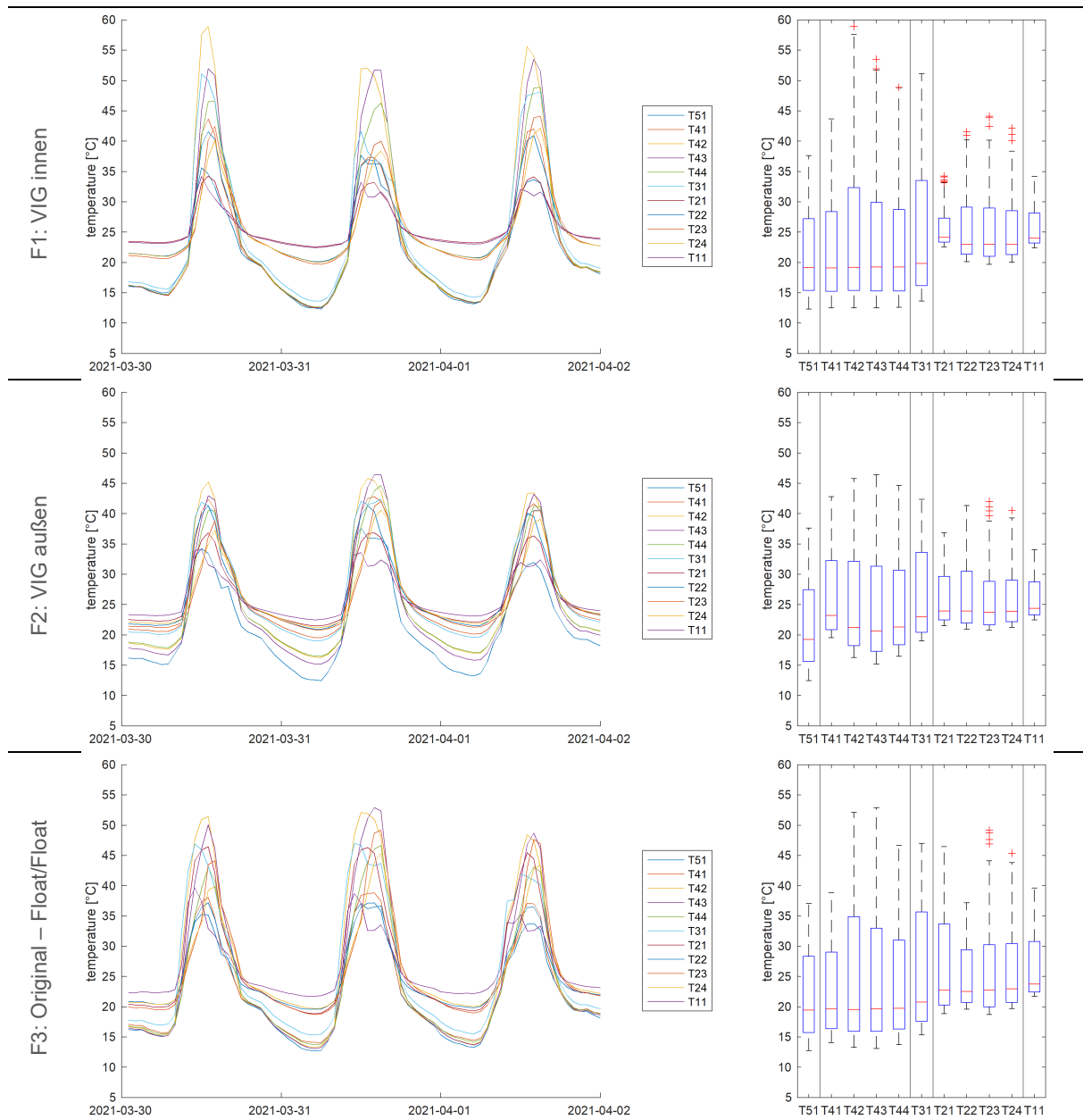


Abbildung 90: Verlauf und Verteilung der Temperaturen am Standort TU-Wien (P3) im Zeitraum vom 30.3.2021 bis 2.4.2021 (sehr warme Frühjahrsstage).

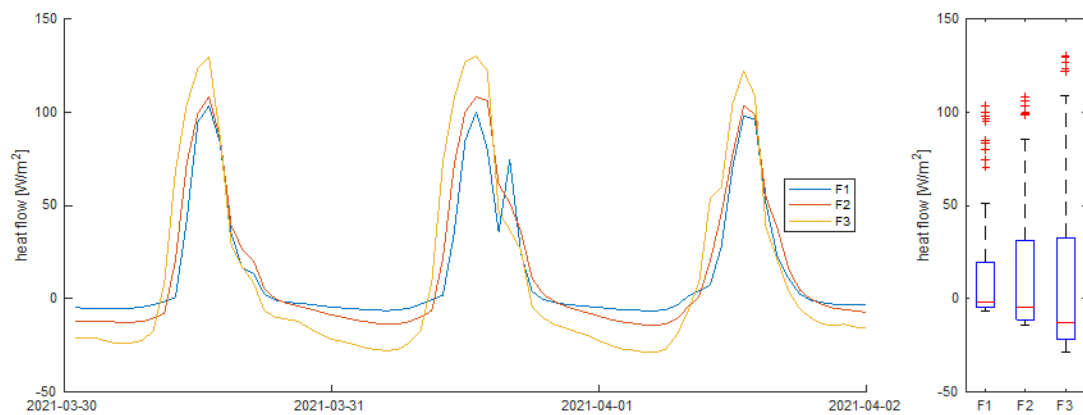


Abbildung 91: Verlauf und Verteilung des Wärmeflusses am Standort TU-Wien (P3) im Zeitraum vom 30.3.2021 bis 2.4.2021 (sehr warme Frühjahrsstage).

Am Standort P4 - Wilhering mit den Ausführungen VIG am Innenflügel und ISO am Innenflügel ergaben die Daten wie zu erwarten ein fast identes Verhalten (siehe Abbildung 92) beider Ausführungen.

Der Standort P5 – Salzburg (Abbildung 93) mit den drei Ausführungen VIG am Innen, Außenflügel und ISO am Innenflügel liefert ein ähnliches Bild wie die Standorte zuvor. Bei VIG am Außenflügel ist die Temperaturverteilung im Zwischenraum aufgrund der Transmissionsreduktion der VIG entsprechend reduziert. Die beiden anderen Varianten mit VIG oder ISO am Innenflügel zeigen wie erwartet ein sehr ähnliches Verhalten hinsichtlich der Temperaturen. Bei der Variante mit ISO (F3) waren die die Temperaturen an den Oberflächen des Innenflügels sogar noch etwas weniger gestreut als bei der VIG-Variante (F1).

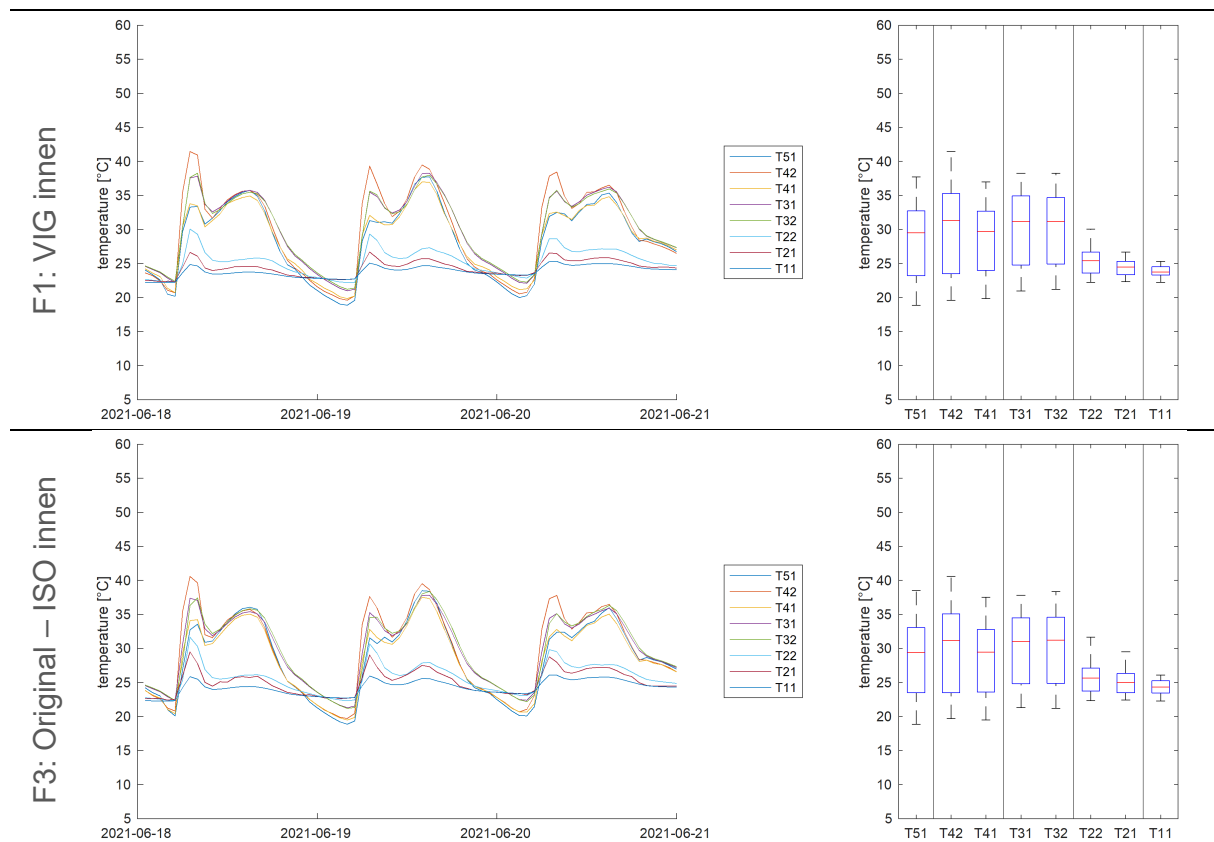
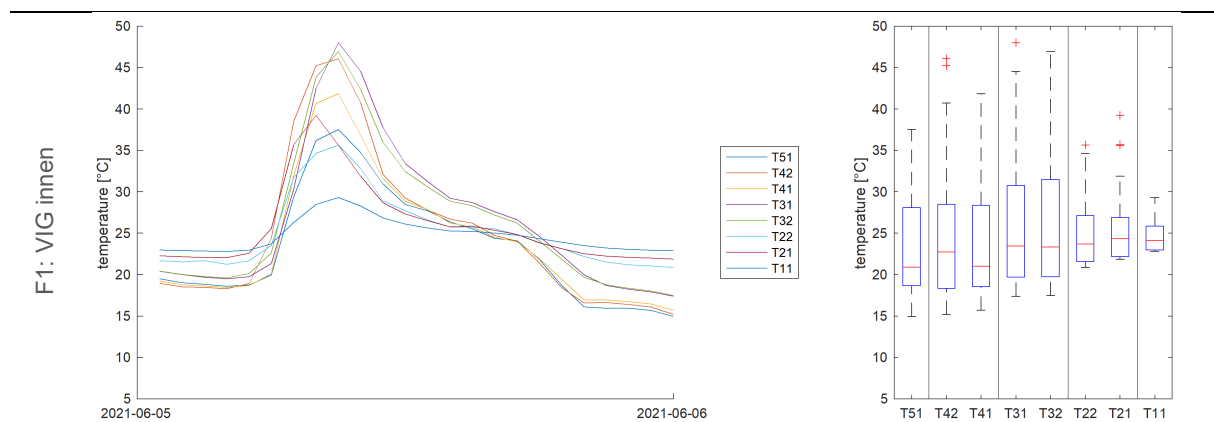


Abbildung 92: Verlauf und Verteilung der Temperaturen am Standort Wilhering (P4) im Zeitraum vom 18.6.2021 bis 21.6.2021 (sehr warme Frühjahrstage).



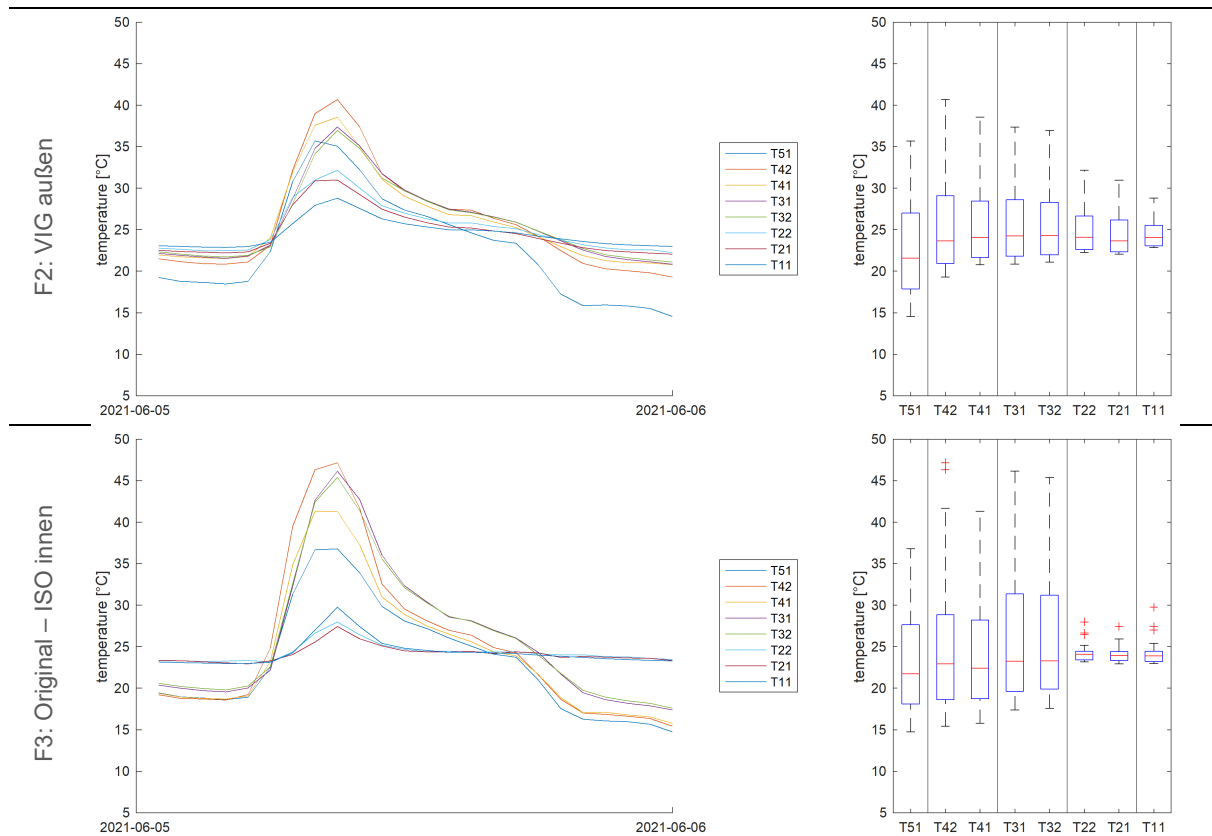


Abbildung 93: Verlauf und Verteilung der Temperaturen am Standort Salzburg (P5) am 5.6.2021 (typischer sommerlichen Tag).

Schlussfolgerung aus den Ergebnissen des Performance Monitorings

Die Analyse der Daten aus dem annähernd einjährigen Monitoring zeigen eine gute In-situ-Performance der Kastenfenstern mit Vakuumverglasungen.

Das Kondensationsrisiko kann für die Anwendung von VIG am der Raumseite mit f-Werten über 0,7 als gut und gleichwertig zu einer Ausführung mit Zweischeibenisolierverglasung beurteilt werden. Die hohe Wärmedämmung des Innenflügels führt zwar zu niedrigeren Temperaturen im Zwischenraum jedoch ist diese bei funktionierender Innendichtung unproblematisch. Bei einem untersuchten Objekt wurde VIG am Außenflügel ohne zusätzliche Stockdichtung am Innenflügel appliziert: Dabei zeigen sich zwar akzeptable Bedingungen in der Verglasungsmitte, aber erhebliches Kondensationsrisiko am Randbereich mit f-Werten um 0,3. Die zugehörigen Messungen zeigen zu niedrigere Temperaturen im Luftraum zwischen den Fensterflügeln und dem VIG selbst. Diese niedrigen Werte deuten auf einen möglichen zusätzlichen Wärmeverlust innerhalb des Luftraums hin. Dieser Effekt könnte durch unkontrollierte Lüftungseffekte und/oder hohe Wärmeverluste durch den Laibungsbereich der Kastenfenster verursacht sein. Diese niedrigen Werte ergeben allerdings durch das Fehlen einer Dichtung am Innenflügel. Bei Anwendung einer solchen Dichtung würde sich ein anderes Bild ergeben. Eine Anwendung von VIG auf die Innenseite führte jedenfalls zu einer sehr guten Wärmedämmung, wie in den In-situ U-Werten mit etwa $0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ eindeutig erkennbar ist. Die Anwendung von VIG auf die Außenseite kann bei entsprechend ausgeführten Dichtebenen sogar besser performen jedoch haben die Messungen eine schlechtere In-Situ-Performance ergeben. Speziell der Luftaustausch des Zwischenraums, wie durch die Experimente am Prüfstand der HFA gezeigt, kann hier zu erheblichen

Verschlechterungen hinsichtlich Kondensationsneigung und der Wärmedämmeigenschaften führen. In beiden Fällen ist auf eine lückenlose innere Dichtebenen zu achten!

Analysen hinsichtlich der Performance im Sommerfall hat sich in der Messung ein für VIG am Innenflügel ein vergleichbares Verhalten wie bei ISO am Innenflügel gezeigt. Hinsichtlich des Wärmetransports über den Tag zeigte sich durch ein im ein geringfügig besseres Verhalten bei VIG am Außenflügel.

5.5. Leitfaden

Nachstehend soll ein kompakter, tabellarischer und graphischer Leitfaden darüber geliefert werden, wann und wie eine Applikation von Vakuumglas innen und wann außen ratsam ist.

5.5.1. Anwendungsfall 1: Vakuumglas im Außenflügel

In nachstehender Tabelle 30 ist die SWOT-Analyse zur Applikation von Vakuumgläsern im Außenflügel dargestellt. Zur besseren Verdeutlichung ist in Abbildung 94 der Verlauf des Wärmedurchgangs bei Applikation im Außenflügel durch Scheibe und „ausweichende“ Wärmebrücke dargestellt.

SWOT-Analyse		Interne Analyse	
		Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)
Externe Analyse	Chancen (Opportunities)	<ul style="list-style-type: none"> - Valider Optimierungsansatz für Leistenstockkastenfenster und Rahmenpfostenstockfenster. - Vermeidung/Verringerung von Kondensat auf der Innenoberfläche des Außenflügels - Durch verringerte Temperaturunterschiede zwischen der Innenoberfläche des Außenflügels und der Außenoberfläche des Innenflügels reduzierte konvektive Wälze im Zwischenraum - Verbesserte Schlagregen-dichtheit zu erwarten - Besseres Verhalten im Sommerfall 	<ul style="list-style-type: none"> - Bei Pfostenstockfenstern und Fenstern mit Steingewänden überwiegt die Wärmebrückenwirkung im Rahmen bzw. im Gewände gegenüber der Wärmedämmwirkung von Vakuumglas - Eine zusätzlich optionale Dichtung am Außenflügel kann die Dichtheitscharakteristik des Gesamtsystems stören
	Risiken (Threats)	<ul style="list-style-type: none"> - Dichtheitscharakteristik des Gesamtsystems ist zu beachten (System wird nur bei funktionaler gut abgestimmter Dichtheit zwischen Innen- und Außenflügels funktionieren) 	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmebrückenwirkung bei Pfostenstockfenstern und Fenstern mit Steingewände lässt die Wärmedämmwirkung durch das Vakuumglas stark an Wirkung verlieren (Wärme wird über Rahmen bzw. Gewände nach außen transportiert)
Ergebnis/Fazit		Der exzellente U-Wert des Vakuumglases lässt unter bestimmten Randbedingungen einen Einsatz des Vakuumglases im Außenflügel zu.	
Optimierung		Dichtheitscharakteristik zwischen Innen- und Außenflügel ist besser zu definieren.	

Tabelle 30: SWOT-Analyse der Applikation von Vakuumgläsern im Außenflügel.

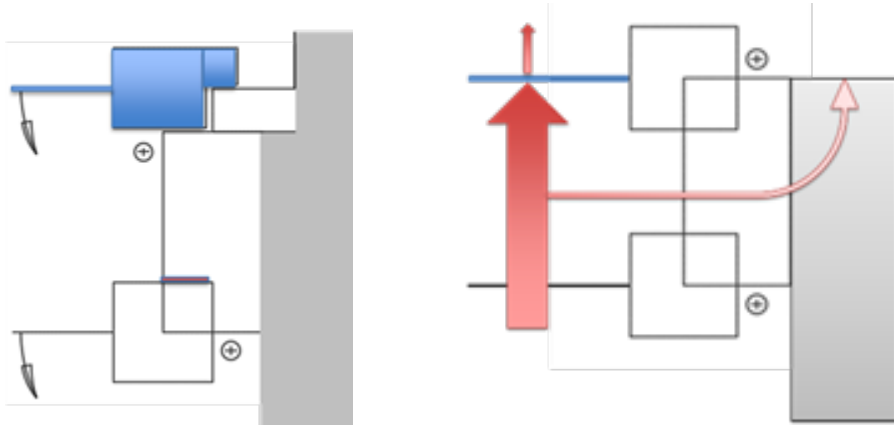


Abbildung 94: Applikation des Vakuumglases auf der Außenseite: links die Positionierung, rechts die stilisierte Wärmeflusscharakteristik

5.5.2. Anwendungsfall 2: Vakuumglas im Innenflügel

In nachstehender Tabelle 31 ist die SWOT-Analyse zur Applikation von Vakuumgläsern im Innenflügel dargestellt. Zur besseren Verdeutlichung ist in Abbildung 95 der Verlauf des Wärmedurchgangs bei Applikation im Außenflügel durch Scheibe und „ausweichende“ Wärmebrücke dargestellt.

Tabelle 31: SWOT-Analyse der Applikation von Vakuumgläsern im Innenflügel.

SWOT-Analyse		Interne Analyse	
		Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)
Externe Analyse	Chancen (Opportunities)	<ul style="list-style-type: none"> - Valider Optimierungsansatz für alle Kastenfenstertypen - Bessere energetische Eigenschaften (reduzierte Energietransmission) durch Kombiwirkung vom Vakuumglas und Zwischenraum. - Durch verringerte Temperaturspreizung zwischen der Innenoberfläche des Außenflügels und der Außenoberfläche des Innenflügels reduzierte konvektive Wälze im Zwischenraum. 	<ul style="list-style-type: none"> - Gute Luftdichtheit des Innenflügels erforderlich - Schlagregendichtheit des Außenflügels eingeschränkt
	Risiken (Threats)	<ul style="list-style-type: none"> - Dichtheitscharakteristik des Gesamtsystems ist zu beachten, jedoch leidet Systemfunktionalität nicht so stark bei Dichtungsversagen wie bei einem außen angewandten Vakuumglas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Niedrigere Zwischenraumtemperatur kann zu vermehrtem Kondensat und Vereisung am Außenflügel (Innenoberfläche des Außenflügels) führen
Ergebnis/Fazit		Vakuumglas im Innenflügel stellt eine gute Einsatzmöglichkeit dar, bei Beachtung des Kondensatrisikos.	
Optimierung		Innere Dichtebene ist insbesondere bei Altfenstern und im Stulpbereich zu verbessern.	

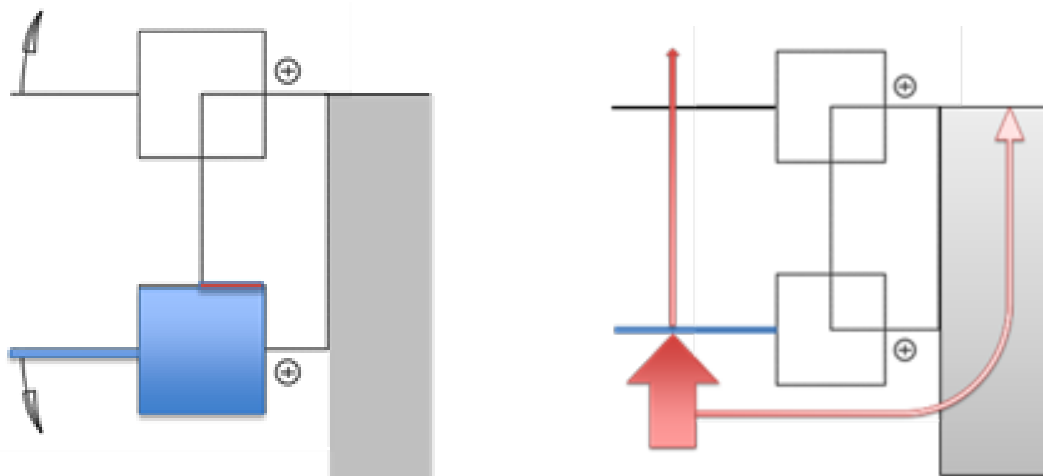


Abbildung 95: Applikation des Vakuumglases auf der Innenseite bei Pfostenstockkastenfenstern und stark leitendem Randmaterial (z.B. Steingewände): links die Positionierung, rechts stilisiert die Minimierung des Wärmedurchgangs.

5.5.3. Zusammenfassung: Vakuumglas im Außen- oder im Innenflügel?

Grundsätzlich kann bei den meisten Kastenfenstern sowohl eine Applikation des Vakuumglases sowohl innen als auch außen erfolgen. Ausnahmen stellen das Pfostenstockfenster (Alt-Wiener oder Grazer Kastenfenster) mit ganz außenseitig liegenden Außenflügel dar, sowie der Sonderfall der hochleitenden Gewändekonstruktion beispielsweise aus einem Steinmaterial.

Grundsätzlich erfordert jede Applikation eine genaue Begutachtung der Randbedingungen und eine Abwägung hinsichtlich Vor- und Nachteilen gemäß oben angeführten Punkten. Die Randbedingungen im Bestand sind dabei:

- Befinden sich Heizkörper unterhalb der Fenster (und sind diese an kalten Tagen in Betrieb)?
- In welchem Sanierungszustand befinden sich die Fenster?
- Wie ist die Qualität der inneren Dichtebene?
- Welcher Feuchteintrag ist anhand der Innenraumnutzung zu erwarten, welches Lüftungsverhalten ist zu erwarten (beispielsweise in Küchen oder Badezimmern oder Schwimmbädern)?
- Wie sind die Fenster orientiert (hinsichtlich „Wetterseite“ und „solaren Erträgen“ die der Performance des Fensters entgegenkommen)?
- Welches Mikroklima ist in der direkten Umgebung zum Fenster zu erwarten (vor allem das außenseitige Fenster)?
- Wie ist die Fensterdimensionen hinsichtlich Größe des Fensters und Systemabstand zwischen den beiden Flügeln (und der zu erwartenden thermischen/konvektiven Walze im Winterfall)?

6 Schlussfolgerungen

Das gegenständlich beschriebene Projekt befasste sich mit der Ertüchtigung von Bestandskastenfenstern mit Hilfe innovativer Vakuumglasprodukte. Dabei wurde eine Reihe wertvoller Erkenntnisse gewonnen, die nun im Sinne von Schlussfolgerungen dargestellt werden sollen.

1. Welche Bedeutung hat das abgeschlossene Projekt und dessen Erkenntnisse für die involvierten Projektpartner:

Die wissenschaftlichen Partner konnten ihre Expertise hinsichtlich historischer Fensterkonstruktionen ausbauen. Für die TU Wien, namentlich den Forschungsbereich Bauphysik und Bauökologie ergab sich via der Anwendung von State-of-the-Art Simulations- und Evaluierungswerkzeugen anhand der Fenster eine Reihe von Publikationen, die zeigten, dass solche Simulationen für Evaluierungen im Gebäudehüllbereich eine starke Unterstützung bei Sanierungsplanung und Risikoabschätzung darstellten. Für die Holzforschung Austria konnte das ohnehin schon reiche Angebot an Wissen und Testmöglichkeiten für die ausführenden Branchen fundamental erweitert werden. Beide wissenschaftlichen Partner konnten ihre Technologie- und Wissensführerschaft im Bereich Vakuumglas Anwendungen im österreichischen/europäischen Kontext ausbauen.

Die beteiligten Handwerksbetriebe, allesamt KMUs, konnten erste Innovationsschritte bei der Integration von Vakuumglas in Bestandsfenster setzen und damit ihr Portfolio an Sanierungsmöglichkeiten für bestehende Kastenfenster um eine sehr potente Verbesserung des thermischen Verhaltens erweitern. Es ist zu erwarten, dass durch die Publicity dieses Projektes sowie die Publikation und Dokumentation bei einschlägigen Events (Interessensvertretungen der Branchen, Fenster Türen Treff, etc.) der Ansatz der Sanierung mit Vakuumglas an Nachfrage stark gewinnen dürfte.

Für den Hersteller des Vakuumglases ergeben sich neue Erkenntnisse beim Einsatz in Kastenfenster und damit eine Verbreitung der Produkte auch im sensiblen Bestandsbereich.

2. Welche nächsten F&E-Aktivitäten können das Projekt und dessen Ergebnisse begünstigen.

Im Zuge der Bearbeitungen in VAMOS stellte sich heraus, dass es einer Vielzahl von Stakeholdern im Bereich Planung und Ausführung von Sanierungen von Bestandsfenstersystemen an belastbaren KPIs (Key Performance Indikatoren) fehlt. Diese KPIs würden eine alternative, im Sinne der Kreislaufwirtschaft wünschenswerten Sanierungsvariante zumindest besser beurteilbar machen. Als solches ist durch die wissenschaftlichen Partner ein F&E-Projekt zur holistischen Bewertung von Kastenfenstern und Kastenfenstersanierungsmöglichkeiten unter komparativer Auseinandersetzung mit neuen Fenstern geplant die sowohl die operative Performance (Thermo-hygrisch, Akustisch, Sonnenschutz,) wie auch die Lebenszyklus-Betrachtung beinhaltet und dies mit den Parametern von Planenden, Ausführenden und jenen Stakeholdern die eine Sanierung herbeiführen wollen (Gebietskörperschaften und Fördermodelle) verquickt. Auf diese Weise könnte endliche eine „faire“ Beurteilung von Bestandsfenstern passieren, die nicht alleine auf operativen Performance-Aspekten, gleichwohl sie mit Vakuumglas in einen sehr guten Bereich

verschoben werden können, beruht, sondern eine pareto-effiziente Gesamtbeurteilung zu Grunde liegen hat.

3. Zielgruppenspezifische Benefits aus dem Projekt

Für eine ganze Reihe von Stakeholdern bedeuten die Erkenntnisse aus dem Projekt VAMOS wesentliches:

- Für GebäudeeigentümerInnen ist nun die Sanierung mit Fensteraustausch nicht mehr die einzige gangbare Alternative, um bei Erhalt der Erscheinungsform eine verbesserte thermische Performance des Bauwerks zu erzielen.
- Für BewohnerInnen / GebäudenutzerInnen können sanierte Kastenfenster eine Kosteneinsparung durch reduzierten Heizwärmebedarf darstellen und damit eine Verkleinerung des ökologischen Fußabdrucks durch Gebäudekonditionierung (weniger Energieträgerkonsum, weniger Emissionen). Darüber hinaus ergibt sich durch wärmere Innenoberflächen eine verbesserte Komfortsituation, die einen zusätzlichen Hebel darstellen kann: Personen die thermische Asymmetrie erfahren, neigen eher zum starken Hochheizen mit vorhandenen Heizkörpern.
- Für die Gebäudeerhaltung ergibt sich, dass Zugserscheinungen und eventuell auch Schimmelbildung durch grundsätzlich weniger Kondensat und höhere Temperaturen verringert werden.
- Für Gebietskörperschaften ergeben sich nun andere verbesserte Fördermodelle für die Gebäudeinstandsetzung, wenngleich diese erst aus einem holistischen und LCA-bezogenen Standpunkt heraus erarbeitet werden muss(t)en.
- Für die Unternehmen der Tischlerbranche / Fensterbauer ergibt sich unter Umständen ein vergrößertes Auftragsvolumen in Hinblick auf verstärkte Fenstersanierungstätigkeiten.
- Für den Denkmalschutz und das Stadtbild ergibt sich der Vorteil einer verringerten Gefährdung des Erscheinungsbildes der kulturell wichtigen Altstadtbereiche.

4. Vermarktungs- und Verwertung/Verbreitungspotential

Eine ganze Reihe von Publikationen ist bereits verfasst worden, in Redaktion oder geplant. Darüber hinaus sind Teilnahmen an fach einschlägigen Messen und Kongressen in Planung, so dass eine Verbreitung über unterschiedliche Kanäle auf der einen Seite und für unterschiedliche Zielgruppen auf der anderen Seite gewährleistet ist.

Durch die beteiligten KMUs erfolgen erste praktische Umsetzungen, die in der Branche zu viel Beachtung und Nachahmung führen. Neben den Publikationen erfolgt auch durch den beteiligten Vakuumglashersteller eine internationale Verbreitung der zentralen Erkenntnisse.

7 Ausblick und Empfehlungen

- Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Basierend auf den Ergebnissen des in diesem Endbericht beschriebenen Projektes, wie auch der Vorgänger und begleitenden Projekte kann festgehalten werden, dass nun ein recht guter Überblick und Eindruck darüber besteht, wie mit innovativen Vakuumglasprodukten bestehende Fenster thermisch ertüchtigt werden können, ohne dabei zu „verschlimmbessern“. Auch für neue Fenster konnte aufgezeigt werden, wie dies funktionieren kann. Die nächsten Schritte sind in diesem Kontext daher wie folgt zu sehen:

(i) Mithilfe der Branchenvertretungen (Wirtschaftskammer, Innungen, ...) sind die relevanten Stakeholder bestmöglich über die Optionen der Sanierung mit Vakuumglas zu informieren. Außerdem sind Möglichkeiten zu identifizieren, wie entsprechende Stakeholder (z.B. Hausverwaltungen, Hersteller von Vakuumgläsern) mit entsprechend geschulten Handwerksbetrieben verbunden werden können.

(ii) Im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist das große Potential von historischen Fensterkonstruktionen unbestritten. Allerdings krankt es an belastbaren Zahlen der operativen Performance der Kastenfenster allgemein (das ist thermisch, akustisch, ...), wie auch an einer komparativen Langzeitvergleichbarkeit hinsichtlich des ökologischen Fußabdrucks von unterschiedlichen Sanierungsvarianten auch und gerade im Vergleich zum Fenstertausch mit neuen Fenstern. Es erscheint klar, dass hier auch innovativste Sanierungsvarianten, z.B. mit Vakuumglas, berücksichtigt werden sollten.

Im Bereich der Historie von Kastenfenstern und deren Sanierungen gibt es zahlreiche weiße Flecken auf der Landkarte was Beschichtungen und deren heutige Bewertung angeht. Es ist daher mit Stakeholdern entlang der gesamten Wertschöpfungskette und entsprechend ausgestatteten wissenschaftlichen Einrichtungen eine Untersuchung anzustellen, wie mit potentiellen Altlasten umgegangen werden kann.

- Potenzial für Demonstrationsvorhaben (Chancen / Herausforderungen / Risiken bei der Realisierung / Umsetzung in Richtung Demonstrationsprojekt)

Im gegenständlichen Projekt konnten kleinräumige Realisierungen durchgeführt werden. Dabei konnte die Eignung von Vakuumglas-Ertüchtigungen für Kastenfenster festgestellt werden. Eine Langzeitstudie hinsichtlich des Energieeinsparungspotentials unter Realbedingungen hätte den Rahmen des gegenständlichen Projektes gesprengt, wäre aber z.B. im Rahmen eines Smart-City-Demo Projektes anzudenken, eventuell in Verbindung mit IoT-Ansätzen.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vakuumglasprodukte verschiedener Firmen, die sich hinsichtlich U_g -Wert, dem Material und der Ausgestaltung des Randverbundes, der Evakuierungsöffnung und dem „Getter“ (dem Fänger verbliebener Partikel im Vakuumspalt), sowie der Art, Ausgestaltung und Distanz des Rasters von Abstandhaltern („Pillar“) unterscheiden.....	16
Abbildung 2: Beispiele unterschiedlicher Kastenfenstertypen (eigene Darstellung HFA / Svoboda)...	18
Abbildung 3: Forschungslandschaft zum Thema Vakuumglas	20
Abbildung 4: Arbeitsteilung im Konsortium bzw. Unterscheidung im Ansatz (eigene Abbildung).....	24
Abbildung 5: Detaillierte Informationen über die sechs Demo-Sites (Eigene Darstellung / Projektkonsortium VAMOS; Hauer et al. 2021)	31
Abbildung 6: Lokalisierung der Demonstrations-Gebäude	32
Abbildung 7: links: Positionierung der funkbasierten Messtechnik; rechts: Innenraum in dem sich alle 3 betrachteten Fenster befinden	33
Abbildung 8: Konstruktionszeichnungen – links oben: Ansicht; rechts oben: Vertikalschnitt; links unten: Horizontalschnitt; rechts unten: Horizontalschnitt Oberlicht (gezeichnet durch Ernst Prohaska).....	34
Abbildung 9: links: Positionierung der funkbasierten Messtechnik; rechts: Innenansicht des untersuchten Fensters	36
Abbildung 10: Konstruktionszeichnungen – links: Horizontalschnitt; rechts: Vertikalschnitt (gezeichnet von Fa. Schaden)	36
Abbildung 11: Links: Innenansicht; rechts: Werkplan der neu gemachten Flügel (gezeichnet von Fa. Svoboda).....	38
Abbildung 12: Links: Positionierung der funkbasierten Messtechnik; rechts: Außenansicht des untersuchten Fensters mit umlaufendem Steingewände.....	39
Abbildung 13: Konstruktionszeichnung – links: Horizontalschnitt; rechts: Vertikalschnitt (gezeichnet von Fa. Winkler)	40
Abbildung 14: Links: Innenansicht mit Messtechnik; rechts: Konstruktionszeichnung Vertikalschnitt (gezeichnet von Fa. Winkler).....	41
Abbildung 15: links: Positionierung der detaillierten Messtechnik; rechts: Innenansicht eines der untersuchten Fenster	43
Abbildung 16: Konstruktionszeichnung – Vertikalschnitt mit Vakuumglas außen (gezeichnet von Fa. Zoller-Prantl).....	43
Abbildung 17: Oben - Links: Konstruktionsaufbau mit Materialzuweisung (vgl. Tabelle 7 und Tabelle 8); oben - rechts: Falschfarbenbild mit Temperaturverteilung durch den Querschnitt.....	48
Abbildung 18: Temperaturkurven an der Innenoberfläche (Innen) und Oberfläche im Bufferraum (Buffer) aller drei Anwendungsfälle (i) Vakuumglas innen (VG innen), (ii) Vakuumglas außen (VG aussen) und (iii) Floatglas in beiden Ebenen (Original).....	49

Abbildung 19: Ansicht der Prototypen von innen (von links nach rechts): Prototyp Zoller, Prototyp Winkler, Prototyp Schaden.....	52
Abbildung 20: Zeichnung des Kastenfenster (erstellt von Tischlerei Alois Winkler), linke Seite Außenansicht, Mitte Schnitt (links außen und rechts innen), rechte Seite Außenansicht	56
Abbildung 21: Zeichnung des Kastenfenster (erstellt von Tischlerei Alois Winkler), in dem die Scheibenabstände (SA), von rechts nach links) dargestellt sind.	57
Abbildung 22: Einbausituation des Kastenfensters bei SA 121 mm und SA 171 mm, links senderraumseitig und rechts empfangsraumseitig.....	62
Abbildung 23: Empfangsraumseitige Einbausituation des Kastenfensters bei SA 271 mm.....	62
Abbildung 24: Außenflügel (A), allein – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert.	65
Abbildung 25: Außenflügel (A), allein – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen (links nicht abgeklebt und rechts *abgeklebt).....	65
Abbildung 26: Außenflügel (A), allein – Frequenzverläufe der einzelnen Außenflügel (links nicht abgeklebt und rechts *abgeklebt).....	66
Abbildung 27: Außenflügel (A), allein – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert.	67
Abbildung 28: Innenflügel (I), allein – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen (von links nach rechts sind VSGa, Vakuum und MIG Verglasungen dargestellt)	67
Abbildung 29: Innenflügel (I), allein – Frequenzverläufe von einzelnen Innenflügel im Vergleich zu einer reinen Verglasung (links Vakuumglas 4v4, symmetrisch und rechts Vakuumglas 4v6, asymmetrisch) 68	
Abbildung 30: Innenflügel (I), allein – Frequenzverläufe von einzelnen Innenflügel im Vergleich zu einer reinen Verglasung (links Vakuumglas 4v4, symmetrisch und rechts Vakuumglas 4v6, asymmetrisch) 69	
Abbildung 31: Innenflügel (I), allein – Frequenzverläufe von einzelnen Innenflügel im Vergleich zu einer reinen Verglasung (links 4 mm EG mit den zwei Außenflügeln ohne und mit zusätzlicher Dichtungsebene und rechts VSGa/VSG System)	70
Abbildung 32: Innenflügel (I), allein – Frequenzverläufe von einzelnen Innenflügeln (links 6-10-4 MIG mit und ohne Sprossen und rechts 6-10-4 MIG vs. 33.8a-10-4 MIG mit Akustikfolie)	71
Abbildung 33: Vom Innenflügel zum Kastenfenster mit SA(1) – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen	71
Abbildung 34: Kastenfenster SA(1) – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert.	72
Abbildung 35: Kastenfenster mit SA(1) – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen	72
Abbildung 36: Kastenfenster mit SA(1) bei 121 mm – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links A 4(S) / I 4 (schwach) und rechts A 33.8 / I 4v4L3a (stark)). Die Kastenfenster sind in grün, die Außenflügel (allein) in schwarz und die Innenflügel (allein) in rot dargestellt.....	73
Abbildung 37: Kastenfenster SA(2) – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert	74

Abbildung 38: Kastenfenster mit SA(2) – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen	74
Abbildung 39: Kastenfenster mit SA(2) bei 171 mm – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links A 4(S) / I 4 (schwach) und rechts A 33.8 / I 4v4L3a (stark)). Die Kastenfenster sind in grün, die Außenflügel (allein) in schwarz und die Innenflügel (allein) in rot dargestellt.....	75
Abbildung 40: Kastenfenster SA(2) – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert. Bei dieser Konfiguration wurde eine zusätzliche Dichtungsebene im Außenbereich mit Mahlerkrepp verwendet.....	76
Abbildung 41: Kastenfenster mit SA(2)* und zusätzlicher Dichtung im Außenbereich – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen.....	76
Abbildung 42: Kastenfenster mit SA(2)* bei 171 mm mit zusätzlicher Dichtung im Außenbereich – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links A 4(S) / I 4 (schwach) und rechts A 33.8 / I 4v4L3a (stark)). Die Kastenfenster sind in grün, die Außenflügel (allein) in schwarz und die Innenflügel (allein) in rot dargestellt.....	77
Abbildung 43: Kastenfenster SA(3) – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert.	78
Abbildung 44: Kastenfenster mit SA(3) – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen	78
Abbildung 45: Kastenfenster mit SA(3) bei 271 mm – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links A 4(S) / I 4 (schwach) und rechts A 33.8 / I 4v4L3a (stark)). Die Kastenfenster sind in grün, die Außenflügel (allein) in schwarz und die Innenflügel (allein) in rot dargestellt.....	79
Abbildung 46: Kastenfenster SA(4) ^H – Systematische Darstellung der untersuchten Konfiguration. In hellblau wird der jeweils eingebaute Flügel symbolisiert.	80
Abbildung 47: Kastenfenster mit SA(4) ^H – Verbesserungen des bewerteten Schalldämm-Maßes ohne und mit tieffrequenten Anpassungen	81
Abbildung 48: Kastenfenster mit SA(4) ^H bei 271 mm – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links A 4(S) / I 4 (schwach) und rechts A 33.8 / I 4v4L3a (stark)). Die Kastenfenster sind in grün, die Außenflügel (allein) in schwarz und die Innenflügel (allein) in rot dargestellt.....	81
Abbildung 49: Kastenfenster mit SA(2) bei 171 mm – Frequenzverläufe von mehreren Scheibenkonfigurationen (links A wird beibehalten und I mit Vakuumverglasungen geändert und rechts A wird geändert und I mit 4v4L3a beibehalten).....	82
Abbildung 50: Kastenfenster mit verschiedenen SA – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links schwache Verglasung A 4(S) / I 4 und rechts starke Verglasung A 33.8 / I 4v4L3a) mit SA(1) in schwarz, SA(2) in rot und SA(3) in blau.	83
Abbildung 51: Kastenfenster mit verschiedenen SA – Frequenzverläufe von zwei Scheibenkonfigurationen (links schwache Verglasung A 4(S) / I 4 und rechts starke Verglasung A 33.8 / I 4v4L3a) mit SA(2)* (mit zusätzlicher Dichtungsebene) in grün, SA(3) in blau und SA(4) (mit Heraklith-Blendrahmen) in cyan.	84

Abbildung 52:	Links, Ansicht einer der Fixverglasungen von außen, eingebaut im Prüfstand der Holzforschung Austria; Rechts, Pendel mit Zwillingstreifen (Stoßkörper)	86
Abbildung 53:	Vakuum-Verglasung 4v4: Auftreffpunkte des Pendels und Abstände in mm von der Rahmen-Außenkante.....	86
Abbildung 54:	Vakuum-Verglasung 4v4: Glasbruch am Auftreffpunkt a und größtes losgelöstes Glas-Bruchstück	87
Abbildung 55:	Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4 (Fallhöhe 20 mm): Auftreffpunkte und Abstände in mm von Rahmen-Außenkante	88
Abbildung 56:	Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4 (Fallhöhe 50 mm): Auftreffpunkte und Abstände in mm von Rahmen-Außenkante	88
Abbildung 57:	Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4: Rissbildung im Glas bei Auftreffpunkt c; Ansicht von Innenseite	89
Abbildung 58:	Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4: gesplittertes Glas bei Auftreffpunkt a und größtes losgelöstes Teil; Ansicht von Innenseite	90
Abbildung 59:	Vakuum-Verglasung mit 2x VSG 3/4v4/3: Auftreffpunkte in mm und Abstände von Rahmen-Außenkante.....	90
Abbildung 60:	Vakuum-Verglasung mit 2x VSG 3/4v4/3: Ansicht von der Innenseite nach dem Versuch	91
Abbildung 61:	2-Scheibenisolierverglasung 4/18/8 (Fallhöhe 200 mm): Auftreffpunkte und Abstände in mm von Rahmen-Außenkante	92
Abbildung 62:	2-Scheibenisolierverglasung 4/18/8 (Fallhöhe 300 mm): Auftreffpunkte und Abstände in mm von Rahmen-Außenkante	92
Abbildung 63	Ansicht des Prototyps von Angriffsseite	94
Abbildung 64:	Links: statische Belastung des Gehflügels im oberen Stulpbereich (Belastungspunkt Gfl V1); Rechts: Verformung des äußeren Treibriegels.....	95
Abbildung 65:	Links: statische Belastung des Gehflügels im unteren Stulpbereich (Belastungspunkt Gfl V4), der äußere Flügel verformt sich so stark, dass er bereits auf den inneren Flügel drückt; Rechts: Verformung des inneren Treibriegels!	96
Abbildung 66:	Links: nach manueller Belastung der Glasanbindung geöffnetes Glasfeld Rechts: Beschädigungen am bandseitigen Stehflügel nach manueller Belastung.....	97
Abbildung 67:	Ansicht der Fixverglasung von innen, eingebaut in den Klimaprüfstand der Holzforschung Austria	98
Abbildung 68:	Skizze der Fixverglasung (Ansicht von innen), Messpunkte der laufenden Glasoberflächentemperaturmessung (schwarzer Punkt) und Verformungsmessung (rote Punkte und schwarzer Punkt)	99
Abbildung 69:	laufende Verformungsmessung auf der Innenseite des Glases	99
Abbildung 70:	Skizze der Fixverglasung (Ansicht von innen), Messpunkte der Glasoberflächentemperaturmessungen auf der Innenseite (grüne Punkte).....	100
Abbildung 71:	links: Temperatur-Messbereich (schwarzer Bereich) und daneben in der Ecke Verformungsmessfühler; rechts Messung der Glasoberflächentemperatur mittels Infrarot-Thermometer	100

Abbildung 72:	Temperaturen während dem Differenzklimaversuch	102
Abbildung 73:	Temperaturen während dem Differenzklimaversuch. oben: Übersicht, unten Detailansicht	103
Abbildung 74:	Verformung des Glases während dem Differenzklimaversuch. positive Werte = Verformung nach innen / negative Werte = Verformung nach außen	104
Abbildung 75:	Verformung des Glases während des Differenzklimaversuchs: Die Messlatte auf dem Glas liegt in der Scheibenmitte auf, rechts und links ist ein Spalt.	105
Abbildung 76:	Beispiele für Kondensat: Klasse 1 (geringfügig benetzt (beschlagen); links linienförmig (L), rechts teilflächig (T).....	106
Abbildung 77:	Beispiel für Kondensat: Klasse 2 (Tropfen sichtbar, jedoch nicht ab rinnend); teilflächig (T)	107
Abbildung 78:	Beispiele für Kondensat: Klasse 3 (ab rinnende Tropfen, Lackenbildung am/im Fenster); oben linienförmig (L), unten teilflächig (T)	107
Abbildung 79:	Übersicht der Sensorpositionen in Ansicht (links) und Schnitt (rechts).	112
Abbildung 80:	In-Situ U-Werte der Standorte TU Wien (P3) und Innsbruck (P6).	113
Abbildung 81:	Kondensation am 11.2.2021 am Standort P2 - Wien Grinzing.	114
Abbildung 82:	Verteilung der gemessenen Temperaturen (links) und berechneten f-Werte (rechts) für den Standort Wien TU-Wien (P3) in sehr kalten Nächten im Februar 2021 (10. bis 12.02.2021).	116
Abbildung 83:	Verteilung der gemessenen Temperaturen (oben) und berechneten f-Werte (unten) für den Standort Innsbruck (P6) in sehr kalten Nächten im Februar 2021 (10. bis 12.02.2021).	117
Abbildung 84:	Verteilung der berechneten f-Werte der Standorte Puchberg, Wien-Grinzing, Wilhering und Salzburg in sehr kalten Nächten im Februar 2021 (10. bis 12.02.2021).	118
Abbildung 85:	Verteilung der berechneten f-Werte der Standorte Puchberg, Wien-Grinzing, Wilhering und Salzburg in sehr kalten Nächten im Februar 2021 (10. bis 12.02.2021).	119
Abbildung 86:	Darstellung der Temperatur und des spezifischen Luftfeuchtegehalts der einzelnen Messpunkte im Carrier-Diagramm für die Testfälle C1 bis C7.	121
Abbildung 87:	Darstellung der Temperatur und des spezifischen Luftfeuchtegehalts der einzelnen Messpunkte im Carrier-Diagramm für die Testfälle C8 und C9.	122
Abbildung 88:	Darstellung der Temperatur und des spezifischen Luftfeuchtegehalts der einzelnen Messpunkte im Carrier-Diagramm für den Testfall C10.	122
Abbildung 89:	Darstellung der Temperatur und des spezifischen Luftfeuchtegehalts der einzelnen Messpunkte im Carrier-Diagramm für die Testfälle C11 bis C13.	123
Abbildung 90:	Verlauf und Verteilung der Temperaturen am Standort TU-Wien (P3) im Zeitraum vom 30.3.2021 bis 2.4.2021 (sehr warme Frühjahrstage).	124
Abbildung 91:	Verlauf und Verteilung des Wärmeflusses am Standort TU-Wien (P3) im Zeitraum vom 30.3.2021 bis 2.4.2021 (sehr warme Frühjahrstage).	124
Abbildung 92:	Verlauf und Verteilung der Temperaturen am Standort Wilhering (P4) im Zeitraum vom 18.6.2021 bis 21.6.2021 (sehr warme Frühjahrstage).	125
Abbildung 93:	Verlauf und Verteilung der Temperaturen am Standort Salzburg (P5) am 5.6.2021 (typischer sommerlichen Tag).	126

Abbildung 94: Applikation des Vakuumglases auf der Außenseite: links die Positionierung, rechts die stilisierte Wärmeflusscharakteristik.....	129
Abbildung 95: Applikation des Vakuumglases auf der Innenseite bei Pfostenstockkastenfenstern und stark leitendem Randmaterial (z.B. Steingewände): links die Positionierung, rechts stilisiert die Minimierung des Wärmedurchgangs.....	130

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Objektdatenblatt – Schloss Puchberg.....	32
Tabelle 2: Objektdatenblatt – Villa Wasserman.....	35
Tabelle 3: Objektdatenblatt – TU Wien.....	37
Tabelle 4: Objektdatenblatt – Stift Wilhering	38
Tabelle 5: Objektdatenblatt – Ursulinenplatz 4	40
Tabelle 6: Objektdatenblatt – Amt der Tiroler Landesregierung	42
Tabelle 7: Lambda-Werte der zum Einsatz gekommenen Materialien (Quellen: ÖNORM B 8110, ISO 10077-2:2017)	44
Tabelle 8: Randbedingungen innen und außen (diverse Normen und Publikationen).....	45
Tabelle 9: Ergebnisindikatoren im Überblick (Θ _{Luft} : Lufttemperatur; Θ _{si,min} : Mindestoberflächentemperatur; f _{RSi} : Temperaturfaktor für die raumseitige Oberfläche).....	49
Tabelle 10: Klassifizierung der untersuchten Eigenschaften des Prototyps Zoller	53
Tabelle 11: Klassifizierung der untersuchten Eigenschaften des Prototyps Winkler.....	54
Tabelle 12: Klassifizierung der untersuchten Eigenschaften des Prototyps Schaden.....	54
Tabelle 13: Schallschutzklassen von Fenstern nach VDI 2719 (es werden hier nur Kastenfenster angegeben).....	55
Tabelle 14: Übersicht der untersuchten Verglasungen.....	59
Tabelle 15: Übersicht der ausgeführten Messungen mit den ermittelten Einzählwerten in dB. Die Werte die Ermittlung der Verbesserung verwendet wurden sind fett geschrieben. * Die Außenflügel abgeklebt. ^H der Blendrahmen bestand aus Heraklit	64
Tabelle 16: Vakuum-Verglasung 4v4: Ergebnistabelle bei Fallhöhe 20 mm	87
Tabelle 17: Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4: Ergebnistabelle bei Fallhöhe 20 mm	88
Tabelle 18: Vakuum-Verglasung mit 1x VSG 3/4v4: Ergebnistabelle bei Fallhöhe 50 mm	89
Tabelle 19: Vakuum-Verglasung mit 2x VSG 3/4v4/3: Ergebnistabelle bei Fallhöhe 700 mm	91
Tabelle 20: 2-Scheibenisolierverglasung 4/18/8: Ergebnistabelle bei Fallhöhe 200 mm	92
Tabelle 21: 2-Scheibenisolierverglasung 4/18/8: Ergebnistabelle bei Fallhöhe 300 mm	92
Tabelle 22: Zusammengefasste Stoßfestigkeitsversuche.....	93
Tabelle 23: statische Belastung, Element öffnet nicht zur Angriffsseite (Öffnungsseite).....	95
Tabelle 24: statische Belastung, Element öffnet zur Angriffsseite (Schließseite)	96
Tabelle 25: manuelle Belastung, Element öffnet nicht zur Angriffsseite (Öffnungsseite)	97
Tabelle 26: Bewertung des Kondensats während des Differenzklimaversuchs.....	106
Tabelle 27: Übersicht der Objekte, Sanierungsvariante und Details hinsichtlich Monitoring- und Fenstervarianten	108

Tabelle 28: Übersicht des verwendeten Equipment der Monitoring-Varianten „Standard“ und „Detailliert“	111
Tabelle 29: Übersicht der Testfälle und der zugehörigen Dichtungssituation sowie der eingestellten Sollwerte für das Außen- und Innenklima am Klimaprüfstand der HFA	120
Tabelle 30: SWOT-Analyse der Applikation von Vakuumgläsern im Außenflügel.	128
Tabelle 31: SWOT-Analyse der Applikation von Vakuumgläsern im Innenflügel.....	130

Gleichungsverzeichnis

Gleichung 1: fRsi-Wert - der Temperaturfaktor für die raumseitige Oberfläche

Gleichung 2: θ_{int} - Berechnung Temperatur im Zwischenraum

Gleichung 3: Frequenzbetrachtung

Gleichung 4: Einzahlwertbetrachtung

Gleichung 5: Einzahlwertbetrachtung mit Anpassung

Gleichung 6: Resonanzfrequenz

Gleichung 7: Dynamische Steifigkeit der Luftschicht

Gleichung 8: Lambda-Wert

Gleichung 9: U-Wert

Gleichung 10: Temperaturfaktor am Messpunkt

Literaturverzeichnis

EPBD (2010): Richtlinie 2010/31/Eu Des Europäischen Parlaments Und Des Rates, vom 19. Mai 2010, über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, (Neufassung), Amtsblatt der Europäischen Union L 153/13

EAVG (2012): Bundesgesetz über die Pflicht zur Vorlage eines Energieausweises beim Verkauf und bei der In-Bestand-Gabe von Gebäuden und Nutzungsobjekten (Energieausweis-Vorlage-Gesetz 2012 – EAVG 2012)

OIB (2019): OIB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz, April, 2019

OIB (2015): Richtlinie 6 – Energieeinsparung und Wärmeschutz – Website des OIB; bzw. zugehöriger Leitfanden; verfügbar via www.oib.or.at

DENA (2013). Christina Rocker: Transparenz in Datenbanken: Beispiel Energieeffizienz-Expertenliste für Förderprogramme des Bundes. Berlin, 14. November 2013 Zukunft haus – Energie sparen – Wert gewinnen.

ArchDaily (2019): Learn How to Avoid Energy Loss in Your Buildings, zuletzt abgerufen am 12.08.2022: <https://www.archdaily.com/915546/learn-how-to-avoid-the-main-sources-of-energy-loss-in-your-home#:~:text=Several%20pieces%20of%20research%20address,convection%2C%20conduction%2C%20and%20radiation.>

Hohenstein, H. and Heiduk, E. (2016): Sondierungsprojekt VIG-SYS-RENO. Anhang 1. Anhang 1.

Pont, U., Heiduk, E., Schober, P., Romirer, H., Dolezal, F., Proskurnina, O., Schuss, M., Sustr, C., Hohenstein, H. und A. Mahdavi (2015): VIG-SYS-RENO - Sondierung von Fenstersystemen Mit Innovativen Gläsern, Speziell Vakuum-Isoliergläsern, Zur Gebäudesanierung. Ein Projektbericht im Rahmen des Programms Stadt der Zukunft 33/2018. Berichte Aus Energie- Und Umweltforschung.

Baulinks.de (2020): Vakuumisoliertglas „Fineo“ jetzt im deutschsprachigen Raum verfügbar, zuletzt aufgerufen am 12.08.2022: <https://www.baulinks.de/webplugin/2020/1675.php4>

Oettl, F. (2011): Gründerzeit-Fenster- und Fassadenelement. 2011. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 51/2011. Verfügbar via https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/endbericht_1151_gruenderzeit_fenster.pdf

Bernhard, E.; Kruml, M.; Kupf, M.; Zimmermann, L. (2014): Wiener Fenster – Gestaltung und Erhaltung. Stadtentwicklung Wien Werkstattberichte (Nr. 140) – Wien voraus. 2014. Verfügbar via <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/pdf/b008382.pdf>

Bundesdenkmalamt (2011.) – Richtlinie Energieeffizienz Am Baudenkmal, 1. Fassung, Stand 17. März 2011, Bundesdenkmalamt (Hrsg.)

Bundesdenkmalamt (2021) Energieeffizienz am Baudenkmal, Stand 1. September 2021, Wien. Bundesdenkmalamt (Hrsg.)

Gamerith, H. (Hrsg.) (2005): Fenster – Fenstertüren - Skriptenreihe des Institutes für Hoch- und Industriebau der TU Graz

Pech, A., Pommer G., Zeininger, J. (2005): Fenster, 1. Auflage, Springer –Verlag Wien/New York

MA19 (2010) Das Kastenfenster ist dem Einfachfenster in vielen Aspekten überlegen, Folder Wiener Kastenfenster, Magistratsabteilung 19 – Architektur und Stadtgestaltung, verfügbar via <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/pdf/e000011.pdf> (abgerufen August 2022)

Proskurnina, O., Pont, U., Schuss, M., Sustr, C., Heiduk, E., Schober P., Mahdavi A. (2016a): "High-tech solutions for building retrofit: investigation of window systems with vacuum glazing"; Applied Mechanics and Materials (eingeladen), Special Volume: Energy Saving and Environmentally Friendly Technologies - Concepts of Sustainable Buildings (2016), 824; S. 437 - 444.

Proskurnina O., Pont, U., Mahdavi A. (2016b): "The performance of vacuum glazing in existing window constructions: A case study"; Vortrag: Proceedings of the CESBP Central European Symposium on Building Physics AND BauSIM 2016, Dresden, Germany; 14.09.2016 - 16.09.2016; in: "Proceedings of the 3rd Central European Symposium on Building Physics", J. Grunewald et al. (Hrg.); Technische Universität Dresden / Scientific Committee of the CESBP, (2016), 978-3-8167-9798-2; S. 435 - 440.

Pont, U., Schuss, M., Schober, P., Mahdavi, A., Hauer, K. und Lux, C. (2017) 'Modellierung, Optimierung, Und Technische Integration von Vakuumglas-Elementen'. Ein Projektbericht im Rahmen des Programms Stadt der Zukunft 24/2018. Berichte Aus Energie- Und Umweltforschung.

Pont, U., Schober, P., Wölzl, M., Schuss, M.,(2020a): "Endbericht FIVA - Fensterprototypen mit integriertem Vakuumglas (2. Bericht / Endbericht / Tätigkeitsbericht FFG)";Bericht für FFG / Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft / Programmleitung Stadt der Zukunft; Berichts-Nr. Endbericht, 2020; 21 S..

Pont, U., M. Wölzl, M. Schuss, P. Schober, (2020b): "Exploring novel solutions for incorporating vacuum glazing in new and existing window constructions"; Vortrag: NSB2020 - 12th Symposium on Building Physics, Tallinn, Estonia; 07.09.2020 - 09.09.2020; in: "NSB2020", J. Kurnitski, T. Kalamees et al. (Hrg.); 172 (2020), ISSN: 2267-1242; 8 S.

Schuss, M., U. Pont, M. Wölzl, P. Schober, A. Mahdavi (2021) "In-situ performance evaluation of historic box-type windows with vacuum glazing"; Vortrag: 8th International Building Physics Conference IBPC2021, Copenhagen, Denmark; 25.08.2021 - 27.08.2021; in: "Online Portal of presentations and papers of the 8th International Building Physics Conference - IBPC2021", C. Rode et al. (Hrg.); (2021), Paper-Nr. 21.02, 8 S.

U. Pont, P. Schober, M. Wölzl, M. Schuss, J. Haberl, K. Hauer, A. Mahdavi (2021): "The eyes of the city: Historic casement windows as a threatened asset of cultural heritage. Improvement of casement windows with vacuum glazing."; Poster: Conference on Cultural Heritage and New Technologies CHNT26, Wien / Rathaus; 02.11.2021 - 04.11.2021; in: "Proceedings for CHNT26", ICOMOS Austria (Hrg.); Eigenverlag ICOMOS, (2021).

Hauer, K., J. Haberl, P. Schober, U. Pont, M. Schuss, M. Wölzl (2021): "Aus alt und bewährt wird zeitgemäß und innovativ - Kastenfenster mit Vakuumglas thermisch ertüchtigen"; Holzforschung Austria - Magazin für den Holzbereich (eingeladen), 2021, 04; S. 3 - 5.

AnTherm (2022): zuletzt aufgerufen am 12.08.2022:
<http://antherm.at/antherm/Waermebruecken.htm>

Dragino (2021a): Dragino Technology Co., LTD.: DLHT65 LoRaWAN Temperatur- & Feuchtigkeitssensor, URL: <https://bit.ly/3entWUq> ; aktualisiert: 28.2.2021

Dragino (2021b): Dragino Technology Co., LTD.: LPS8 Indoor LoRaWAN Gateway,URL: <https://bit.ly/2MT09Lf> ; zuletztbearbeitet:28.2.2021

Normen

DIN 4108-3, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz (DIN 4108-3:2018-10)

DIN EN ISO 10077-1, Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen-Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil1: Allgemeines (ISO 10077-1:2017)

DIN EN ISO 10077-2, Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen-Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen (ISO 10077-2:2017)

DIN EN ISO 10211, Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen (ISO 10211:2017)

DIN EN ISO 13788, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren (ISO 13788:2012)

ÖNORM B 8110-2, Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion, -Konvektion und Kondensationsschutz (ÖNORM B 8110-2:2018-09)

ÖNORM EN ISO 10211, Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen (ISO 10211:2017)

Internationale Norm ISO 9869:1994, Wärmedämmung – Bauelemente – In-situ Messung des Wärmewiderstands und des Wärmedurchgangskoeffizienten, Internationale Organisation für Normung, Genf, Schweiz.

ÖNORM EN 1026: 2016 08 15 - Fenster und Türen - Luftdurchlässigkeit – Prüfverfahren

ÖNORM EN 12207: 2017 02 01 - Fenster und Türen - Luftdurchlässigkeit – Klassifizierung

ÖNORM EN 1027: 2016 08 15 - Fenster und Türen - Schlagregendichtheit – Prüfverfahren

ÖNORM EN 12208: 2000 02 01- Fenster und Türen - Schlagregendichtheit – Klassifizierung

ÖNORM EN 12211: 2016 10 01 - Fenster und Türen - Widerstand gegen Windlast – Prüfverfahren

ÖNORM EN 12210: 2016 08 15 - Fenster und Türen - Widerstandsfähigkeit bei Windlast – Klassifizierung

ÖNORM EN ISO 140-3: 2005 04 01 - Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 3: Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen (konsolidierte Fassung)

ÖNORM EN 1121: 2000 10 01 Türen - Verhalten zwischen zwei unterschiedlichen Klimaten – Prüfverfahren

9 Anhang

9.1. Data Management Plan (DMP)

1: Datenerstellung und Dokumentation

Die Daten wurden mittels maßgeschneiderten Monitorings (siehe auch entsprechende Sektion in diesem Endbericht zum Monitoring) erhoben. Neben diesen „objektiv“ erhobenen Daten wurden in geringem Maße auch subjektive Bewertungen durch Occupants erhoben.

Es handelt sich bei den Monitoring-Daten um physikalische Parameter in um und Kastenfenster, die zum Großteil aus der Domäne der themor-hygrischen Daten kommen, nämlich Oberflächen- und Lufttemperaturen, relative Luftfeuchtigkeiten und Wärmestromdaten.

Die Meta-Daten, die zur Datenbeschreibung erforderlich sind, sind die Sensorpositionen beim jeweiligen Fenster, sowie die Information welche Sensoren in welchem Fenster an welchem Standort eingebaut waren. Es sind keine personenbezogenen Daten von den Sensoren erfasst worden. Die subjektiv erfassten Daten sind mittels Fragebögen erfasst worden, die von den immer gleichen Personen freiwillig zur subjektiven Beschreibung des Fensterzustands (z.B. Kondensat) ausgefüllt wurden. Auf den Fragebögen sind keine personenbezogenen Daten gesammelt worden. Die Auswertung erfolgte 100%ig anonymisiert.

2: Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Die Mess-/Sensordaten erfordern keine Anonymisierung vor der Verwendung. Es ist/wird allerdings aus Gründen der Technologieführerschaft der involvierten wissenschaftlichen und Unternehmenspartnern als nicht sinnvoll angesehen die Daten ohne Kontextualisierung herauszugeben. Es liegen keine Persönlichkeits- oder Urheberrechts-Aspekte vor, sieht man davon ab, dass das Konsortium VAMOS der Urheber der Daten ist.

3: Datenspeicherung und -erhalt

Die Daten wurden sowohl lokal in den Sensoren gespeichert als über geeignete WIFI-Infrastruktur auch an eine zentrale Datenbank übermittelt, aus der die Daten als CSV/Excel-Files oder mittels anderer Datenbetrachtungs- bzw. -modifikationswerkzeuge angesehen oder strukturiert (z.B. aggregiert) wurden. Die BackUps sind im Rahmen der beim Antragsteller (TU Wien, FOB Bauphysik und Bauökologie) üblichen Datensicherheitsroutinen (Cloud/Raid-Sicherungen) erfolgt.

4: Wiederverwendbarkeit der Daten

Zugriff auf die Daten kann auf Anfrage via Email über einen gesicherten Cloud-Dienst erfolgen. Das Format ist dann ein Tabellen-Kalkulationsformat (CSV oder Excel), welches über einen temporär gültigen Link verfügbar ist.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)