

# Fensterprototypen mit integriertem Vakuumglas

FIVA

U. Pont, M. Wölzl,  
M. Schuss, A. Mahdavi,  
P. Schober, J. Haberl, C. Lux

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**47/2020**

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 Michael Paula

Auszugsweise 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/>

# Fensterprototypen mit integriertem Vakuumglas

FIVA

Dipl. Ing. Dr.techn. U. Pont, Univ.Ass. Dipl. Ing. M. Wölzl, BSc.  
Ass.Prof. DDI. Dr.techn. M. Schuss, Univ. Prof. DI Dr. A. Mahdavi  
TU Wien

Dipl.-HTL-Ing. P. Schober, Ing. J. Haberl, Dr. C. Lux  
Holzforschung Austria

Wien, Juli 2020

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 von allen betroffenen Bereichen 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](http://www.NachhaltigWirtschaften.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



# Inhaltsverzeichnis

---

Kurzfassung .....	8
Abstract .....	10
1. Ausgangslage .....	12
1.1. Fenster- und Vakuumglasentwicklung .....	12
1.2. F&E Projekte an der Schnittstelle Vakuumglas und energieeffiziente Fensterkonstruktionen 15	
2. Projektinhalt .....	17
2.1. Allgemeines .....	17
2.1.1. Grundlegende Vorgangsweise.....	17
2.1.2. Projektkonsortium.....	17
2.2. Methodik .....	18
2.2.1. Projektmanagement.....	18
2.2.2. Requirement-Analyse .....	19
2.2.3. Konstruktion .....	19
2.2.4. Wärmetechnische Performance der Fenster .....	19
2.2.5. Schalltechnische Performance der Fenster.....	23
2.2.6. Gebrauchstauglichkeit.....	26
2.2.7. Nutzerspezifische Aspekte .....	28
3. Ergebnisse.....	29
3.1. Prototyp A - Raumseitig flächenbündiges, nach innen öffnendes Dreh-Fenster.....	29
3.1.1. Schlussentwurf .....	30
3.1.2. Performance in Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit .....	32
3.2. Prototyp B - Nach außen öffnendes Parallel-Abstell-Dreh-Fenster .....	33
3.2.1. Schlussentwurf .....	35
3.2.2. Performance in Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit .....	36
3.3. Prototyp C - Schwing-Klapp-Fenster.....	37
3.3.1. Schlussentwurf .....	38
3.3.2. Performance in Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit .....	39
3.4. Prototyp D - Abstell-Schiebe-Fenster .....	40
3.4.1. Schlussentwurf .....	43
3.4.2. Performance in Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit .....	45
3.5. Nutzungsrelevanter Aspekte .....	46

3.6.	Gleit- und Vakuumdichtung .....	48
3.7.	Schallschutz .....	50
3.7.1.	Schallschutz von Vakuumglas.....	54
3.7.2.	Schallschutz von Vakuumglasfenster .....	69
4.	Schlussfolgerungen.....	72
5.	Ausblick und Empfehlungen.....	75
6.	Verzeichnisse.....	76
6.1.	Abbildungsverzeichnis.....	76
6.2.	Tabellenverzeichnis .....	79
6.3.	Literaturverzeichnis.....	80
7.	Anhang.....	83
7.1.	Kontakt zum Projektkonsortium .....	83
7.2.	Liste von im Rahmen des Projektes erfolgten Publikationen.....	84



## Kurzfassung

Es ist allgemein bekannt, dass Gebäude für einen Großteil des Energieverbrauchs und der Emission klimaschädlicher Gase verantwortlich sind, dabei wird in Europa bei Wohngebäuden (das ist die überwiegende Mehrheit der Gebäude) dem Bauteil Fenster ein erheblicher Anteil dieser Problematik zugeschrieben. Zu den Technologien zur Verbesserung dieses „Schwachpunkts Fenster“ gehört der Einsatz zeitgemäßer und innovativer Glasprodukte, wie zum Beispiel Vakuumglas. Dabei gilt es, die Spezifika von Vakuumglas - exzellenter  $U_g$ -Wert  $\leq 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  bei extrem dünnen Glasdicken (8-10 mm), geringes Gewicht und der notwendige tiefe Glaseinstand von ca. 40 mm - in entsprechenden innovativen Fensterkonstruktionen zu berücksichtigen.

In der Fensterentwicklung der letzten Jahrhunderte (und Jahrzehnte) gab es nur wenige disruptive Innovationssprünge. Im Wesentlichen können die Entwicklungsschritte Einfachfenster, Kastenfenster, Verbundfenster und letztlich Isolierglasfenster benannt werden. Diese Entwicklung war stets vom Streben nach verbessertem Wärmeschutz und stark von der Entwicklung der Glastechnologie geprägt. Vor knapp 60 Jahren sind fast zeitgleich das Isolierglas und der Dreh-Kipp Beschlag erfunden worden. Nach diesem Innovationsprung folgten weitere Entwicklungen, jedoch vor allem in der linearen Optimierung dieser bestehenden Grundkonstruktions-Technologien und in den verwendeten Rahmenmaterialien (Holz, Kunststoff, Aluminium, Kompositmaterialien).

**Im Projekt FIVA ergab sich die einmalige Chance, mit dem innovativen Vakuumglas auch holistisch eine neue Fenstergeneration zu entwickeln:** Einerseits galt es, die Spezifika des Vakuumglases bestmöglich zu berücksichtigen, andererseits, komfortable Öffnungsszenarien zu entwickeln und die Fenster mit zeitgemäßen, mechatronischen Beschlägen auszustatten.

Diesbezüglich ist es in diesem Forschungsvorhaben gelungen, eine Überleitung der im Sondierungsprojekt MOTIVE (FFG-No.: 854690) erreichten Ergebnisse auf die nächste Stufe der technischen Ausgereiftheit zu bewerkstelligen. Gemeinsam haben die TU Wien und die Holzforschung Austria mit sieben Wirtschaftspartnern (Fa. Gaulhofer, Fa. Katzbeck, Fa. IEB Eisele, Fa. Internorm, Fa. Maco, Fa. Svoboda, Fa. Wick) in einem iterativen Entwicklungsprozess vier voll funktionsfähige Prototypen entwickelt und Systemkomponenten, wie z.B. Vakuumdichtungen oder Steuermodule entworfen, gebaut und getestet. Konkret handelt es sich dabei um folgende Fenster-Prototypen:

- **(Typ A)** Raumseitig flächenbündiges, nach innen öffnendes Dreh-Fenster (mit Lüftungsstellung)
- **(Typ B)** Nach außen öffnendes Parallel-Abstell-Dreh-Fenster (mit Lüftungsstellung)
- **(Typ C)** Schwing-Klapp-Fenster ohne bewegliche Verriegelungselemente (mit Lüftungsstellung)
- **(Typ D)** Abstell-Schiebe-Fenster mit unsichtbar integrierten Teleskopschienen (mit Lüftungsstellung)

Alle vier Fenster zeigen hervorragende wärmetechnische Eigenschaften und erreichen im besten Fall - bei Einsatz eines Vakuumglases mit  $U_g=0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  - einen exzellenten Fenster U-Wert von  $U_w=0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Auch die anderen getesteten Performancewerte in Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit, wie z.B. Luftdurchlässigkeit, Schlagregendichtheit, Windwiderstandsfähigkeit und Schallschutz zeigen, dass die Funktionsprototypen auf einem sehr guten Niveau liegen, aber noch weitere Optimierungen

möglich sind. Insgesamt sollten diese vier Prototypen in naher Zukunft zur Serienreife weiterentwickelt werden.

Im Hinblick auf nutzungsrelevante Aspekte wurden die vier Prototypen einer breiten Öffentlichkeit, in Form von Vorträgen, Publikationen und einer Sonderschau (im Rahmen des Fenster-Türen-Treffs 2020 in Salzburg) vorgestellt und von dieser bewertet. Das Feedback war enorm und fand auch entsprechenden Niederschlag in der Fachpresse. Es wurden sowohl die mutigen Lösungsansätze, die konsequente Umsetzung in den Prototypen, wie auch die innovativen Öffnungsarten anerkannt. Kritisch wurde die wirtschaftliche Umsetzung insbesondere in Zusammenhang mit den mechatronischen Antrieben und der Nutzerakzeptanz gesehen. Die technischen Kommentare können teilweise aufgrund der detaillierten technischen Ausführung entkräftet werden, sollten aber im nächsten Entwicklungsschritt Berücksichtigung finden. Insgesamt wurde mit diesem Projekt ein wichtiger Impuls für die gesamte Fensterbranche gegeben und die Innovationskraft und Technologieführerschaft Österreichs auf diesem Gebiet eindrucksvoll sichtbar gemacht.

## Abstract

It is common knowledge that buildings contribute to the major share of energy consumption and emission of CHG (Climate harming Gases). In the case of residential buildings, which constitute the majority of buildings, windows are considered to cause a significant proportion of this share (in Europe). Recent technologies that improve the window performance encompass contemporary and innovative glass products, such as vacuum glazing. In the case of vacuum glazing the characteristics of this technology needs to be considered. These are a very low  $U_g$ -Value ( $\leq 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) accompanied by very thin total thickness (8 to 10 mm) and, as a result, low weight. Moreover, construction efforts with vacuum glass have to consider that a glass edge cover length of about 40 mm is required to avoid unwanted thermal bridge effects along the glass perimeter.

In the construction development of windows very few disruptive innovations can be identified in the past centuries and decades. Majorly, the steps of single-glazing window, casement window, composite window and (multi-pane) insulation glass windows can be named as major innovation steps. This development was majorly driven by the need for better thermal insulation. Moreover, the development has been accompanied by developments in the glass-producing industry as well as in the fittings and sealing industries. Around 60 years ago, multipane-insulation glass and fittings for tilt-and-turn-windows have been developed nearly simultaneously. Since this last innovative leap, only linear optimization of the mentioned basic technologies can be found as well as some innovation in the used materials for window frames (timber, plastic, aluminum, composites).

The project FIVA offered the unique opportunity to utilize the integration of vacuum glazing products in windows for fundamental considerations regarding window constructions as such: On the one hand, the mentioned specifics of vacuum glass have to be considered in such window design approaches. On the other hand, new and comfortable operational schemes for the windows can be explored together with mechatronic fitting technologies.

Based on the findings of the exploratory project MOTIVE (FFG-No.: 854690) the next development steps regarding technology readiness were addressed in FIVA. Thereby, two scientific partners (TU Wien and Holzforschung Austria) together with 7 industrial partners (Fa. Gaulhofer, Fa. Katzbeck, Fa IEB Eisele, Fa. Internorm, Fa. Maco, Fa. Svoboda, Fa. Wick) collaborated in iterative development processes, which resulted in four, fully-functional window prototypes. Moreover, system components required for these four window prototypes (including rubber seals based on vacuum technology and controller for mechatronic operation of the windows) have been envisioned, prototyped and tested. The four prototypes were:

- **(Typ A)** Turn window opening to the inside with flush-mounted glass.
- **(Typ B)** Turn window opening to the outside including parallel offset ventilation position
- **(Typ C)** Swing Window without moving fittings
- **(Typ D)** Sliding window with offset movement and invisible telescope slide railings

All four windows feature excellent thermal performance characteristic. If a vacuum glazing with an  $U_g$ -value of  $0.4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  is used,  $U_w$ -values of  $0.55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  are reachable. Moreover, other performance criteria and their threshold values, such as usability, air tightness, density against wind-driven rain, wind resistance, and sound insulation, were considerably surpassed by the prototypes. However,

future improvement seems both necessary and desirable. All four prototypes should be further developed to series-production readiness in the near future.

The four prototypes were shown to an interested audience in form of talks, publications, and a special exhibition that took place in the framework of the Fenster-Türen-Treff 2020 in Salzburg. The feedback was constructive and the prototypes and the work of the project consortium were reported in articles by different periodicals. Thereby, the innovation, the consequent integration in prototypes, and the unusual operation schemes of the prototypes were highlighted. Some critical comments included the possibility of feasible mass production and some aspects of user acceptance. All of these comments will be integrated in the future R&D work pertaining to the prototypes. To conclude, the project provided a major boost to the window producing industry, and underlined the innovation power and technology leadership of Austrian window producing companies.

# 1. Ausgangslage

Es ist allgemein bekannt, dass Gebäude für einen Großteil des Energieverbrauchs und der Emission klimaschädlicher Gase verantwortlich sind, dabei wird bei Wohngebäuden dem Fenster ein erheblicher Anteil dieser Problematik zugeschrieben. Zu den Technologien zur Verbesserung des „Schwachpunkts Fenster“ gehört der Einsatz zeitgemäßer und innovativer Glasprodukte, wie zum Beispiel Vakuumglas. Dabei gilt es, die Spezifika von Vakuumglas - nämlich exzellenter U-Wert ( $\leq 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) bei extrem dünnen Glasdicken (8-10 mm), geringem Gewicht und notwendigem tiefem Glaseinstand von ca. 40 mm - in entsprechenden innovativen Fensterkonstruktionen zu berücksichtigen. Das Einsetzen von Vakuumgläsern in heutigen Isolierglasrahmen ist zwar möglich, aber erscheint wenig sinnvoll (vergleiche hierzu die Erkenntnisse aus den Projekten VIG-SYS-RENO (FFG-Projekt-No.: 845225; Endbericht verfügbar unter [www.nachhaltigwirtschaften.at](http://www.nachhaltigwirtschaften.at)) und MOTIVE (FFG-Projekt-No.: 854690; Endbericht verfügbar unter [www.nachhaltigwirtschaften.at](http://www.nachhaltigwirtschaften.at)), sowie Chmúrny et al. 2019).

Diesbezüglich ist das Forschungsvorhaben FIVA als Überleitung der im Sondierungsprojekt MOTIVE erreichten Ergebnisse in eine Weiterentwicklung als kooperatives F&E-Projekt zu verstehen. Von den sieben entwickelten Entwurfskonzepten aus MOTIVE und den daraus abgeleiteten Handmustern war geplant, die zwei bis drei vielversprechendsten gemeinsam mit Wirtschaftspartnern der fensterbauenden und fenstertechnologie-zuliefernden Industrie (KU, MUs, GUs) bis hin zu Funktionsprototypen weiterzuentwickeln. Um zu gewährleisten, dass dies auf höchstem innovativem Niveau passiert, wurden Hersteller von Sekundärtechnologien (Beschlüge, Antriebe und Dichtungen) sowie namhafte Fensterhersteller fundamental eingebunden (am Ende wurden es sogar vier Funktionsprototypen, sowie einige Nebenprodukte, wie Innovationen im Beschlags- und Dichtungssektor).

Verglichen mit den sehr linearen Entwicklungen der vergangenen Jahre im Fensterbereich, stellt der Inhalt des Projektes FIVA eine andere Stoßrichtung dar: Fenster neu gedacht, oder auch „Das Morgenfenster“ wie ein zugehöriger Vortrag beim Fenster-Türen-Treff 2020 genannt wurde.

## 1.1. Fenster- und Vakuumglasentwicklung

In der **Fensterentwicklung** der letzten Jahrhunderte (und Jahrzehnte) gab es nur relativ wenige, wirkliche Innovationssprünge. Im Wesentlichen handelt es sich um die Innovationsschritte Einfachfenster, Kastenfenster, Verbundfenster und letztlich Isolierglasfenster. Diese Entwicklung war stets vom Streben nach verbessertem Wärmeschutz und stark von der Entwicklung der Glastechnologie geprägt. Vor knapp 60 Jahren sind fast zeitgleich das Isolierglas und der Dreh-Kipp Beschlag erfunden worden. Daraus resultierten grundlegend neue Fensterkonstruktionen (siehe Abbildung 1). Nach diesem Innovationsprung folgten weitere Entwicklungen, jedoch vor allem in der linearen Optimierung dieser bestehenden Grundkonstruktions-Technologien und in den verwendeten Rahmenmaterialien (Holz, Kunststoff, Aluminium, Komposit-Materialien).

Anhand der nachfolgend aufgelisteten Entwicklungsschritte (aus Österreich bzw. des D-A-CH-Raums) und dem Fehlen wirklich radikaler Innovationssprünge betreffend der Konstruktion lässt sich ablesen, dass es sich bei der Fensterindustrie bis dato um einen traditionell-behafteten Wirtschaftszweig mit vergleichsweise langsamer, stetig-linear Evolution handelt (siehe Abbildung 1):

- **Rahmenkonstruktion Holz:** vom IV68 zum IV92 (Isolierverglaste-Fenster, Rahmendicke von 68 mm auf 92 mm erhöht, bedingt durch die Konstruktionsdicke des 3-fach Isolierglas) (vergleiche Abbildung 1 und Abbildung 2)
- **Konstruktion:** mehr Dichtebenen, Flächenbündigkeit, Glasklebung, Türschwellen
- **Glasseitig:** verbesserte Gasfüllungen und Beschichtung, 2-fach Glas, 3-fach Glas, damit verbunden zunehmendes Gewicht der Gläser und Fenster
- **Beschlagseitig:** fast ausschließlich Dreh-Kipp Beschlag, Entwicklung für größere Glasgewichte und vollverdeckt liegende Beschläge

Ein grundlegendes Hinterfragen von Entwicklungen, bzw. das radikal-disruptive Neu-Überdenken von Einzeltechnologien kann bei den beschriebenen Entwicklungsschritten kaum abgeleitet werden.

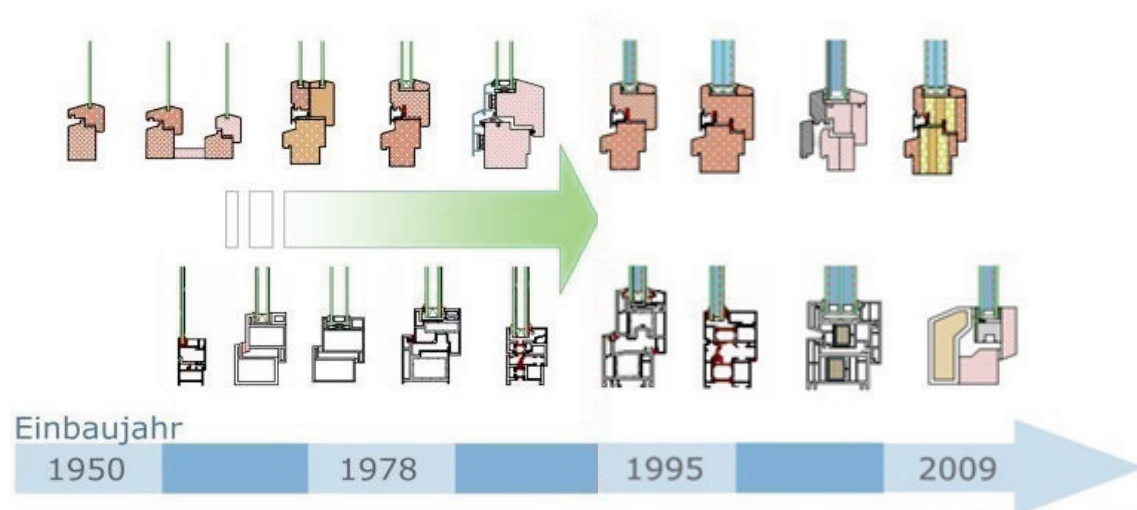


Abbildung 1: Fensterentwicklung (Quelle: ift-Rosenheim)

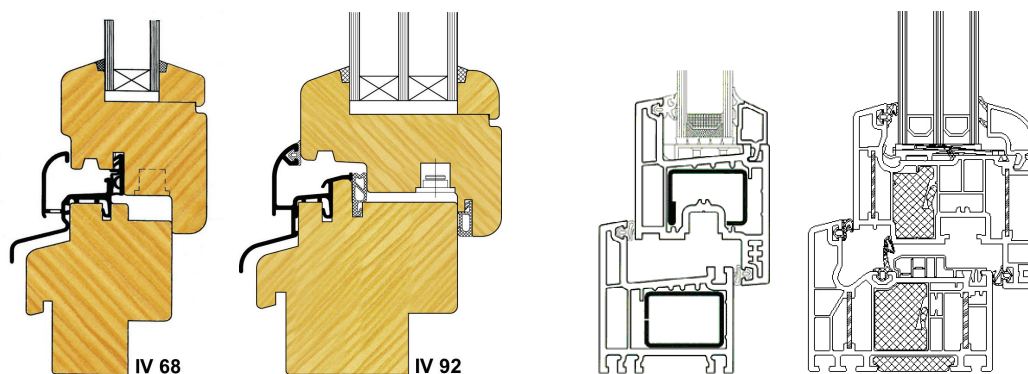


Abbildung 2: Holz- und Kunststofffenster in historischer und aktueller Konstruktionsausführung (Zusammenstellung anhand der Schnittzeichnungen von diversen Herstellern)

Eine der aktuellsten Entwicklungen, welche auf dieser linearen Entwicklungshistorie basiert, ist das Passivhausfenster: Dabei handelt es sich in der Regel um Dreischeiben-Isolierglas mit Low-E-Coating-Beschichtungen und angepassten, hochwärmedämmenden Rahmensystemen und U-Werten von  $U_w \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Gleichwohl diese Fenster heute als Speerspitze im Bereich der thermischen Performance transparenter Außenbauteile angesehen werden, sind sie mit einigen Nachteilen behaftet, wie ihrem

hohen Gewicht und dem trotz optimierten Rahmens bestehende thermische Schwachpunkt am Glas/Rahmen-Anschluss. Es besteht darüber hinaus die Frage nach der Wirtschaftlichkeit solcher Konstruktionen, welche aber von Herstellern und Forschung unisono als gegeben betrachtet wird (vgl. hierzu Ausführungen von B. Krick/Passivhausinstitut Darmstadt bei der Fassadenbautagung 2014; Krick 2014).

Eine andere Herangehensweise an die Weiterentwicklung von Fensterkonstruktionen innerhalb der beschriebenen linearen Entwicklungshistorie ist die Funktionserweiterung von Fensterrahmen, die Systemintegration in Fensterkonstruktionen oder auch die Verwendung von transparenten Bauteilen für zusätzliche Funktionen. Beispielhaft seien die Integration von Lüftungseinrichtungen, Wärmetauschern und Sonnenschutz in das Fenster im Rahmen der Entwicklungen bei z.B. der Fa. Internorm oder der Fa. Katzbeck, sowie tragende Holz-Glaskonstruktionen als transparente Wandbildner mit Lastabtragungsfunktion (z.B. durch die Fa. Petschenig glastec) genannt.

Wie eingangs erwähnt, hat die Fensterentwicklung stets eine starke Verbindung zu den Entwicklungen im **Glassektor** gezeigt (siehe Abbildung 3). So hat die Entwicklung von Isoliergläsern auch die Entwicklung entsprechender Fenstergenerationen angeregt. Die spätere Feinoptimierung (z.B. verbesserte Gasfüllungen, Beschichtungen, wärmebrücken-reduzierte Randverbünde) verbesserten die thermischen Kennwerte, sind aber nicht als Entwicklung von neuen Fenstern zu werten, sondern lediglich als punktuelle Optimierungen von bewährten Systemen.

Zur weiteren Steigerung der thermischen Performance bzw. der Effizienz von Fenstern gibt es eine Anzahl von unterschiedlichen Ansätzen, jedoch kann die Verwendung von Vakuumglas als am vielversprechendsten bezeichnet werden.

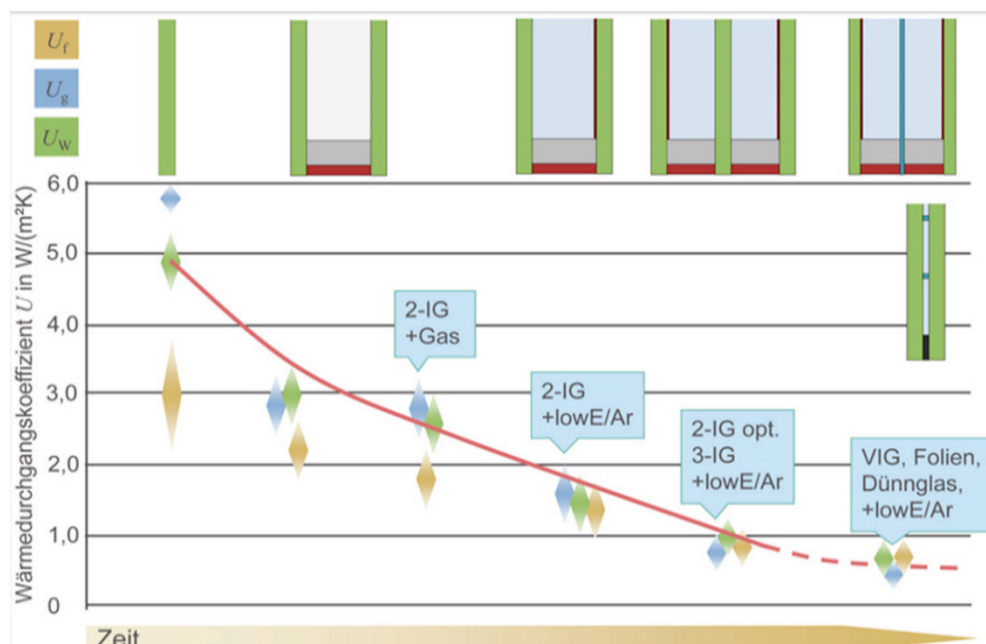


Abbildung 3: Glasentwicklung (Quelle: ift-Rosenheim)

Unter **Vakuumglas** versteht man in der Regel zwei ESG-Gläser (Einscheibensicherheitsgläser), die einen parallelen Abstand von 0,15 bis 0,5 mm aufweisen und am Rand dicht miteinander verbunden sind (Randverbund). Zusätzlich ist im Zwischenraum ein Raster von punktförmigen Abstandhaltern

(sogenannte „Pillar“, Achsabstand je nach Hersteller zwischen ca. 20 und ca. 40 mm) über die Glasfläche verteilt. Der Zwischenraum der Vakuumgläser ist evakuiert (Hochvakuum,  $10^{-6}$  hPa). Mit solchen Gläsern können heute U-Werte von  $U_g \leq 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht werden, wobei  $U_g$  Werte von bis zu  $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  technisch in Griffweite erscheinen. Im Rahmen der Sondierungsprojekte VIG-SYS-Reno und MOTIVE wurde eine umfangreiche Studie zum Thema durchgeführt und in der Publikation „Vakuumglas / Literatur-, Markt- und Hintergrundrecherche für innovative Verglasungslösungen mit Fokus auf Vakuumverglasungen (VG) veröffentlicht (Hohenstein und Heiduk 2016, Hohenstein 2017).

Unter den weltweiten Forschungs- und Entwicklungsbemühungen betreffend die Entwicklung von (dauerhaftem) Vakuumglas haben sich die Entwicklungen aus dem asiatischen Raum als führend bewährt. Dies hat sich anhand der in den beiden erwähnten Vorprojekten verwendeten Vakuumgläsern der Fa. Synergy (China) bestätigt – die Gläser haben sich als marktreif erwiesen. Leider hat die Firma Synergy aus nicht näher bekannten Gründen trotz Errichtung von neuen Produktionsstraßen vor einiger Zeit den operativen Produktionsbetrieb eingestellt. In letzter Zeit sind neben Produkten von Synergy auch welche von EAGON (Korea), Pilkington (asiatischer Raum), Guardian (USA) und vor kurzem auch AGC/Interpane (Belgien) verfügbar geworden. Die unterschiedlichen Vakuumglasprodukte unterscheiden sich aber zum Teil erheblich in Erscheinungsform, Dicke, Pillarabstand und thermischer Performance.

Aus den Darstellungen der lediglich kleinräumigen technologischen Entwicklungen der Fenstertechnologien bei weitestgehend gleichbleibender Gesamterscheinung der Fenster, sowie der Verfügbarkeit von funktionstüchtigen Vakuumgläsern bietet sich nun die historische und einzigartige Chance, Fenster als Gesamtbauteil neu zu konzipieren und zu realisieren.

## **1.2. F&E Projekte an der Schnittstelle Vakuumglas und energieeffiziente Fensterkonstruktionen**

Der Forschungsbereich Bauphysik und Bauökologie (TU-Wien) und die Holzforschung Austria (HFA) haben zum Thema Applikation von Vakuumglas in Fensterkonstruktionen zwei **Vorprojekte** erfolgreich abgeschlossen.

Das Sondierungsprojekt „**VIG-SYS-RENO** - *Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung*“ (FFG-No. 845225, 2014-2015) war die erste eingehende Befassung mit Vakuumgläsern in der österreichischen Forschungslandschaft und hat prinzipielle und strategische Grundsatzfragen für Vakuumgläser im Bestand geklärt. Dabei konnte die Marktreife von Vakuumgläsern und die Möglichkeit des Einsatzes solcher Gläser bei der Sanierung von historischen Kastenfenstern nachgewiesen werden. Das Projekt zeigte aber auch, dass den Spezifika von Vakuumglas bei Neukonstruktionen in besonderem Maße Rechnung getragen werden muss, um das volle Potential ausschöpfen zu können.

Das folgende Sondierungsprojekt „**MOTIVE** - *Modellierung, Optimierung, und technische Integration von Vakuumglas-Elementen: Sondierung über die Detaillierung von Vakuumgläsern in neuen Holz(Alu)Fenster-Konstruktionen Detaillierung, Bau und Simulation*“ (FFG-No. 854690, 2016-2017) befasste sich mit der Integration von hoch effizienten Vakuumgläser in zeitgemäße Fensterkonstruktionen. Im Rahmen des Projektes konnte gezeigt 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 nur zur Potentialabschätzung konzeptioniert. Basierend auf den Entwicklungen aus MOTIVE werden nun im vorliegenden Projekt gemeinsam mit Wirtschaftspartnern voll funktionstüchtige neue Fensterprototypen erstellt (die einzelnen Konzepte, Handmuster, Illustrationsprototypen sind in den Ergebnisberichten zu MOTIVE ausführlich dargestellt).

Im aktuell laufenden Projekt „**VAMOS** – Vakuumglas-Kastenfenster: Performance - Monitoring in Sanierungsprojekten“ (FFG-No. 878272, 2019-2021) sollen Realisierungen / Demonstrationsobjekte von Kastenfenstersanierungen mit Vakuumglas konzeptioniert, konstruiert, eingebaut und via Monitoring und Simulation evaluiert werden. Aufbauend auf den Erkenntnissen soll damit eine gangbare Methodik entwickelt werden, mit welcher historische Kastenfenster unter lediglich geringfügiger Modifikation an der Gesamtkonstruktion an typische Performancezahlen von neuen Fenstern mit Mehrscheibenverglasung herangeführt werden können.

Nachfolgende Grafik zeigt das Projekt FIVA in der Forschungslandschaft zum Thema Vakuumglas.

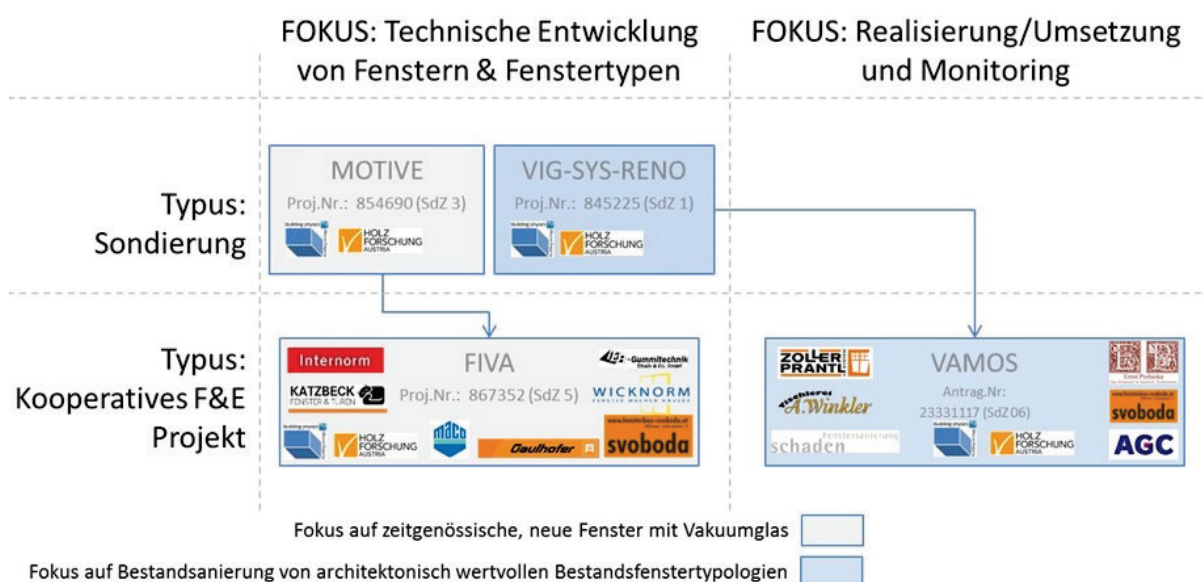


Abbildung 4: Forschungslandschaft zum Thema Vakuumglas (eigene Darstellung Projektkonsortium / Konsortialführung)

## 2. Projektinhalt

### 2.1. Allgemeines

#### 2.1.1. Grundlegende Vorgangsweise

Zur Erreichung des Ziels der Entwicklung eines Portfolios an Funktionsprototypen mit Vakuumglas, die gängigen Anforderungen genügen (bzw. am Weg dorthin sind), wurde im Projekt ein multi-kriterieller Ansatz verfolgt (siehe Abbildung 5).

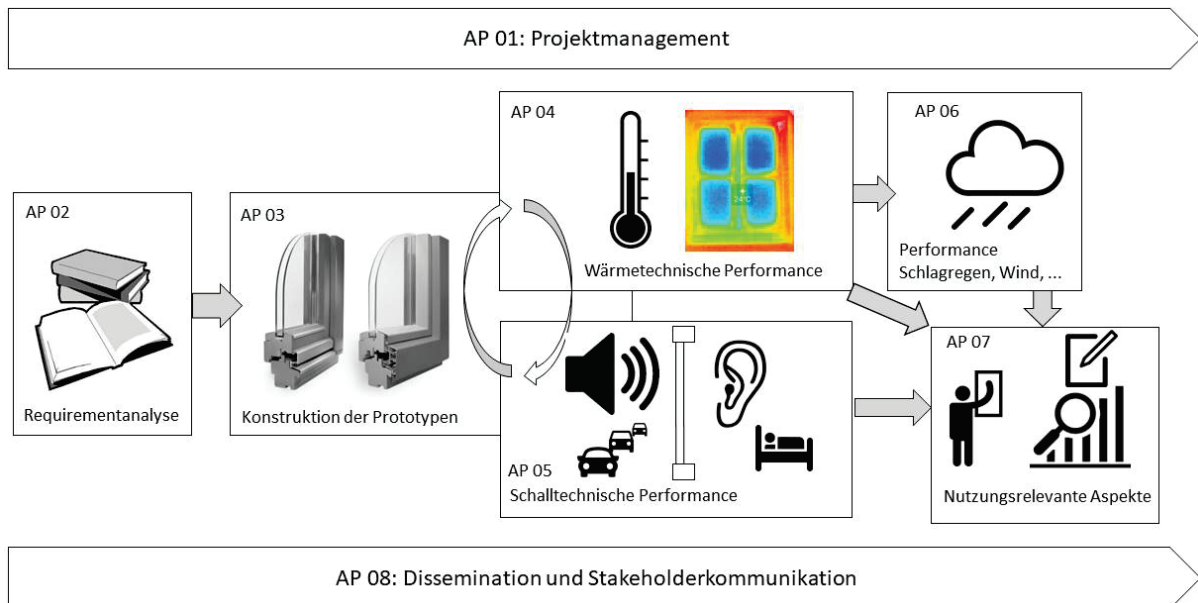


Abbildung 5: Ablauf des FIVA-Projektes - Arbeitspakete (APs) (eigene Darstellung, erstveröffentlicht im Forschungsantrag zu FIVA)

In einem iterativen Entwicklungsprozess zwischen den Projektpartnern wurden Lösungsansätze entwickelt, verworfen, optimiert und letztendlich ausformuliert. Dies erfolgte sowohl bilateral zwischen allen Beteiligten als auch und sehr intensiv in den acht Projektsitzungen. Diese großen Projektsitzungen wurden – um auch Verständnis für Aspekte der verschiedenen Partner und deren Domänen im Projektkonsortium einfach austauschen zu können – bei den verschiedenen Projektpartnern abgehalten. Auf diese Weise konnten auch forschungs- und produktionsspezifische Aspekte jeweils direkt in Laboren oder Werkstätten diskutiert werden.

#### 2.1.2. Projektkonsortium

Einen wesentlichen Benefit des Projektes stellte die Zusammensetzung des Projektkonsortiums dar. Von Beginn an entwickelte sich ein durch Interesse, Vertrauen und Innovationswillen geprägtes Team, das bestrebt war, neue Lösungen zu finden. Daraus entstand eine starke Eigendynamik, sodass nicht nur die ursprünglich angedachten zwei bis drei Funktionsprototypen entwickelt wurden, sondern insgesamt vier Prototypen entwickelt wurden und zusätzlich weitere Sonderentwicklungen, wie z.B. der Einsatz von Vakuumdichtungen, im Detail untersucht werden konnte.

Die Projektleitung der TU Wien, unterstützt durch die Holzforschung Austria und die fünf Fensterhersteller, zwei Zulieferer und einem Third-Party-Consultant (siehe

Abbildung 6 und Abbildung 7) konnten das Projekt somit nicht nur erfolgreich abschließen, sondern auch wesentliche neue Entwicklungsansätze für die Branche liefern.



Abbildung 6: Projektpartner – Firmenlogos (Bildquellen: Fa. Gaulhofer, Fa. Internorm, Fa. Katzbeck, Fa. Svoboda, Fa. Wicknorm, Fa. Maco, Fa. Ieb Eisele, Dr. Hohenstein Consulting)



Abbildung 7: Das Projektteam anlässlich der Projektsitzung bei der Fa. Katzbeck in Rudersdorf (von links): Wilfried Eisele (iEB), Oliver Eisele (iEB), Herbert Ehrenleitner (Fa. Wick), Phillip Svoboda (Fa. Svoboda), Peter Schober (Holzforschung Austria), Manfred Wick (Fa. Wick), Florian Höllbacher (Maco), Manfred Uhrig (iEB), Alois Svoboda (Fa. Svoboda), Ulrich Pont (TU-Wien), Peter Reisenauer (Katzbeck), Mathias Habersatter (Fa. Maco), Dietmar Hammer (Gaulhofer), Helmut Hohenstein (Hohenstein Consultancy), Manfred Deutsch (Katzbeck), Magdalena Wölzl (TU Wien), Matthias Schuss (TU Wien), nicht am Bild die Kollegen der Fa. Internorm (Herbert Hochreiter, Dominik Hoffmann) und weitere Kollegen der Fa. Maco (Robin Duchac, Konecny). (Eigene Aufnahme TU Wien / HFA, Konsortialführung FIVA)

## 2.2. Methodik

### 2.2.1. Projektmanagement

Das Projektmanagement wurde federführend vom Antragsteller der TU Wien, Forschungsbereich Bauphysik und Bauökologie, und in enger Kooperation mit der Holzforschung Austria, durchgeführt.

Bei diesem Projekt kommt dem Projektmanagement – in Anbetracht des aus neun teilnehmenden Institutionen und Unternehmen zusammengesetzten Konsortiums – eine wesentliche Bedeutung zu. Das Projekt wurde nach der Methode des kollaborativen Projektmanagement gesteuert und koordiniert:

- Alle Projektbeteiligten wurden aktiv in den Planungs- und Steuerungsprozess eingebunden.
- Management wurde dabei nicht als isoliertes Aufgabenfeld von Managern aufgefasst, sondern als integraler Bestandteil der Projektarbeit aller Teammitglieder des Konsortiums.

- Die Planungs- und Steuerungsverantwortung fiel daher mit der inhaltlichen Projektverantwortung zusammen.
- Wichtige technische Grundlage war dabei eine zentrale Datenbasis, die allen ProjektmitarbeiterInnen Zugang zu allen relevanten Projektdokumentationen ermöglichte. Im gegenständlichen Fall wurde dies durch eine allen Partnern zugängliche Cloud-basierte Lösung erreicht.
- Potenzielle Störungen und deren Auswirkungen auf die Arbeitspakete wurden frühzeitig kommuniziert (und damit abgefedert bzw. verhindert).

### **2.2.2. Requirement-Analyse**

Basierend auf den Grundlagen betreffend Vakuumgläsern, handwerklicher und industrieller Verarbeitung von Glas- und Rahmenmaterialien, den normativen Anforderungen an Fenster, Fensterbestandteile, deren Bedienbarkeit und systemischen Komponenten, den Vorerfahrungen aus den Projekten VIG-SYS-RENO und MOTIVE, sowie den Kenntnissen und langjährigen Erfahrungen der Mitglieder des Konsortiums wurde im Dialog und in einem iterativen Prozess ein Pflichtenheft für die zu erstellenden Funktionsprototypen erstellt. Dies hat auf der einen Seite gewährleistet, dass die Zielsetzungen des Projektes erreicht wurden (den nächsten Schritt zur Marktnähe zu gehen) und auf der anderen Seite das Fine-Tuning für die Folge-Arbeitspakete ermöglicht. Gleichwohl dieses Arbeitspaket am Anfang des Projektes stand, hat sich der Inhalt als wesentlich für alle kommenden Arbeitspakete herausgestellt. Die meisten Ansätze haben sich als richtig herausgestellt, in Einzelfällen wurde entsprechend nachjustiert.

### **2.2.3. Konstruktion**

Erarbeitung der hochbautechnischen Detailierung der neuen Fensterkonstruktionen hinsichtlich architektonischer, konstruktiver, bautechnischer und (grundlegender) bauphysikalischer Ausführungsvarianten. Dazu wurden in einem ersten Schritt Entwürfe, Handskizzen und in Folge Zeichnungen bis hin zu Werkzeichnungen erarbeitet. Sobald dieser theoretische Optimierungsprozess abgeschlossen war, wurden in einem zweiten Schritt die erste Prototypenserie erstellt und getestet. Daraus leitet sich der nächste Optimierungsschritt ab, bis hin zu den endgültigen vier Funktionsprototypen unterschiedlicher Ausführungsvarianten. Die Konstruktionsentwicklung wurde sowohl für das Fenster selbst als auch parallel dazu für die Beschläge, Antriebe und Dichtungen durchgeführt. Abschließend wurden die vier Funktionsprototypen in eine Wandkonstruktion montiert, um einerseits die architektonischen Wirkungen beurteilen zu können und andererseits diese am 5. und 6.3.2020 anlässlich des Fenster-Türen-Treff 2020 in Salzburg der Öffentlichkeit zu präsentieren und bewerten zu lassen.

### **2.2.4. Wärmetechnische Performance der Fenster**

#### **Wärmebrückensimulation**

Zum Zwecke der Optimierung der Fensterkonstruktionen, wurden diese anhand eines numerischen Wärmebrücken-Simulationstools (AnTherm – [www.antherm.eu](http://www.antherm.eu)) betrachtet und evaluiert. Landläufig wird unter numerischer Simulation eine computergestützte Simulation von natürlichen oder technischen Vorgängen mithilfe numerischer Näherungsverfahren verstanden. Im Bereich der Wärmebrücken spielen verschiedene Wärmetransportprozesse bzw. Temperaturverteilungen (sowohl

stationär wie auch instationär) eine große Rolle. Für die dabei vorkommenden Differentialgleichungen, welche die physikalische Realität in komplexen Baukonstruktionsdetails approximativ darstellen, kann mittels Simulationsprogrammen näherungsweise eine Lösung gefunden werden.

Die im Kapitel 3 gezeigten thermischen Simulationen sind Teil der iterativen Optimierung der Konstruktionsentwicklungen der im Projekt konzipierten Fenster mit Vakuumglas. Dabei entstanden rund 160 thermische Simulationen. Diese unterscheiden sich in ihrem Anspruch und Detaillierung. Einige sollen eine möglichst akkurate Annäherung der Konstruktionsdetails verkörpern und andere wiederum sind Teil von parametrischen Studien, die prinzipielle Funktionsweisen überprüfen sollen und daher eine geringere, weil nicht erforderliche Fein-Detaillierung aufweisen. Es wurde die Software AnTherm verwendet. Zur Validierung der Ergebnisse wurden zusätzlich Differenzklimauntersuchungen durchgeführt.

### Darstellung der Simulationen

Zur Veranschaulichung wird jede hier gezeigte Simulation überblickshaft in einer Tabelle zusammengefasst. Folgende Abbildung 8 zeigt beispielhaft, welche Informationen in dieser tabellarischen Form zu finden sind.

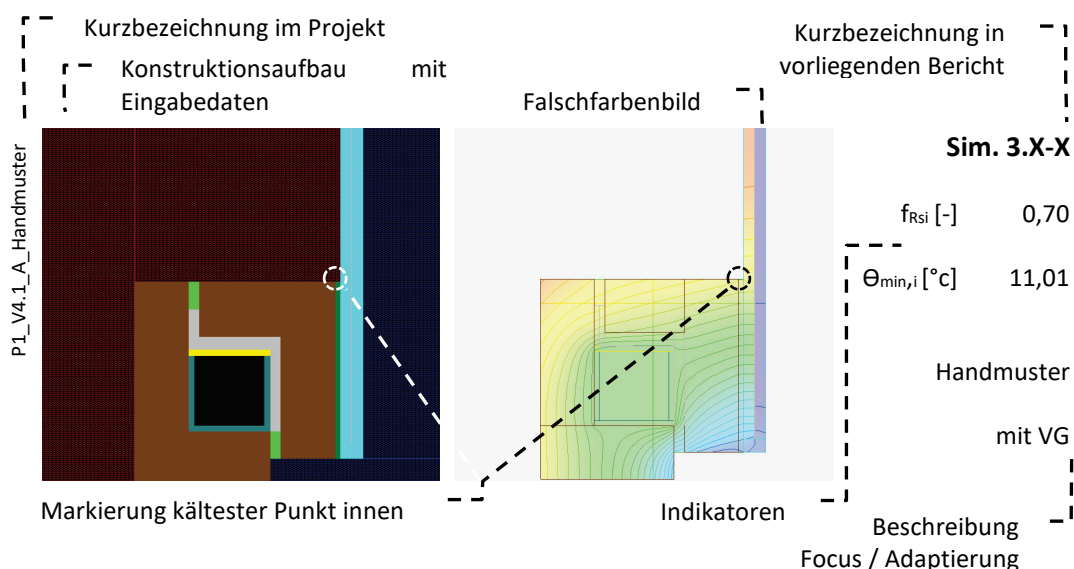


Abbildung 8: Darstellung der thermischen Simulationen – Beispiel (eigene Darstellung TU Wien / HFA, Konsortialführung)

Der Konstruktionsaufbau (in der Abbildung links) zeigt grundsätzlich, in welchem Verhältnis die Materialien zueinander positioniert sind. Jede Farbe beschreibt dabei ein Material und die dazugehörige Wärmeleitfähigkeit, diese sind im Kapitel 2.2.4 nachzulesen. Die grundsätzliche Konstruktion ergibt sich nicht nur aus der thermischen Charakteristik der Materialien, sondern auch aus konstruktionsbedingten Aspekten (Mindeststärken von Glas und Rahmen, Fräsungen und Taschen für Beschläge, etc.).

### U-Werteberechnung des Fensters

U-Werte von homogenen und inhomogenen opaken Konstruktionen berechnen sich nach EN ISO 6946. U-Werte von transparenten Konstruktionen berechnen sich dagegen nach abweichenden Standards: Die thermische Performance von Fenstern wird in der EN ISO 10077 Teil 1 und Teil 2 beschrieben. Es sei angemerkt, dass diese Normen noch nicht auf die Neuentwicklung Vakuumglas reagieren (und damit Berechnungsergebnisse unter Umständen nur beschränkte Aussagekraft haben).

Die prinzipiellen Ausführungen der ISO 10077-1:2017, S.24 setzen nachstehende Formel zu Berechnung des U-Wertes an:

$$U_W = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum l_g \Psi_g + \sum l_{gb} \Psi_{gb}}{A_f + A_g} \quad (1)$$

$U_g$  ... der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung

$U_f$  ... der Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens

$\Psi_g$  ... der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient infolge des kombinierten wärmetechnischen Einflusses von Glas, Abstandhalter und Rahmen

$\Psi_{gb}$  ... der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient infolge des kombinierten wärmetechnischen Einflusses von Glas und Sprosse → wird vernachlässigt

$l_g$  ... der äußere Gesamtumfang der Verglasung, ist die Summe der sichtbaren Umfangslängen der Glasscheiben innerhalb eines Fensters (ISO 10077-1:2017, S. 18)

Da die Vakuumglaskonstruktionen im Projekt FIVA in keiner Ausführung „klassischen“ Fenstern gleichkommen, eröffnen die Ausführungen der Norm einigen Spielraum zur Auslegung. Die Berechnungen erheben daher nicht den Anspruch einer normativ korrekten U-Wert-Berechnung, da dies mit bestehenden normativen Dokumenten und den erwähnten Unsicherheiten (sowie einiger Vakuumglasspezifika wie der thermischen Glaslängsleitung) für die Vakuumglasfenster kaum richtig durchführbar erscheint. Daher sind die Ergebnisse dieser U-Wert Berechnungen trotz gewissenhafter Durchführung nur als Richtwerte hinsichtlich der thermischen Performance der Fenster zu verstehen.

Die Normberechnung teilt das Fenster in zwei Bereiche, die Verglasung und den Rahmen, auf. Diese Differenzierung erweist sich bei den vier entwickelten Fensterkonstruktionen jedoch als schwierig. Bei allen vier Entwürfen überdeckt die Vakuumglasscheibe vollständig den Fensterflügel. Es stellt sich daher die Frage, wo sich der in der Berechnung anzunehmende Übergang von Rahmen zu Glasscheibe befinden soll. Der verfolgte Ansatz bezieht das Vakuumglas über die ganze Länge mit ein. Als „Rahmen“ bleibt lediglich der sichtbare Konstruktionsaufbau (bei diesen Entwürfen sind das Teile des Stockes), zwischen adiabatischer Grenze und Beginn der Vakuumglasscheibe, übrig.

Die Norm-Fensterbreite und -höhe beträgt 1,23 m auf 1,48 m. Der U-Wert der Verglasung ( $U_g$ ) wurde mit (i) 0,7 W/(m<sup>2</sup>K) und (ii) mit 0,4 W/(m<sup>2</sup>K) angenommen (dies orientiert sich an üblichen  $U_g$ -Angaben der Glashersteller).

Wie der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient infolge des kombinierten wärmetechnischen Einflusses von Glas, Abstandhalter und Rahmen (ISO 10077-1:2017, S.24), kurz  $\Psi_g$  (Psi) des Randverbunds, bei Vakuumglasscheiben zu berücksichtigen ist, wird in der Norm nicht eindeutig geklärt. Die U-Wert Berechnung der Vakuumglasscheibe nach der EN 673 vernachlässigt den Glasrandverbund (bestehend aus einem (Metall-)Glaslot). Für den  $\Psi_g$  des Randverbunds wurde demnach der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient für den 5 mm langen Glasrandverbund der Vakuumglasscheibe berechnet. Hierbei wurde der  $U_g$ -Wert eines 8,15 mm starken Floatglases mit dem Glasrandverbund multipliziert.

Die numerischen Ergebnisse der U-Wert Berechnungen zu den einzelnen Prototypen sind in Kapitel 3 Ergebnisse zu finden.

## Differenzklimauntersuchung

Diese Versuche dienten zur groben Validierung bzw. Kalibrierung der thermischen Simulationen. An unterschiedlichen Positionen wurden die Oberflächentemperaturen im Fensterfalz und an der raumseitigen Oberfläche ermittelt, die Kondensatbildung beobachtet und mit den Simulationsberechnungen verglichen.

Zu Beginn des Versuchs wurden sechs Temperatur-Messfühler an unterschiedlichen Positionen im Fenster positioniert (siehe Abbildung 9) und die Temperaturen kontinuierlich aufgezeichnet. Zusätzlich wurden raumseitige Oberflächentemperaturen mittels eines Infrarotmessgerätes periodisch ermittelt.

Da anstelle einer Vakuumglasscheibe eine VSG-Scheibe verbaut war, musste zur Erreichung eines adäquaten Wärmeschutzes die VSG-Scheibe mit zusätzlichen Dämmplatten versehen werden. Es wurden zwei unterschiedliche Varianten des Aufbaus getestet, einmal mit 5 cm Styropor auf der Außenseite des Glases und einmal auf der Innenseite des Glases.

Die Versuche wurden bei einer Außentemperatur von +15°C gestartet und nach jeweils einer Stunde um je 5K bis zu -10°C gesenkt. Nach einer Stunde bei -10°C wurden zusätzlich die Oberflächentemperatur an den raumseitigen Glasecken und an den Ecken des umlaufenden Metallprofils mittels Infrarotmessgerät gemessen. Das Raumklima betrug während der Versuche ca. 25°C und 47 % relative Luftfeuchtigkeit.

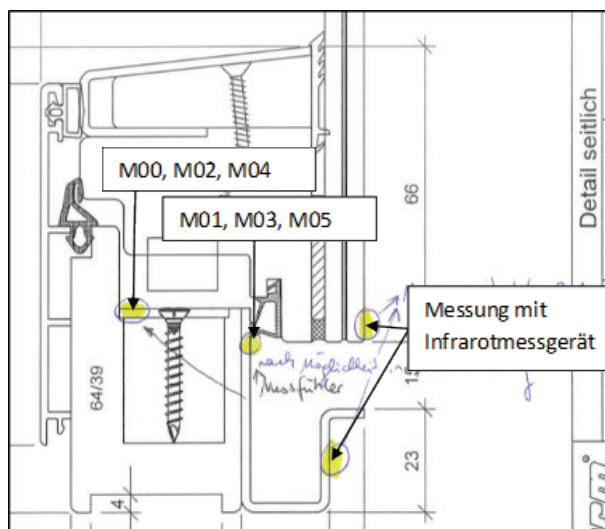


Abbildung 9: Position der Messfühler (Darstellung Projektkonsortium FIVA)

M00: linke Seite Beschlagsfalz ca. 2cm unter Verriegelungszapfen

M01: linke Seite bei Dichtung Flügel ca. auf Höhe von M00 in Schattenfuge

M02: unten in Beschlagsfalz ca. 2cm rechts neben linken Verriegelungszapfen

M03: unten bei Dichtung Flügel ca. auf Höhe von M02 in Schattenfuge

M04: rechte Seite Beschlagsfalz ca. 40cm (von unterem Ecklager)

M05: rechte Seite bei Dichtung Flügel ca. auf Höhe M04 in Schattenfuge

### **2.2.5. Schalltechnische Performance der Fenster**

**Präambel:** Um die generell hohe Qualität der im Projekt untersuchten Vakuumglasscheiben nicht durch einzelne, singuläre Kennwerte aus einer Domäne – Schallschutz – in einen trivialen Produktwettbewerb zu bringen (und damit als Ganzes falsch darzustellen), wurden die Hersteller der Vakuumgläser in dieser Sektion weitestgehend anonymisiert (z.B. „Hersteller 1“). Nichts desto trotz kann eine Herkunft der Gläser in der Tabelle 1 abgelesen werden.

#### **Messmethode und Prüfkörperbeschreibung:**

##### 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 baulich 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 jene Frequenzbereiche mit abzudecken, die normativ nicht betrachtet werden.

##### 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: Die Verglasungen wurden auf der Senderraumseite in die normierte Prüföffnung (Fensteröffnung) mit den Abmessungen (1500 × 1250) mm<sup>2</sup> eingebaut. Der Einbau erfolgte gemäß ÖNORM EN ISO 10140-1:2016, Anhang D.

#### **Aufbau und Systematik der untersuchten Prüfkörper:**

In diesem Abschnitt werden die untersuchten Prüfkörper angeführt und der Aufbau der Vakuumverglasungen dargestellt. Bis auf eine Ausnahme haben alle hier untersuchten Verglasungen eine Dimension von 1230 × 1480 mm<sup>2</sup>. Die Ausnahme erklärt sich wie folgt: Es wurden auch zwei Vakuumgläser mit einer Dimension von 500 × 1100 mm<sup>2</sup> gemessen. Diese stammen aus dem vorangegangenen Forschungsprojekt MOTIVE. Im Allgemeinen bestehen Vakuumgläser aus zwei vorgespannten Einzelglasscheiben mit einer Dicke von 3 mm bis 6 mm. Die Einzelglasscheiben werden mit Mikroabstandhaltern (Pillar) voneinander getrennt. Der Scheibenzwischenraum (SZR) beträgt 0,1 mm bis 0,5 mm. Am Rand wird ein vakuumdichter Randverbund angebracht, der die Scheiben zusammenhält. In einem dieser verwendeten Einzelgläsern ist eine Öffnung, über die der SZR evakuiert wird. Dabei stellt sich ein Restgasdruck im Bereich von  $< 10^{-4}$  Pa (Hochvakuum) ein. In dieser Öffnung wird ein sogenannter Getter (dabei handelt es sich um eine reaktive Substanz, die die letzten verbliebenen Partikel bei Aufprall binden soll) angebracht und diese ebenfalls gasdicht versiegelt. Abbildung 10 zeigt die grundlegende Erscheinungsform von Vakuumglas anhand eines der untersuchten Gläser.





Abbildung 10: Erscheinungsform von Vakuumglas: links Vakuumglas (4v4) Draufsicht, rechts Seitenansicht (Vakuumglas on einem der untersuchten Hersteller- Hersteller 1) (Abbildung: Eigene Photographie HFA)

In Tabelle 1 sind die untersuchten Vakuumverglasungen aufgelistet. Im ersten Schritt wurden diese angeführten Vakuumgläser im Prüfstand gemessen. Zu Vergleichszwecken wurden ausgewählte Einscheibengläser und Verbundgläser (VG) geprüft. Das Ziel war es, eine Einschätzung des Produktes vorzunehmen, um Vergleiche mit am Markt verfügbaren Scheibenaufbauten zu erhalten. Die verwendeten Kurzbezeichnungen solcher Scheibenaufbauten sind nachstehend angeführt:

- Einscheibenglas (EG)
- Mehrscheiben-Isolierglas (MIG)
- Verbundglas (VG) mit Unterteilung
  - Verbundsicherheitsglas (VSG)
  - Verbundsicherheitsglas mit akustischen Eigenschaften (VSGa)

Im zweiten Schritt wurden ausgewählte Vakuumscheiben (von einem der Hersteller - Hersteller 1 vgl. Tabelle 1) zu vorher definierten Zweischeiben-Vakuumisolierverglasungen (VIG) „veredelt“. Zum Vergleich wurden Zweischeiben-Isolierverglasungen (MIG) aus Einzelscheiben bzw. Verbundscheiben hergestellt (siehe

Tabelle 2). Dabei wurden Scheibenzwischenräume (SZR) vom 8 mm, 12 mm, 18 mm und 24 mm genutzt. Der Fokus bei dieser Untersuchung lag bei 8 mm und 18 mm. Die SZR in allen MIG und VIG waren mit Luft gefüllt. Für diese Verglasungen wurden ISO-Abstandhalter der Firma Technoform vom Typ „TGI-Spacer M“ in den oben genannten Dicken benutzt. Die Primärdichtung wird von einer Butylschnur übernommen. Die Sekundärdichtung ist ein PU-Material. Der Randverbund wird mit mindestens 4 mm umlaufend ausgeführt.

Zusätzlich wurden auf ausgewählte Vakuumverglasungen Einzelscheiben aufgespannt. Das heißt, es wurde auf die jeweilige Vakuumverglasung eine Einzelscheibe gelegt und mit Gewebband fixiert. Danach wurden diese Aufbauten mit ALCO Foldback-Klammern, 41 mm in einem Abstand von 119 mm am Rand befestigt. Diese Befestigung wurde dann nochmals mit Gewebband abgeklebt (siehe Abbildung 11). Dieses Zusammenspannen diente einer rein wissenschaftlichen Untersuchung zum Vergleich zu den laminierten Verglasungen und wird so in der Praxis nicht verwendet. Bei den untersuchten laminierten Systemen wurde bei den VSG- und VSGa-Aufbauten eine PVB-Folie (Polyvinylbutyral) verwendet. Für die VSG-Verglasungen hatte die PVB-Folie rein mechanische Eigenschaften und bei den VSGa-Verglasungen wurde eine Folie mit akustischen Eigenschaften

gewählt. Bei den Vakuumläsern mit zusätzlich laminiertem EG wurde eine EVA-Folie (elastische Polymerfolie) verwendet, die auch akustische Eigenschaften aufweist. Diese Aufbauten sind in

Tabelle 1 und

Tabelle 2 angeführt und verwenden die folgenden Kurzbezeichnungen:

- Zweiseiben-Vakuumisolierverglasungen (VIG)
- Zweiseiben-Isolierverglasungen (MIG)
- Zusammengespannte Verglasungen (+)
- Laminierte Verglasungen (L)



Abbildung 11: Aufbau der zusammengespannten Verglasungen (in diesem Fall 4v4+4) (Eigene Fotos HFA)

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Vakuumverglasungen, die direkt vom Hersteller geliefert wurden (eigene Aufstellung HFA)

Verglasung (Benennung)	Typ	Pillar- abstand in mm	Anzahl	Hersteller / Lieferrand P	Flächenmasse (Mittelwert) in kg/m <sup>2</sup>
4v4* P1	Vakuumglas symmetrisch (*mit verringerter Prüfkörpergröße)	40 × 40	2	1 (China, Synergy)	19,4
3v3 P2	Vakuumglas symmetrisch	30 × 30	2		15,3
4v4 P2	Vakuumglas symmetrisch		10		19,4
5v5 P2	Vakuumglas symmetrisch		2	2 (Korea Eagon)	23,7
4v6 P2	Vakuumglas asymmetrisch	40 × 40	4		24,0
6v6 P2	Vakuumglas symmetrisch		2		28,7
5v8 P2	Vakuumglas asymmetrisch		2		30,5
4v4 P3	Vakuumglas symmetrisch	40 × 40	3	3 (USA, Guardian)	19,4
4v4 P4	Vakuumglas symmetrisch		1		19,4
4v4L3 P4	Vakuumglas laminiert mit EG (L)		1		27,1
4v4L4 P4	Vakuumglas laminiert mit EG (L)	20 × 20	2	4 (Belgien, AGC)	29,7
3L4v4L3 P4	Vakuumglas zweimal laminiert mit EG (L)		1		37,3

Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Einscheibengläser (EG), Verbundgläser (VG), Mehrscheiben-Isoliergläser (MIG) und Vakuum-Isoliergläser (VIG) (eigene Aufstellung HFA)

Verglasung (Benennung)	SZR	Typ	Hersteller / Lieferrand	Flächenmasse
	in mm		P	in kg/m <sup>2</sup>
3	--	EG	Internorm	7,0
4	--	EG	Internorm	9,7
5	--	EG	Petschenig	12,1
6	--	EG	Internorm	14,6
8	--	EG	Internorm	19,4
44.2 VSG	--	VG (VSG) symmetrisch	Internorm	19,8
44.2 VSGa	--	VG (VSGa) symmetrisch	Internorm	20,4
46.2 VSGa	--	VG (VSGa) asymmetrisch	Petschenig	24,8
58.2 VSGa	--	VG (VSGa) asymmetrisch	Petschenig	32,4
4-18-4	18	(Zweischeiben) MIG	Internorm	19,8
8+4	--	(Zweischeiben) MIG aufgespannt (+)	HFA	28,4
8-8-4	8	(Zweischeiben) MIG	Internorm	29,4
8-12-4	12	(Zweischeiben) MIG	Internorm	29,9
8-18-4	18	(Zweischeiben) MIG	Internorm	29,6
8-22-4	22	(Zweischeiben) MIG	Internorm	30,2
8-18-44.2 VSG	18	(Zweischeiben) MIG	Internorm	39,8
8-18-44.2 VSGa	18	(Zweischeiben) MIG	Internorm	40,0
4v4+4 P2	--	(Zweischeiben) VIG aufgespannt (+)	(2) & HFA	30,4
4v4+6 P2	--	(Zweischeiben) VIG aufgespannt (+)	(2) & HFA	34,3
4v4+44.2 VSGa P2	--	(Zweischeiben) VIG aufgespannt (+)	(2) & HFA	38,2
4v4-8-4 P2	8	(Zweischeiben) VIG	(2) & Internorm	29,3
4v4-18-4 P2	18	(Zweischeiben) VIG	(2) & Internorm	28,4
4v4-18-44.2 VSG P2	18	(Zweischeiben) VIG	(2) & Internorm	39,8
4v4-18-44.2 VSGa P2	18	(Zweischeiben) VIG	(2) & Internorm	39,9

### 2.2.6. Gebrauchstauglichkeit

Zur Ermittlung der Gebrauchstauglichkeit wurden die wesentlichen Anforderungen an Fenster gemäß EN 14351-1 und des OIBs herangezogen. Dabei handelt es sich um die Luftdurchlässigkeit, die Schlagregendichtheit und die Windwiderstandsfähigkeit des Fensters sowie um den Wärme- und Schallschutz.

Die **Luftdurchlässigkeit** wurde gemäß EN 1026 bis  $\pm 600$  Pa getestet. Durch das Aufbringen einer bestimmten Anzahl von Druckstufen (positiv und negativ d.h. Winddruck und -sog) und parallel bei jedem Prüfdruck erfolgende Messungen der Luftdurchlässigkeit mit einer hochpräzisen Messeinrichtung wurde der Luftverlust bezogen auf die Fensterfläche und die Fugenlänge bestimmt. Das Ergebnis wurde gemäß EN 12207 klassifiziert und in vier Klassen eingeteilt (Klasse 4 ist die beste Klasse).

Die **Schlagregendichtheit** wurde gemäß EN 1027 getestet. Methode A stellt eine Einbausituation mit direkter Bewitterung dar, Methode B in teilgeschützter Lage (der obere Bereich des Fensters ist durch die Leibung geschützt und wird nicht beregnet). Durch dauerndes Besprühen der Außenseite des Probekörpers mit einer definierten Wassermenge, wobei gleichzeitig positiver Prüfdruck (Winddruck) in Form aufeinanderfolgender, ansteigender Druckstufen in gleichmäßigen Abständen aufgebracht wird, wurde die Schlagregendichtheit bestimmt. Einzelheiten zum Prüfdruck und zum Ort des Wassereintritts wurden dabei exakt dokumentiert. Das Ergebnis wurde gemäß EN 12208 klassifiziert und in neun Klassen eingeteilt (Klasse 9 ist dabei die am besten abschneidende Klasse) und um den Buchstaben der Berechnungsmethode ergänzt.

*Tabelle 3: Klassifizierung der Schlagregendichtheit (vgl. EN 1027 und EN12208)*

Prüfdruck $P_{\max}$ in Pa	Klassifizierung		Anforderungen
	Prüfverfahren A	Prüfverfahren B	
-	0	0	Keine Anforderung
0	1A	1B	15 min Besprühung
50	2A	2B	Wie Klasse 1 + 5 min
100	3A	3B	Wie Klasse 2 + 5 min
150	4A	4B	Wie Klasse 3 + 5 min
200	5A	5B	Wie Klasse 4 + 5 min
250	6A	6B	Wie Klasse 5 + 5 min
300	7A	7B	Wie Klasse 6 + 5 min
450	8A	-	Wie Klasse 7 + 5 min
600	9A	-	Wie Klasse 8 + 5 min

Die **Windwiderstandsfähigkeit** wurde gemäß EN 12211 getestet. Die Untersuchungen zur Windwiderstandsfähigkeit bestehen aus folgenden drei Teilen:

Prüfdruck P1 - Bestimmung der Durchbiegung – zur Messung der Durchbiegung von Probekörperteilen. Für die Klassifizierung ausschlaggebend ist die relative frontale Durchbiegung des am stärksten verformten Rahmenteils des Probekörpers.

Prüfdruck P2 – Untersuchung bei wiederholtem Druck – stoßweiser Druck (abwechselnd positiv und negativ), aufgebracht in 50 Zyklen zur Einschätzung des Leistungsvermögens unter wiederholten Windlasten (Windböen).

Prüfdruck P3 - Sicherheitsprüfung – zur Einschätzung der Sicherheit des Probekörpers unter extremen Bedingungen.

Zur Klassifizierung des Probekörpers werden, je nach Teilprüfung (P1, P2, P3), Anforderungen an die Durchbiegung, an die Luftdurchlässigkeit nach Windlast sowie bezüglich etwaiger Mängel (z. B. Schäden, Funktionsstörungen) gestellt.

Tabelle 4: Klassifizierung der Windlast (gemäß EN 12211)

Klasse	P1 [Pa]	P2 [Pa]	P3 [Pa]
1	400	200	800
2	800	400	1200
3	1200	600	1800
4	1600	800	2400
5	2000	1000	3000

Tabelle 5: Klassifizierung der relativen frontalen Durchbiegung (gemäß EN 12211)

Klasse	Relative frontale Durchbiegung
A	$\leq 1 / 150$
B	$\leq 1 / 200$
C	$\leq 1 / 300$

Weitere Details dazu können den jeweiligen Normen entnommen werden.

### 2.2.7. Nutzerspezifische Aspekte

Im Projekt wurden innovative, unkonventionelle Fenstertypen zu vier Funktionsprototypen-Versionen entwickelt. Die zum Teil revolutionären Bauarten, verglichen mit heute gebräuchlichen Fenstern, müssen wesentliche nutzungsrelevante Aspekte berücksichtigen („Was nützt die tollste technologische Entwicklung, wenn Planer oder Endkonsumenten diese nicht akzeptieren?“). In diesem Sinne wurden nicht unmittelbar technische Aspekte, welche allerdings für die Akzeptanz der geplanten Funktionsprototypen notwendig sind, behandelt. Dazu gehören Aspekte wie Optik und Architektur, Bewertungen zum Innovationsgehalt, die technische Realisierbarkeit und Montierbarkeit. Auch Fragen zur Kundenakzeptanz und zum Bedienkomfort wurden behandelt. Letztlich spielen auch Aspekte wie die systemische Integration von Sonnenschutz sowie die Akzeptanz von Seiten der Architekturschaffenden hinsichtlich ästhetischer und technischer Integration in Architekturplanung eine Rolle.

Zu diesem Zweck erfolgten eine Befragung von MitarbeiterInnen der verschiedenen Projektpartner, welche allerdings nicht im Projekt involviert waren, ein Einbinden der Marketing- und Vertriebsbereiche der beteiligten Wirtschaftspartner sowie Stakeholder-Befragungen mit potenziellen Interessentengruppen. In Form eines Fragebogens wurden die einzelnen Aspekte (Optik und Architektur, Zeitgemäßheit, Innovationsgehalt, Technische Realisierbarkeit, Montierbarkeit, Bedienkomfort, Kundenakzeptanz) abgefragt und von den Befragten bewertet. Darüber hinaus wurden die vier Prototypen am 5. und 6. März 2020 im Rahmen einer Sonderschau am Fenster-Türen-Treff der Fachöffentlichkeit präsentiert und von dieser bewertet.

### 3. Ergebnisse

Ursprünglich waren im Forschungsantrag zwei bis drei Prototypen geplant. Im Rahmen des Projekts entstand im Projektteam eine große Dynamik, so dass letztendlich vier voll funktionstüchtige Prototypen bearbeitet, entwickelt und gebaut, sowie an einem weiteren Muster spezielle Dichtungssysteme getestet wurden.

#### 3.1. Prototyp A - Raumseitig flächenbündiges, nach innen öffnendes Dreh-Fenster

Das nach innen öffnende Fenster hat sich weltweit millionenfach bewährt und bildet für den zentraleuropäischen Raum den (aktuellen) Stand der Technik ab. In den 1960er Jahren wurde das nach innen öffnende Fenster mit Isolierverglasung entwickelt. Heute wird es überwiegend mit Dreh-Kippbeschlägen ausgeführt und ist mit allen Flügel- und Rahmenmaterialien (Holz, Holz-Alu, Kunststoff, Kunststoff-Alu und Aluminium) erhältlich.

Der Entwurf von Prototyp A hat zum Ziel, dieses handelsübliche, bei NutzerInnen weithin akzeptierte und verbreitete Fenster, mit Vakuumglas zeitgemäß und innovativ zu adaptieren. Damit kann ein übliches, vertrautes Produkt für die Einführung des Vakuumglases herangezogen werden, was unbestreitbar Vorteile bei der Endkundenakzeptanz bedeuten würde.

Im vorausgehenden Sondierungs-Forschungsprojekt MOTIVE entstand durch die zwei Entwicklungs-Vorgaben (i) schlanke Geometrien und (ii) ausreichender Glaseinstand der innovative Ansatz, die Vakuumglasscheibe gänzlich innen zu platzieren. Dies sollte möglichst flächenbündig erfolgen, um eine architektonisch attraktive Ganzglasoptik in der Innenansicht zu erreichen (vgl. hierzu Pont et al. 2017, S.38).

Was bei dem Vorprojekt MOTIVE noch nicht möglich war, wurde hier in einem Prototyp realisiert: Ein innen-öffnendes Fenster mit Vakuumglas und Ganzglasoptik. Die Beschlagstechnik der Fa. Maco ermöglicht ein motorisiertes Öffnen und garantiert so eine ungestörte Glasansicht (keine Griffschale notwendig). Durch die am Stock montierte Anputzleiste wird die thermische Performance entscheidend verbessert, ein sauberes Verputzen ermöglicht und damit das Erreichen der Flächenbündigkeit erleichtert (und lässt das Fenster innen rahmenlos erscheinen).

Das Fenster wird dadurch innen optisch auf eine Glasscheibe mit emaillierten Rand und Schattenfuge reduziert. Aus architektonisch-ästhetischer Sicht hat dieses Fenster innen eine in der Architekturpraxis noch selten gesehene Erscheinung bei gleichzeitig sehr guter Performance. Bedingt durch die schlanken Rahmenquerschnitte und die Flächenbündigkeit innen, ist selbst bei geringen Wandstärken genügend Platz in der Leibung, um einen Sonnenschutz vor das Fenster zu setzen.

Das innen-öffnende Fenster bedient sich innovativer Elemente, hält sich aber hinsichtlich Öffnungsrichtung dennoch recht nahe an die „gewohnten“ Fenstertraditionen in Mitteleuropa. Bei diesem Fenster ist es gelungen, das „klassische“ Fenster so zu adaptieren, dass es wiedererkennbar ist, aber dennoch eine zeitgemäße Optik besitzt.

### 3.1.1. Schlussentwurf

Das Fenster besitzt raumseitig eine Ganzglasoptik und schließt innen flächenbündig an die Wand an. Es hat keine vorspringenden Bedienelemente. Durch Ansteuerung von integrierten Motoren wird der Flügel entriegelt und mittels eines Abstellmodules auf einer Seite 60 mm geöffnet (Lüftungsstellung). Die Öffnungsfunktion gibt das Fenster frei, welches dann manuell durch die voll verdeckt liegenden Ecklager bis zu 90° geöffnet werden kann. Zum Schließen wird der Flügel händisch an das Abstellmodul angedockt und anschließend motorisch geschlossen und verriegelt.

Die außenliegende Verschattung durch einen Zip-Stoffstore ist auch bei geöffnetem Fenster funktionstüchtig, somit ist der Sonnenschutz auch in der Lüftungsstellung gewährleistet. Der Zip-Stoffstore hält darüber hinaus Windgeschwindigkeiten im geöffneten Zustand bis zu 80 km/h und im geschlossenen Zustand bis zu 130 km/h stand.

Umsetzung:	Fa. Wicknorm
Rahmen:	Fichtenholz
Dichtung:	Überschlag- und Falzdichtung
Beschlag:	Maco 2 Ecklager Multi Power Maco 1 Abstellmodul Maco 4 Verriegelungsmodule
Glas:	8 mm VSG bzw. 8 mm VG ( $U_g$ 0,7 – 0,4 W/(m <sup>2</sup> K)) bzw. x mm Isolierglas mit tragendem Randverbund
Verschattung:	ZIP-Store Kosmos FIXSCREEN®
Lüftung:	60 mm seitliches motorisches Abstellen 90° öffnen durch händisches Drehen



Abbildung 12: Prototyp A: Abstellmodul für Lüftungsstellung und zum Öffnen (freigeben) des Fensters (Eigenes Foto des Projektkonsortiums)



Abbildung 13: Prototyp A: Links, Innenansicht; Mitte, Flächenbündigkeit; Rechts, Außenansicht (Eigene Fotos des Projektkonsortiums)

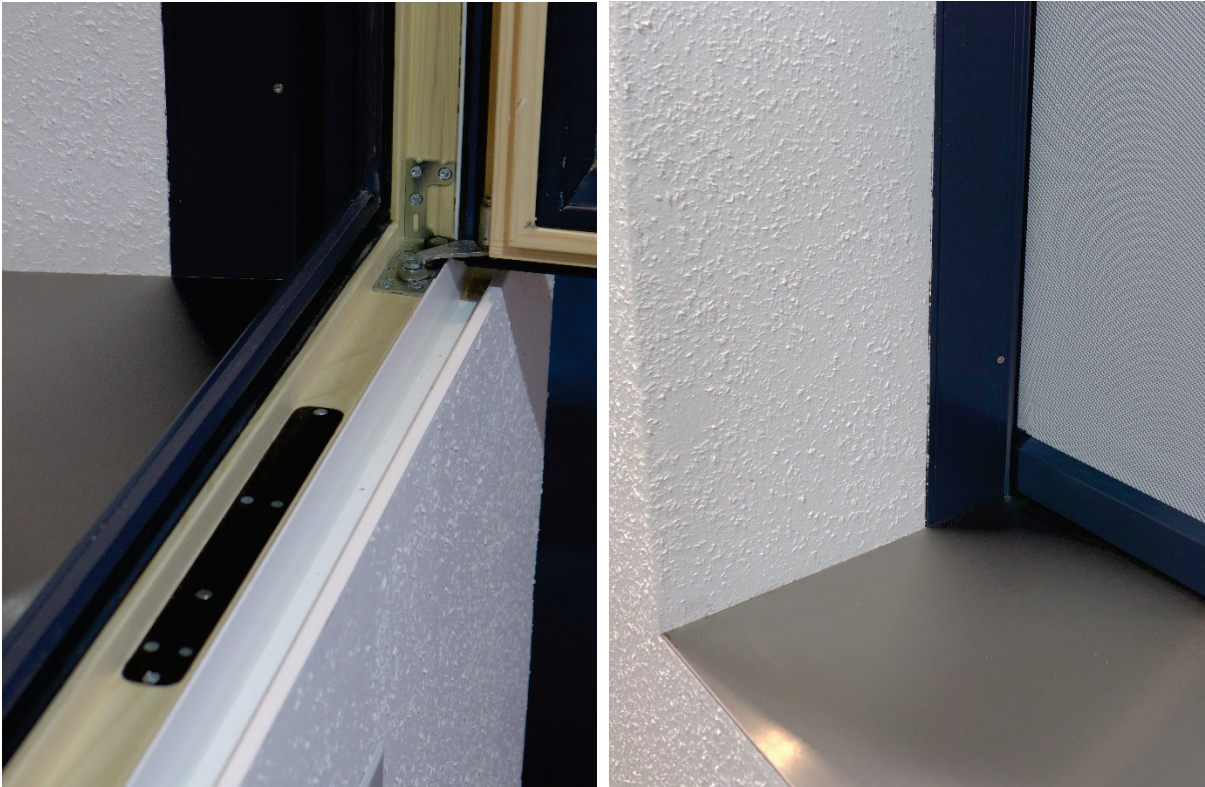


Abbildung 14: Prototyp A: Links, Verschlussmodul und Ecklager; Rechts, Außenansicht mit ZIP-Store als Sonnenschutz (Eigene Fotos des Projektkonsortiums)



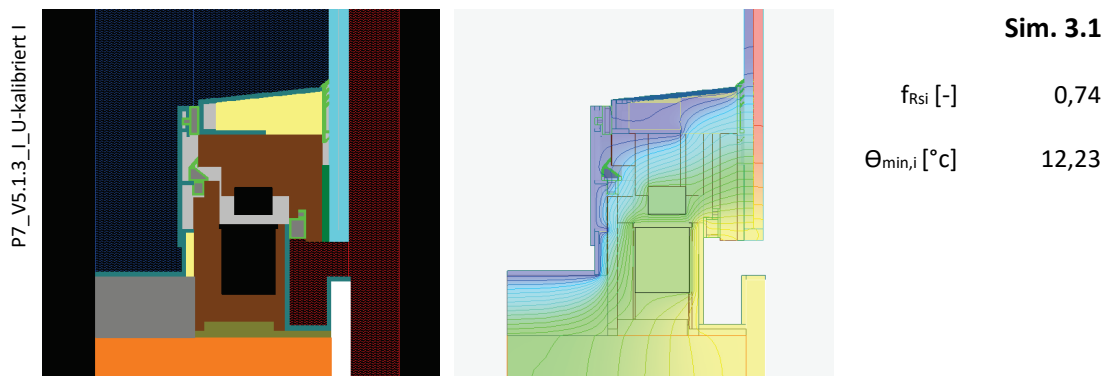
### 3.1.2. Performance in Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit

Die Untersuchungen des Fensterelements ergeben in der beschriebenen Ausführung folgende Ergebnisse:

- Luftdurchlässigkeit = 3
- Schlagregendichtheit = 3A/5B
- Windwiderstandsfähigkeit = C2
- Luftdurchlässigkeit nach Wind = 3
- Bei  $U_g 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) = U_w 0,91 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Bei  $U_g 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) = U_w 0,71 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Schallschutz siehe Kapitel 3.7

Das Verhalten des Fensters in einer üblichen Einbausituation inklusive Putz und Wandanschluss wurde simulationstechnisch ebenfalls untersucht (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Prototyp A - Sim. 3.1



Die Ergebnisse der Luftdurchlässigkeit und der Windwiderstandsfähigkeit könnten durch eine Verstärkung des Flügelrahmens und passgenaueren Beschlagsteile weiter verbessert werden. Die guten Ergebnisse der Schlagregendichtheit bei teilgeschützter Einbaulage könnten durch optimierte Dichtungstypen und/oder der Erhöhung des Anpressdrucks durch die Antriebstechnik noch weiter verbessert werden.

Insgesamt zeigt der Prototyp bereits eine gute Gebrauchstauglichkeit und kann mit geringem Aufwand zur Serienreife weiterentwickelt werden.

### 3.2. Prototyp B - Nach außen öffnendes Parallel-Abstell-Dreh-Fenster

Im Gegensatz zum innen-öffnenden Fenster ist das außen-öffnende Fenster in Zentraleuropa wenig verbreitet. Historisch gab es bei Kastenfenstern die Alt-Wiener bzw. Grazer Kastenfenster, deren Außenflügel nach außen aufschlugen. Durch die erschwerte Möglichkeit der Reinigung und der schwierigen Integration eines außenliegenden Sonnenschutzes bei solchen Fenstern wird die Konstruktionsart mit nach außen aufschwingenden Fenstern oftmals als nachteilig betrachtet und ist dementsprechend wenig am Markt vorzufinden. In anderen Regionen der Welt, vor allem in Skandinavien, sind solche Fenster aber weitverbreitet. In Skandinavien spielt der Sonnenschutz eine vergleichsweise geringere Rolle. Andere Aspekte wie die Schlagregendichtheit oder die Stabilität gegen Winddruck sind hier wesentlicher, welche zum Teil von nach außen-öffnenden Fenstern sehr gut erfüllt werden.

Wie bei dem nach innen-öffnenden Fenster wurde auch bei dieser Öffnungsrichtung im Forschungsprojekt MOTIVE ein Konzept mit einer Ganzglasoptik erarbeitet. In diesem Fall bedeckt das Glas die ganze Flügelansichtsbreite nach außen. Aus architektonischer Sicht ist auch die Innenansicht reizvoll. Wenn das Fenster leibungsbündig ausgeführt wird, wird die Leibungslichte zu der Stocklichte, der Flügellichte und der Glaslichte angeglichen. Der Blick nach außen erscheint demnach ganz „frei“, bzw. sehr minimalistisch gerahmt (Pont et al. 2017, S.39).

Bei diesem Prototyp kommen einige klassische Elemente zum Einsatz. Neben den Dichtungen und dem Raffstore als Sonnenschutz ist auch die Montage vor dem Wandbildner eine gängige Methode.

Neu hingegen ist die zum Einsatz kommende Beschlagstechnik von der Fa. Maco (siehe Abbildung 15). Der motorisierte Antrieb ermöglicht neben dem klassischen Öffnen durch Drehen auch ein sogenanntes „Abstellen“. Dabei fährt das Fenster um die 60 mm nach außen und gibt so einen umlaufenden Lüftungsschlitz frei. Das Fenster kann in diesem Zustand weiterhin weitestgehend einbruchshemmend bleiben, bietet aber die vielfach begehrte Lüftungsfunktion (z.B. zur Ent-/Ablüftung von Feuchtigkeit oder Kohlendioxid).

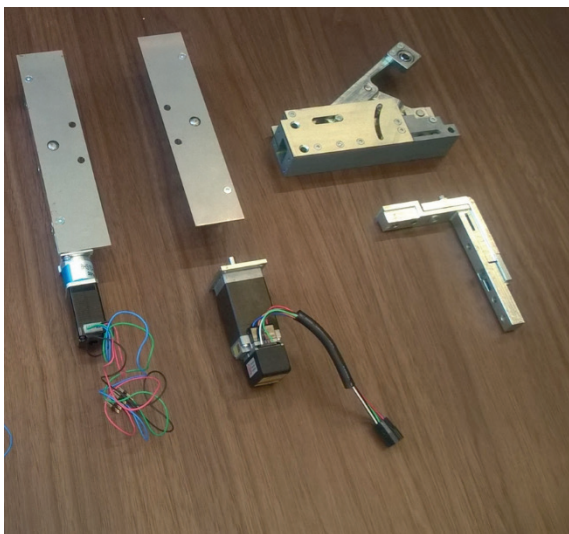


Abbildung 15: Mechatronische Beschlagkomponenten (eigenes Foto Projektconsortium FIVA)

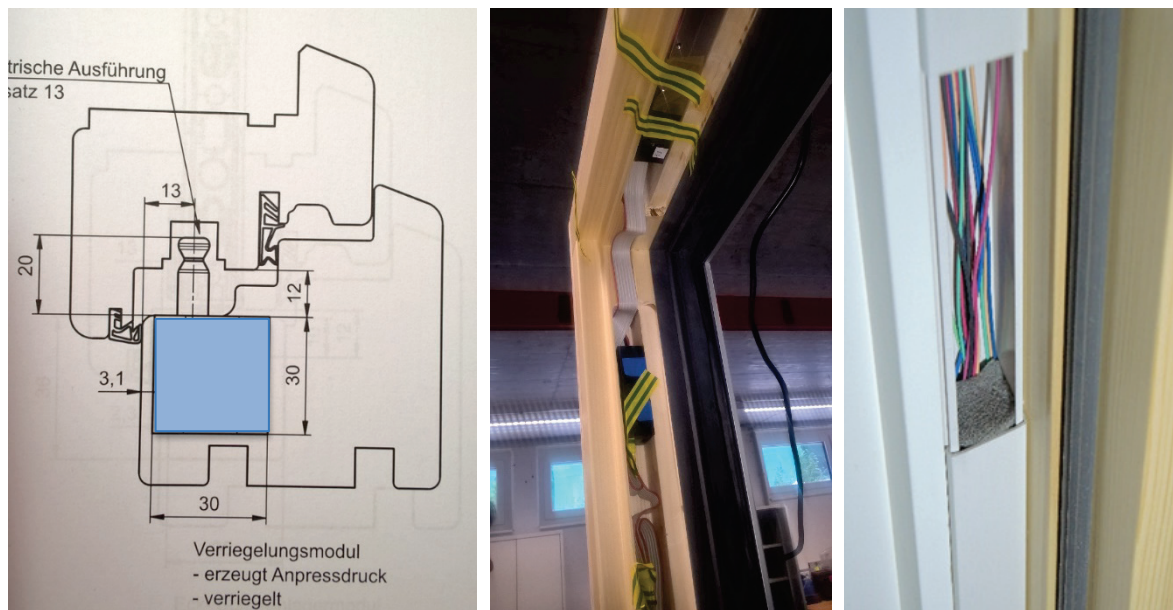


Abbildung 16: Prototyp B: Links, Zeichnung des Platzbedarfes für mechatronische Beschläge; Mitte, Ausführung der Fräsung für mechatronische Beschläge; Rechts, „Kabelkanal“ für mechatronische Beschläge (eigene Fotos des Projektkonsortiums FIVA)

Die Integration der Beschlagkomponenten in den Stockrahmen erfordert einen größeren Platzbedarf, der im Konzept berücksichtigt wurde. Letztendlich wurde diese Nut vierseitig geführt, für die Verkabelung genutzt und als Kabelkanal ausgeführt (siehe Abbildung 16).

Die Integration eines Sonnenschutzes war mit der ursprünglichen Beschlagstechnik des Vorprojekts MOTIVE nicht möglich. Durch die neue Abstellfunktion ist es nun möglich zu lüften und gleichzeitig zu verschatten. Eine solche Kombination kann in Zeiten wärmer werdender Sommer interessant sein. Die Glasscheibe und somit den Innenraum vor sommerlicher Überhitzung zu schützen, war ein wichtiger Schritt, diese Fensterkonstruktion näher an die Markttauglichkeit heran zu führen.

Die neue Beschlagstechnik begünstigt auch die Realisierung von großformatigen Ausführungen dieser Konstruktion. Eine händische Bedienung von Fensterflügel, die sich nach außen öffnen, wird ab einer gewissen Fensterbreite nicht mehr praktikabel sein: Einerseits, weil die Bedienungselemente des nach außen geöffneten Fensters nur mehr schwer von Hand erreichbar sind und andererseits, weil durch das Gewicht der Flügel selbst und durch den Winddruck eine Bedienung zu schwer wird. Auch das Thema „Sicherung gegen Windschlag“ spielt bei diesen Prototypen eine große Rolle.

Ein motorisierter Beschlag benötigt, abgesehen von einem kleinen Taster, keine sichtbaren Elemente in der Innenleibung. Die optische Erscheinung einer vollkommen geradlinigen Lichte wird so nicht von einer Griffolive gestört. Die Kombination aus Vakuumglasscheibe, Vorwandmontage und ebener Innenleibung verleihen dem Fenster eine stark reduzierte und klare, architektonisch ansprechende Optik.

Obwohl in Mitteleuropa im Gegensatz zu Skandinavien nach außen-öffnende Fenster keine Verbreitung finden, ist es durchaus interessant, diesen hier erprobten Ansatz weiter auf seine Markttauglichkeit zu testen, da bei diesem Entwurf die Eigenschaften von Vakuumglas sehr gut ausgenutzt werden. Mit dieser Konstruktion ist es gelungen, ein funktionstüchtiges Fenster mit Vakuumglas neu zu konzipieren.

### 3.2.1. Schlussentwurf

Hierbei handelt es sich um ein in die Leibung integriertes Fenster mit mechatronischen Beschlagskomponenten. Nach Entriegelung des Flügels wird dieser durch die beiden Ecklagermodule und das Abstellmodul vierseitig um etwa 60 mm parallel nach außen abgestellt (Lüftungsstellung). Die Öffnungsfunktion gibt den Flügel frei, somit kann das Fenster manuell, angeschlagen an den Ecklagermodulen, um 90° nach außen gedreht werden. Zum Schließen wird der Flügel händisch an das Abstellmodul angedockt und anschließend motorisch geschlossen und verriegelt. Durch die außen am Flügelrahmen montierte Scheibe sowie die Integration des Stockrahmens in die Wand ergibt sich innen eine architektonisch ansprechende, reduzierte Optik, bei welcher der Eindruck einer reduzierten Lochfassade entsteht (Leibungslichte = Stocklichte = Flügellichte = Glaslichte). Zweifelsfrei wird damit das Fenster für bestimmte architektonische Formen- und Ausdruckssprachen interessant.

Die außenliegende Verschattung ist durch einen Raffstore so angeordnet, dass diese auch in der Lüftungsstellung des Fensters (d.h. 60 mm parallel abgestellt) funktionstüchtig bleibt und damit Lüftung bei geschlossener Verschattung ermöglicht.

Umsetzung:	Fa. Svoboda
Rahmen:	Fichtenholz mit Kabelkanal
Dichtung:	Überschlag- und Falzdichtung
Beschlag:	Maco 2 Ecklagermodule Maco 1 Abstellmodul Maco 2 Verriegelungsmodule
Glas:	8 mm VSG bzw. 8 mm VG (Ug 0,7 – 0,4 W/(m <sup>2</sup> K)) bzw. x mm Isolierglas mit tragendem Randverbund
Verschattung:	Raffstore
Lüftung:	60 mm motorisches Abstellen 90° öffnen durch händisches Drehen



Abbildung 17: Prototyp B: Links, Außenansicht; Mitte, Ganzglasoptik; Rechts, Lüftungsstellung und Sonnenschutz (eigene Fotos des Projektkonsortiums FIVA)



Abbildung 18: Prototyp B: Links, Verriegelungsmodul; Mitte, Eckmodul; Rechts, Kabelkanal (eigene Fotos des Projektkonsortiums FIVA)

### 3.2.2. Performance in Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit

Die Untersuchungen der Fensterelemente ergeben in der beschriebenen Ausführung folgende Ergebnisse:

- Luftdurchlässigkeit = 2
- Schlagregendichtheit = 0A/2B
- Windwiderstandsfähigkeit = C2
- Luftdurchlässigkeit nach Wind = 2
- Bei  $U_g$  0,7 W/(m<sup>2</sup>K) =  $U_w$  0,85 W/(m<sup>2</sup>K)
- Bei  $U_g$  0,4 W/(m<sup>2</sup>K) =  $U_w$  0,66 W/(m<sup>2</sup>K)
- Schallschutz siehe Kapitel 3.7

Das Verhalten des Fensters in einer üblichen Einbausituation inklusive Putz und Wandanschluss wurde simulationstechnisch ebenfalls untersucht (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Prototyp B - Sim. 3.2 (Darstellungen basierend auf eigenen Simulationen)



Die Ergebnisse der Luftdurchlässigkeit und Windwiderstandsfähigkeit könnten durch eine Optimierung der Rahmentoleranzen und Dichtungen sowie einer Verstärkung des Flügelrahmens und der Schließteile wesentlich verbessert werden. Die Ergebnisse der Schlagregendichtheit können durch einen Optimierung Dichtungstyp und/oder der Erhöhung des Anpressdrucks durch die Antriebstechnik verbessert werden.

Insgesamt zeigt der Prototyp eine Gebrauchstauglichkeit, die mit entsprechenden Detailoptimierungen bis zur Serienreife weiterentwickelt werden kann.

### 3.3. Prototyp C - Schwing-Klapp-Fenster

Auf der Suche nach unüblichen bzw. außergewöhnlichen Ansätzen wurden im vorrausgehenden Sondierungs-Projekt MOTIVE auch andere Bauelemente untersucht, die eine Funktion des Öffnens und Schließens aufweisen und als potentielle Inspiration für innovative Fenster generell und für Vakuumglasfenster im speziellen dienen können. Neben anderen Konzepten wurden so die gefederten Schwing-Klapp-Garagentore aus den 60er und 70er Jahren als potentielle Inspiration für innovative Fenster herangezogen.

Bei dem Schwing-Klappfenster schwenken der obere Teil sowie der untere Teil des Flügels über einen definierten, seitlichen Drehpunkt nach innen bzw. nach außen. Wie schon im dem Vorprojekt MOTIVE wurden die Anforderungen an diesen relativ komplexen Bewegungsablauf genauestens studiert. Abbildung 19 zeigt das Prinzip der Öffnungsbewegung. Diese beruht auf der Führung des Flügels über den Drehachsenpunkt sowie gleichzeitigem Anhebens desselben. Eine bestimmende Konstruktionsprämisse hierbei ist, dass der Flügel beim Öffnen die NutzerInnen nicht „umfährt“, bzw. keine Gefährdung der NutzerInnen durch unkontrollierte Flügelbewegungen bestehen.

Aspekte wie Beschlags- und Verriegelungstechnik oder auch Sicherheitsanforderungen, welche in der Sondierung MOTIVE nur angerissen werden konnten, wurden im Projekt FIVA von den Projektpartnern parallel zu den Konstruktionsentwicklungen geplant, bearbeitet und prinzipiell gelöst.

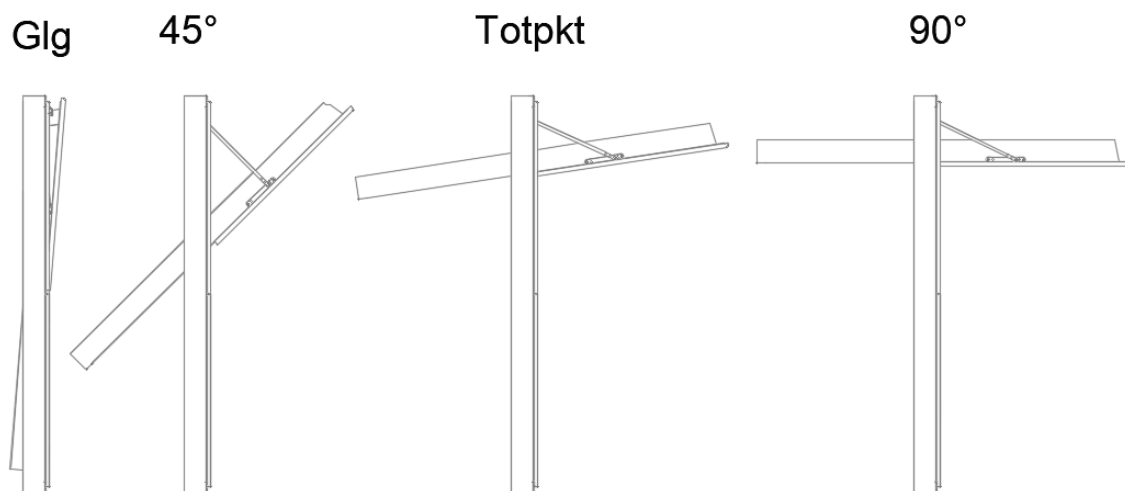


Abbildung 19: Bewegungsstudie (eigene Darstellung Projektkonsortium FIVA)

Die Konstruktion zeigt einfache Beschlagkomponenten und durch das Anheben des Flügels beim Öffnen sind keine beweglichen Verriegelungen notwendig. Der Drehpunkt der Schwingachse wird beim Schließen abgedeckt.

Dieser innovative Entwurf mag eine ungewohnte Öffnungsbewegung aufweisen, die jedoch eine ganze Reihe von funktionellen Vorteilen bietet: Durch das Kippen in der horizontalen Achse wird links und rechts kein Platz für das Öffnen benötigt und die Reinigung der Glasscheibe ist weitestgehend unproblematisch auf beiden Seiten möglich. Das geringe Gewicht und der geringe Querschnitt von Vakuumglas vereinfachen und begünstigen die Realisierung eines Fensters mit einem solchen Mechanismus. Es kann daher gesagt werden, dass sich das Schwing-Klappfenster die Vorteile von Vakuumglas zu eigen macht, bzw. durch dieses erst in einer realistischen Form möglich wird.

### 3.3.1. Schlussentwurf

Bei diesem Prototyp handelt es sich um ein in der Leibung sitzendes Fenster, welches ohne sich bewegende Schließteile zur Verriegelung auskommt. Zum Öffnen wird der Flügel motorisch 10 mm angehoben (entriegelt) und an der Oberseite über eine Kulisse nach innen geführt. Die so eingeleitete Schwing-Klapp Bewegung wird durch einen Spindeltrieb und eine Schere bis zu einer etwa 85° Öffnung fortgesetzt. Der Flügel kann in jeder Stellung angehalten werden und bietet damit ein breites Spektrum an Lüftungs- und Öffnungsszenarien. Als Lüftungsstellung für den Prototyp wurde ein Öffnungsspalt von 100 mm vorgesehen, welcher in der Elektronik einprogrammiert wurde. Dies kann jedoch je nach Anwendungsfall individuell angepasst werden.

Naturgemäß ist eine Verschattung über traditionelle Raffstoren oder dergleichen in Folge der Öffnungsrichtung schwierig, hier kann jedoch mit innovativen Glasprodukten (z.B. elektrochromes Glas oder Glas mit schaltbaren Flüssigkristallen) gearbeitet werden. Darüber hinaus ist ein Opak-Machen des unteren Flügelteils denkbar, so dass im offenen Zustand ein opakes „Vordach“ entsteht.

Umsetzung:	Fa. Internorm
Rahmen:	Fichtenholz
Dichtung:	Überschlag-, Falz- und Lippendichtung
Beschlag:	Spindeltrieb (Fa. ebetec) mit Kippschwinge (Fa. Maco) selbstverriegelnd durch Absenkung
Glas:	8 mm VSG bzw. 8 mm VG (Ug 0,7 – 0,4 W/(m <sup>2</sup> K)) bzw. x mm Isolierglas mit tragendem Randverbund
Verschattung:	Smart Glass wie z.B. Elektrochromes Glas, Flüssigkristall Glas
Lüftung:	100 mm motorisches anheben Öffnen durch motorisches Anheben bis zu 85°



Abbildung 20: Prototyp C: Außenansicht geschlossen und halb geöffnet; Innenansicht halb und ganz geöffnet (eigene Fotos)



Abbildung 21: Prototyp C: Links, Einlaufkulissee und Schere; Rechts, Spindeltrieb (eigene Fotos)

### 3.3.2. Performance in Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit

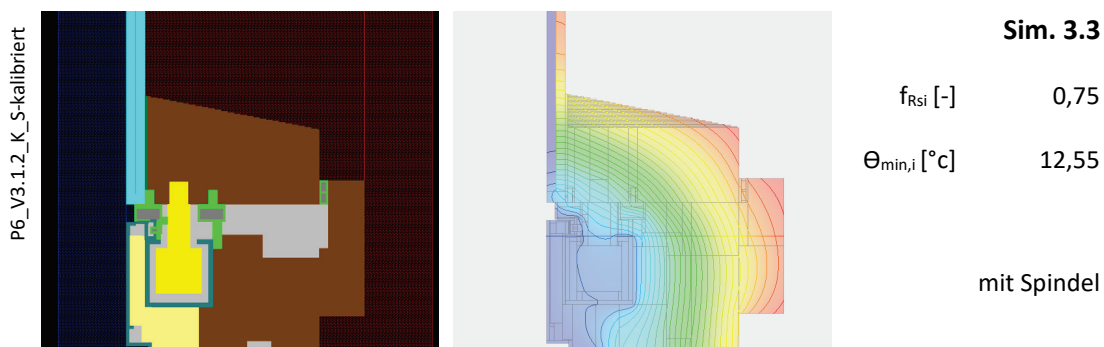
Aufgrund der Einschränkungen der Corona-Krise konnte dieser Prototyp nicht mehr für die Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen gefertigt werden. Die Konzeption und die technischen Details lassen aber eine Bewertung zu. Die Schwachstelle von herkömmlichen Schwing-(Klapp)fenstern stellt jener Punkt dar, in dem der Falz von innen nach außen wechselt (hier entsteht ein durchgängiges „Loch“). Dem wurde begegnet, indem das Fenster beim Öffnen vor der Schwing-Klapp Bewegung angehoben wird und beim Schließen abgesenkt wird. Somit ist es gelungen das „Loch“ durch den Falz abzudecken.

In Hinblick auf die Luftdurchlässigkeit, Schlagregendichtheit und Windwiderstandsfähigkeit sind zumindest gleichwertige, wenn nicht bessere Ergebnisse wie bei herkömmlichen Schwing-Klapp-Fenstern zu erwarten.

- Bei  $U_g$  0,7 W/(m<sup>2</sup>K) =  $U_w$  0,76 W/(m<sup>2</sup>K)
- Bei  $U_g$  0,4 W/(m<sup>2</sup>K) =  $U_w$  0,58 W/(m<sup>2</sup>K)
- Schallschutz siehe Kapitel 3.7

Das Verhalten des Fensters in einer üblichen Einbausituation wurde simulationstechnisch untersucht (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Prototyp C - Sim. 3.3 4





### 3.4. Prototyp D - Abstell-Schiebe-Fenster

Ähnlich zu dem in der Vorsektion beschriebenen Schwing-Klappfenster wurde ein weiteres Konzept im Zuge der Sondierung MOTIVE untersucht, welches nicht unbedingt von üblichen (Dreh/Kipp-) Fensterkonstruktionen aus dem Hochbau inspiriert ist. Das Konzept des Schiebefensters orientiert sich vielmehr an der Funktionsweise üblicher Autofenster.

Obwohl es in der Historie von Tür- und Fensterkonstruktionen immer wieder Konzepte und Produkte zum Schieben gab, sind die Vorbilder für hochwärmedämmende Fenster mit Schiebebewegung eher rar. Das historische britische (Holz-)Schiebefenster ist zwar (welt-)bekannt, ist aber gleichermaßen für seine schlechte thermische Performance bekannt. Die zeitgenössische Hebe-Schiebetür, welche in horizontaler Richtung geschoben wird, ist zwar ein weit verbreitetes Produkt, hat aber einige Nachteile, wie Probleme bei Regen, Luft- und Spritzwasserdichtheit oder oft auch weithin sichtbare und durchaus als massiv zu bezeichnende Führungsschienen.

Nach Evaluierung einer Vielzahl an prinzipiellen Ansätzen kombiniert aus Schieberichtung, Glasscheibenzahl und Schnittebene wird nun das Horizontalschieben weiterverfolgt.

#### Schiebefenster

Die Funktionsweise des Autofensters wird nicht mehr angestrebt, jedoch kommt ein anderes Element, das durchaus oft in der Fahrzeug- und Möbelindustrie zum Einsatz kommt, als Inspiration zum Einsatz, nämlich der sogenannte Schwerlastauszug. Diese, in Teleskop-Bauweise gefertigten Auszugsschienen, gibt es in unzähligen Ausführungen. Die in Abbildung 22 gezeigte Verarbeitung von Fa. Kipp hat eine Auszugslänge von bis zu 1100 mm und eine Tragkraft von bis zu 200 kg im Paar (Kippwerk, 2019), was für einen mittelgroßen Flügel mit Sicherheitszuschlägen ausreichend dimensioniert wäre.

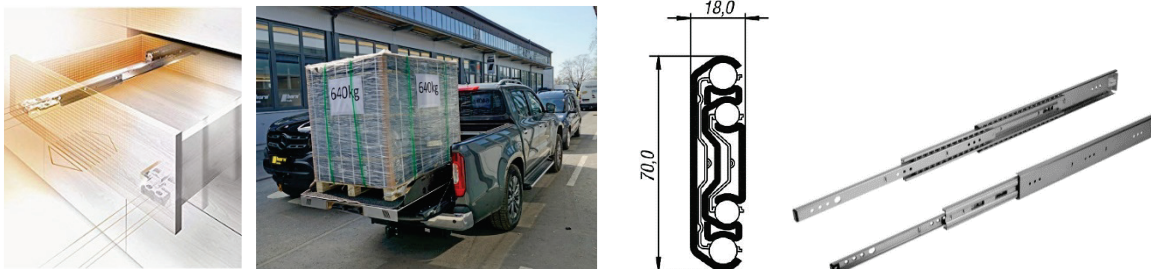


Abbildung 22: Schwerlast-Vollauszug für die Möbel- und Autoindustrie (Fa. Accuride und Fa Kippwerk)

Die Verwendung von Teleskopschienen in einer Fensterkonstruktion ist ein weitgehend neuartiger Ansatz. Anhand eines Handmusters (Abbildung 23) wurde die Funktionsweise überprüft. Aus architektonisch-ästhetischer Sicht ist ein Schieben mittels Auszugsschienen überaus ansprechend. Es werden keine eigenen Führungsschienen benötigt, welche bei üblichen Schiebesystemen z.B. für verschiebbaren außenliegenden Sonnenschutz, eine gewisse ästhetische Beeinträchtigung darstellen. Das Fenster beansprucht auch keine zusätzliche Fläche bzw. zusätzlichen Installationsraum in/an der Außenwand.



Abbildung 23: Prototyp D: Handmuster mit Teleskopschiene (geschlossen, halb offen, offen) (Eigene Fotos, Konsortium FIVA)

Im Gegensatz zum Vertikalschieben sind allerlei Formatgrößen möglich. Das Fenster kann geschoßhoch ausgeführt werden und ist in der Breite nur durch die Schienen begrenzt, deren derzeitige maximale Auszugslänge bei ca. 1,5 m liegt. Da das Fenster keine opake Nische für ein Versenken benötigt, sondern außen vor der Fassade geführt wird, kann seitlich links und rechts des Fensters eine Fixverglasung ausgeführt werden und damit Fensterbänder realisiert werden.

Das Fenster wird vor die Wand gesetzt, wodurch es weder ein Parapet (wohl aber eventuell eine Absturzsicherung) noch aufwendige Vorrichtungen für die Reinigung und den Scheibentausch benötigt. Die Bedienung kleiner Formate erscheint händisch problemlos möglich. Ob diese Konstruktion ausreichend dicht ist, kann durch fehlende Erfahrung mit den Teleskopschienen nicht bestimmt werden, wurde aber später am Prototyp überprüft.

Die Optik des schienenlosen Schiebens fand in Besprechungen grundsätzlich großen Anklang im Projektkonsortium und soll im Projekt FIVA weiterverfolgt werden. Das geringe Gewicht und die schlanken Querschnitte von Vakuumglas machen den Ansatz des Schiebens mit Teleskopschienen aus statischer Sicht zu einer realisierbaren Konstruktion. Der prinzipielle Entwurf wird als eine innovative Öffnungsart, zugeschnitten bzw. gut geeignet für Vakuumglas, erachtet.

### **Abstell-Schiebefenster**

Um den Rahmen, welcher in der Dämmwirkung dem Vakuumglas thermisch nur schwer gleichkommen kann, entsprechend zu gestalten, war der nächste Ansatz, die Fensterkonstruktion in die Wandaubung hinein zu versetzen. Um weithin ein ungehindertes Schieben vor der Fassade ermöglichen zu können, wurde die Konstruktion um einen zweiten Bewegungsmechanismus erweitert. Im geschlossenen Zustand ist das Fenster entweder flächenbündig mit der Wandaußenkante oder aber sogar gering in die Fensternische eingelassen. Beim Öffnen versetzt ein Ausstellantrieb den Fensterrahmen inklusive Teleskopschienen um einige Zentimeter nach außen. Danach kann das Fenster, genauso wie zuvor beschrieben, anhand der Teleskopschienen zur Seite geschoben werden. In Abbildung 24 und Abbildung 25 ist das Prinzip des Abstell-Schiebefensters skizziert.

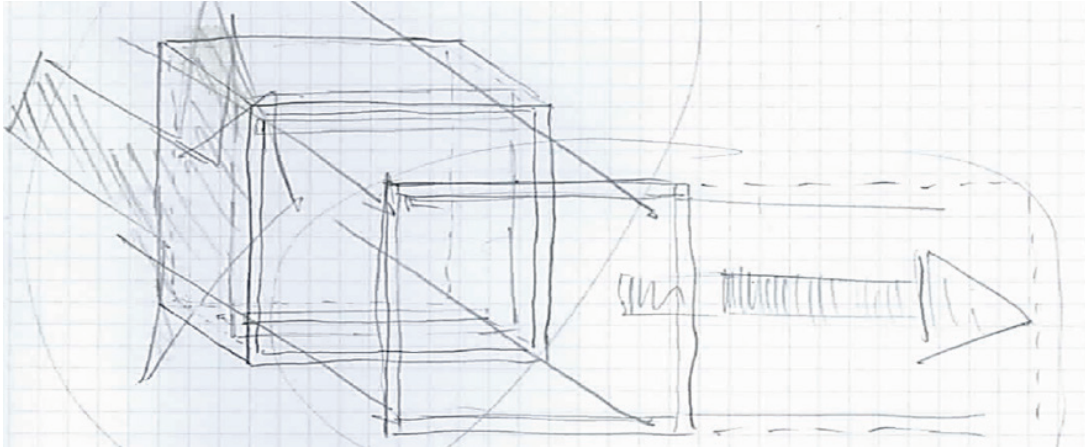


Abbildung 24: Prinzipskizze Abstell-Schiebefenster (Darstellung von U. Pont)

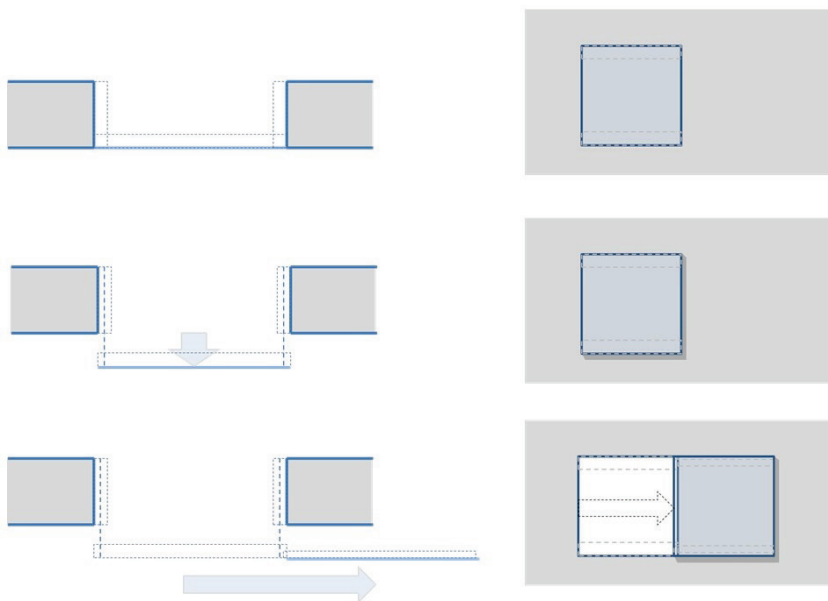


Abbildung 25: Positionsstellungen des Abstell-Schiebefensters (Abbildung U. Pont & M. Wölzl)

Mit dem Abstell-Schiebefenster ist es gelungen, eine innovative Fensterkonstruktion mit Vakuumglas zu entwickeln, die es in einer solchen Form am Markt noch nicht gibt und die mit einem herkömmlichen Wärmeschutzglas auch nur relativ schwer auszuführen wäre bzw. fundamental andere Systemstärken benötigen würde.

Die scheinbar schienenlose Schiebebewegung ist aus ästhetischer Sicht überaus reizvoll. Im geschlossenen Zustand lässt das Fenster diese Öffnungsbewegung nicht vermuten. Das Fenster fügt sich flächenbündig in die Außenfassade ein und präsentiert sich lediglich als Glas mit emaillierten Rand und Schattenfuge in einer sehr reduzierten, minimalistischen Erscheinungsform.

Die tatsächliche Eignung und Dauerfunktionstüchtigkeit der Teleskopschienen sollten in einem nächsten Schritt getestet werden. Verifiziert sind die Schienen auf ausreichend Gewicht und Bewegungszyklen (angefangen bei 10.000-mal (Kippwerk, 2019)). Der Einsatz in Fenstern ist jedoch neuartig und unterliegt damit veränderten Rahmenbedingungen (z.B. Witterungseinfluss, Vereisung, etc.). Gerade dieses Setting erfordert zukünftig eine vertiefte Untersuchung und Entwicklung solcher Schienen bzw. Fenster auf solchen Teleskopschienen.

Die Integration eines außenliegenden Sonnenschutzes ist bei dieser Konstruktion ohne Verlust des angestrebten Erscheinungsbildes kaum möglich. Durch Innovationen, wie schaltbares Glas (elektrochrome, photochrome oder thermochrome Gläser) oder auch entsprechende Folien könnte dieser Schwachpunkt gelöst werden. Eine genauere Betrachtung dieser Optionen war im Rahmen des Projekts nicht vorgesehen und sollte ebenfalls in zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbemühungen adressiert werden.

Die thermische Performance des Abstell-Schiebefensters hat alle ursprünglichen Erwartungen übertroffen. Ob die gebaute Ausführung mit den Simulationsergebnissen mithalten kann, wäre im Rahmen weiterer Forschungsbemühungen herauszufinden. Selbst wenn es zu geringen Einbußen der thermischen Dämmeigenschaften in der gebauten Realität kommt, wäre die übliche Kluft zwischen opaken und transparenten Gebäudehüllelementen hier nicht mehr besonders groß. Das Fenster ist mit solchen Konstruktionen nicht mehr automatisch der thermische Schwachpunkt der Außenhülle.

### 3.4.1. Schlusssentwurf

Hierbei handelt es sich um ein Fenster, welches in einer Ganzglasoptik erscheint (je nach Einbausituation jeweils von außen oder innen). Die Öffnungsart ist dabei zunächst ein Abstellen und darauffolgend ein Verschieben zur Seite vor die Außenwand. Das Fenster besitzt im geschlossenen Zustand keine sichtbaren Schiebe- bzw. Führungsschienen. Der Fensterstock bildet die innere Fensterleibung mit integrierten Bedienschalte. Durch Ansteuerung von vier Abstellantrieben wird das Fenster 4-seitig 100 mm parallel abgestellt (Lüftungsfunktion) und befindet sich somit vor der Wand. Mit Hilfe der verdeckt liegenden Teleskopauszüge kann der Flügel per Hand leicht auf die Seite (vor die Außenwand) geschoben werden. Zum Schließen wird der Flügel von Hand zugezogen, die Selbstschließfunktion der Teleskopauszüge führt den Flügel automatisch in die gewünschte Endposition. Die Abstellantriebe führen den Flügel zurück in den Fensterstock und erzeugen den erforderlichen Anpressdruck für die Dichtungen.

Betreffend Sonnenschutz ist festzuhalten, dass ein traditioneller, außenliegender Sonnenschutz durch die Öffnungsart herausfordernd sein kann, daher ist auch bei diesem Typ die Integration von smarten Glasprodukten, wie beispielsweise elektrochromes Glas oder Glas mit schaltbaren Flüssigkristallen, anzudenken.

Umsetzung:	Fa. Gaulhofer und Katzbeck
Rahmen:	Verbund aus Holz/Holzwerkstoff
Dichtung:	Quetschdichtungen
Beschlag:	Maco Abstellantrieb (Verriegelung durchselbsthemmenden Spindeln) Accuride Teleskopauszug
Glas:	8 mm VSG bzw. 8 mm VG ( $U_g 0,7 - 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) bzw. x mm Isolierglas mit tragendem Randverbund
Verschattung:	Smart Glass wie z.B. Elektrochromes Glas, Flüssigkristall Glas
Lüftung:	100 mm motorisches Abstellen Öffnen durch seitliches, händisches Schieben



Abbildung 26: Von links nach recht: geschlossen, abgestellt (Lüftungsstellung), halb offen, ganz offen (eigene Abbildungen, Projektconsortium FIVA)

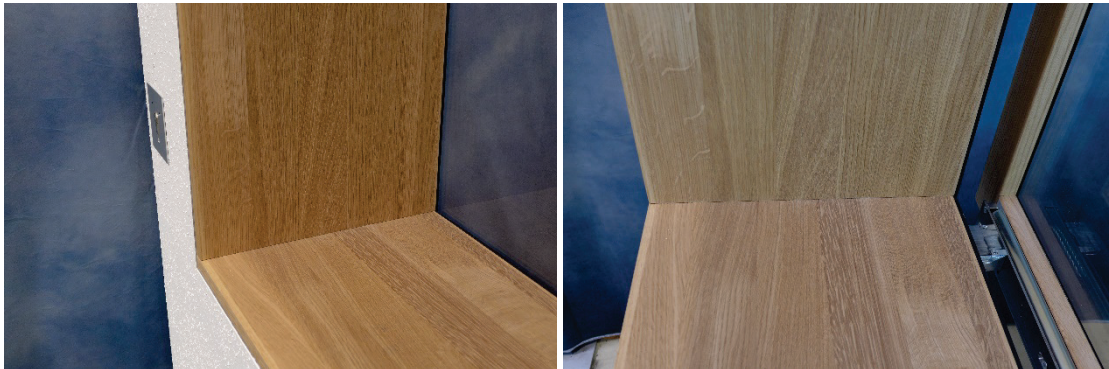


Abbildung 27: Links, Innenansicht geschlossen; Rechts, abgestellt in Lüftungsöffnung (eigene Abbildungen, Projektconsortium FIVA)



Abbildung 28: Links, außen flächenbündig; Rechts, Teleskopschiene mit Fangeinrichtung zum selbstständigen Schließen (eigene Abbildungen, Projektconsortium FIVA)

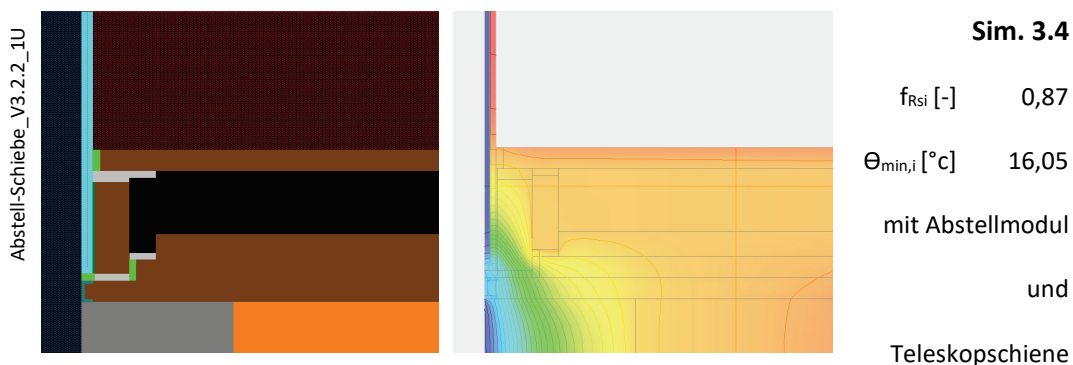
### 3.4.2. Performance in Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit

Die Untersuchungen des Fensterelements ergeben in der beschriebenen Ausführung folgende Ergebnisse:

- Luftdurchlässigkeit = 3
- Schlagregendichtheit = 7A/8B
- Windwiderstandsfähigkeit = C1/A2
- Luftdurchlässigkeit nach Wind = 2
- Bei  $U_g$  0,7 W/(m<sup>2</sup>K) =  $U_w$  0,75 W/(m<sup>2</sup>K)
- Bei  $U_g$  0,4 W/(m<sup>2</sup>K) =  $U_w$  0,55 W/(m<sup>2</sup>K)
- Schallschutz siehe Kapitel 3.7

Das Verhalten des Fensters in einer üblichen Einbausituation inklusive Putz und Wandanschluss wurde simulationstechnisch ebenfalls untersucht und wird in Sim. 3.4 (siehe Tabelle 9) dargestellt.

Tabelle 9: Prototyp D - Sim. 3.4



Die Ergebnisse der Luftdurchlässigkeit und der Windwiderstandsfähigkeit könnten durch den Einsatz einer 8 mm Vakuumglas-Scheibe und einer Verstärkung des längsseitigen Flügelrahmens wesentlich verbessert werden. Die bereits sehr guten Ergebnisse der Schlagregendichtheit könnten durch eine Optimierung der Dichtungstypen und/oder der Erhöhung des Anpressdrucks durch die Antriebstechnik noch weiter verbessert werden.

Dieser Prototyp weist mit einem  $U_w$  von 0,55 W/(m<sup>2</sup>K) exzellente und sogleich die besten Ergebnisse auf. Insgesamt zeigt der Prototyp bereits eine gute Gebrauchstauglichkeit und sollte zur Serienreife weiterentwickelt werden.

### 3.5. Nutzungsrelevanter Aspekte

An der größten Branchenveranstaltung Österreichs, dem Fenster-Türen-Treff 2020 im Congress Salzburg am 5. und 6. März 2020, wurden die vier Prototypen im Rahmen eines Vortrages vorgestellt. In der Sonderschau „Morgenfenster“ konnten die Prototypen von den ca. 320 Besuchern getestet und bewertet werden (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30).



Abbildung 29: Die vier Fensterprototypen in der Sonderschau am Fenster-Türen-Treff 2020 in Salzburg (eigene Abbildungen, Projektkonsortium FIVA)



Abbildung 30: Analyse und Bewertung der vier Prototypen durch die Besucher des Fenster-Türen-Treff 2020 (eigene Abbildungen, Projektkonsortium FIVA)

Das Feedback während und nach der Veranstaltung war enorm und fand auch entsprechenden Niederschlag in der Fachpresse. Es wurden sowohl die mutigen Lösungsansätze, die konsequente Umsetzung in den Prototypen und die innovativen Öffnungsarten gelobt. Kritisch wurde die wirtschaftliche Umsetzung insbesondere in Zusammenhang mit den mechatronischen Antrieben und die Nutzerakzeptanz gesehen. Insgesamt wurde damit ein wichtiger Impuls für die gesamte Fensterbranche gegeben.

Die Befragung von nicht im Projekt involvierten MitarbeiterInnen, das Einbinden der Marketing- und Vertriebsbereiche der beteiligten Wirtschaftspartner und Stakeholder-Befragungen mit potenziellen Interessentengruppen erfolgte in Form eines Fragebogens. Die Auswertung der 59 Fragebögen brachte folgendes Ergebnis (siehe Abbildung 31).

Bewertungsbogen		Das Morgenfenster			
Bewerten sie unsere Forschungsprototypen. Ihre Bewertung gibt uns wertvolles Feedback und fließt in unsere weitere Bearbeitung des Forschungsprojetes ein.		Entwicklung smarterer und energieeffizienter Fensterprototypen			
Vergeben Sie Noten:					
1 - sehr gut					
2 - gut					
3 - befriedigend					
4 - genügend					
5 - nicht genügend					
Kriterium		Typ			
		A	B	C	D
1	Optik und Architektur	1,7	2	2,4	1,2
2	Zeitgemäß	1,8	2,4	2,6	1,6
3	Innovationsgehalt	2,1	2	2,2	1,2
4	Technische Realisierbarkeit	1,8	2,4	2,6	2,1
5	Montierbarkeit	1,8	2,4	2,2	2,4
6	Bedienkomfort	1,7	2,4	2,5	1,7
7	Kundenakzeptanz	1,9	2,6	3	1,8
Notendurchschnitt		1,8	2,3	2,5	1,7
<b>Platzierung</b>					
Welches Fenster finden Sie am Besten?					
1. Platz	Typ D				
2. Platz	Typ A				
3. Platz	Typ B				

Abbildung 31: Gesamtauswertung der Fragebögen zu den vier Funktionsprototypen (eigene Abbildung)

Der Prototyp A „Raumseitig flächenbündiges, nach innen öffnendes Dreh-Fenster“ und Prototyp D „Abstell-Schiebe-Fenster“ konnten dabei besonders überzeugen. Auffällig ist, dass der Prototyp A eine sehr gleichmäßig gute Bewertung bekam, während der Prototyp D in den Kriterien Optik und Architektur sowie Innovationsgehalt überdurchschnittlich gut und in den Kriterien technische Realisierbarkeit und Montierbarkeit schlechter abschnitt. Es ist sowohl in den Präsentationen wie auch in der Ausstellung offensichtlich nicht gelungen, die einfachen Lösungen zu den beiden Kriterien überzeugend zu vermitteln bzw. besteht durchaus noch Entwicklungspotential.

Im Feld „Kommentare“ wurden zahlreiche wertvolle Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge aber auch Kritiken und Lob geäußert. So beispielsweise zum Prototyp A: „traditionell und zu teuer, aber Lüftung spannend“ oder zum Prototyp D: „sehr gut, aber für den täglichen Gebrauch ist es noch gewöhnungsbedürftig, schwierige Reinigung der äußeren Scheibe da außen öffnend, außenliegender Sonnenschutz nicht immer möglich, Wartung/Reparatur von Flügel und Glas nur von außen, ein Kraftspeicher für den Schließvorgang (eventuell elektronisch auslösbar) wäre praktisch.“ Die technischen Kommentare können aufgrund der detaillierten technischen Ausführung teilweise entkräftet werden oder aber sollten im nächsten Entwicklungsschritt Berücksichtigung finden.



### 3.6. Gleit- und Vakuumdichtung

Bei der Entwicklung eines vertikalen Schiebefensters (dieses wurde später zu Gunsten des Abstell-Schiebe-Fensters aufgegeben) wurden auch entsprechende Dichtungssysteme entwickelt. Ausgehend von einer Lippendichtung mit und ohne Gleitbelag wurden völlig neuartige Vakuumdichtungen getestet.

Beim Probekörper handelt es sich um ein Versuchsmuster, bei dem die Art der Dichtung und der Anpressdruck der Dichtung angepasst werden kann (siehe Abbildung 32).

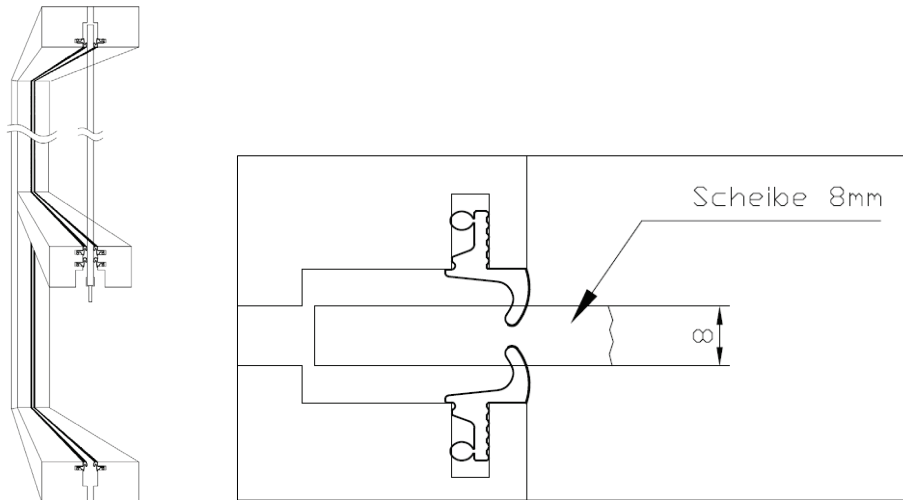


Abbildung 32: Schnitt durch das Versuchsmuster und Detail zum Dichtungsanschluss (eigene Abbildungen, Projektkonsortium FIVA)

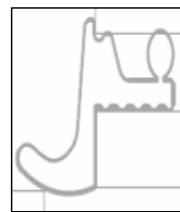
Die Ergebnisse aus den insgesamt 13 Versuchen sind in nachfolgender Tabelle 10 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst.

Tabelle 10: Untersuchte Dichtungsvarianten und ermittelte Ergebnisse (eigene Darstellung)

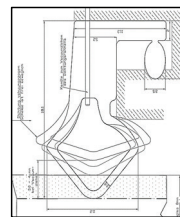
Versuch	Dichtung außen			Dichtung innen			Anpressdruck	Luftdurchlässigkeit bei			Schlagregendichtheit	Verformung bei		
	Nr.	Typ	Härte ° Shore	Gleitbelag	Typ	Härte ° Shore		Gleitbelag	+600 Pa	-600 Pa			Klasse	+1050 Pa
							mm	m3/h	m3/h	Klasse	Klasse	mm	mm	
<b>Gleitdichtung</b>														
1a	oe5792			j	oe5792							9A		
1b	oe5792			n	oe5792							9A		
2	oe5792			j	oe5792							E1050		
<b>Vakuumdichtung</b>														
1	oe5853	50	n		oe5853	50	n	3.0	0.0	0.0	4	E900	1.68	1.73
2	oe5853	50	n		oe5853	50	n	2.0	48.4	0.0	3	8A	2.56	2.87
3	oe5836	70	n		oe5855	50	n	2.3	35.3	0.0	3	9A	1.20	6.65
4	oe5836	70	n		oe5855	50	n	4.0	17.0	0.0	4	E750	0.73	6.39
5	oe5836	60	n		oe5855	50	n	4.0	13.9	7.7	4	9A	0.26	6.61
6	oe5853	50	n		oe5855	50	n	4.0	3.6	1.1	4	E1050	1.05	2.65
7	oe5830	60	n		oe5855	50	n	2.3	18.2	0.0	4	9A	2.09	3.60
8	oe5830	60	n		oe5855	50	n	4.0	0.0	0.0	4	9A	0.69	2.71
9	oe5830	70	j		oe5836-1	50	j	2.0	3.8	0.0	4	9A	1.09	3.98
10	oe5830	70	j		oe5836-1	50	j	3.7	19.3	0.0	4	8A	0.96	3.08

**Vertikal-Schiebefenster  
Dichtungsvarianten der Fa iEB**

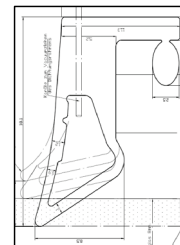
Versuch Nr.	Dichtung außen		Dichtung innen		Anpress- druck mm	Luftdurchlässigkeit bei		Schlagregen- dichtheit Klasse	Verformung bei			
	Typ	Härte ° Shore	Gleitbelag	Typ		Härte ° Shore	+ 600 Pa m3/h		- 600 Pa m3/h	+ 1050 Pa mm	- 1050 Pa mm	
<b>Gleitdichtung</b>												
1a	oe5792		j	oe5792				9A				
1b	oe5792		n	oe5792				9A				
2	oe5792		j	oe5792				E1050				
<b>Vakuumdichtung</b>												
1	oe5853	50	n	oe5853	50	n	0,0	0,0	4	E900	1,68	1,73
2	oe5853	50	n	oe5853	50	n	48,4	0,0	3	8A	2,56	2,87
3	oe5836	70	n	oe5855	50	n	35,3	0,0	3	9A	1,20	6,65
4	oe5836	70	n	oe5855	50	n	17,0	0,0	4	E750	0,73	6,39
5	oe5836	60	n	oe5855	50	n	13,9	7,7	4	9A	0,26	6,61
6	oe5853	50	n	oe5855	50	n	3,6	1,1	4	E1050	1,05	2,65
7	oe5830	60	n	oe5855	50	n	18,2	0,0	4	9A	2,09	3,60
8	oe5830	60	n	oe5855	50	n	0,0	0,0	4	9A	0,69	2,71
9	oe5830	70	j	oe5836-1	50	j	3,8	0,0	4	9A	1,09	3,98
10	oe5830	70	j	oe5836-1	50	j	19,3	0,0	4	8A	0,96	3,08



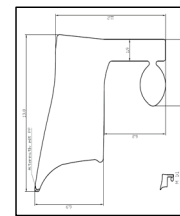
oe5792



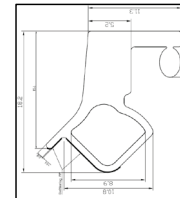
oe5833



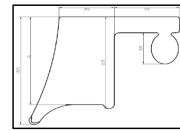
oe5836



oe5855



oe5830



oe5836-1

Abbildung 33: Untersuchte Dichtungsvarianten und ermittelte Ergebnisse (eigene Darstellung)

Insgesamt zeigen die Ergebnisse unabhängig vom Dichtungssystem sehr gute Ergebnisse in Bezug auf die Luft- und Schlagregendichtheit, es werden jeweils hohe und höchste Klassen erreicht. Auffallend sind die unterschiedlichen Verformungen beim Anschluss der Verglasung an die Dichtungen. Bei Drucklasten müssen die Verformungen so gering wie möglich gehalten werden, damit die Glasscheibe nicht nach innen ausweicht und den Anpressdruck auf der Außenseite verringert. Bei Soglasten hingegen erhöht sich der Anpressdruck außen und die Dichtheit des Systems steigt. Dieser Effekt kann, wie die Versuche zeigen, durch die Dichtungskonfiguration gezielt beeinflusst und für die Fensterkonstruktion genutzt werden.

Dieser Art von Dichtungen wird ein großes Entwicklungspotential für spezifische Fensterkonstruktionen zugesprochen. Entwicklungen sind nicht nur im Bereich der Dichtungsgeometrie und der Eckverbindung notwendig, sondern insbesondere auch für die Technologie zur Erzeugung des Unterdruckes. Hier reicht das Spektrum von kleinen Vakuumpumpen bis hin zu im Bedienbeschlag integrierten Pneumatikzylindern.

### 3.7. Schallschutz

Die Ergebnisse der in Kapitel 2.2.5 beschriebenen Messungen sind zum Einen der Frequenzverlauf der Schalldämmung, der üblicherweise in Diagrammen dargestellt wird und zum Anderen das bewertete Schalldämm-Maß (Einzahlwert) mit verschiedenen Anpassungswerten. Nachfolgend werden diese Ergebnisse näher ausgeführt und erläutert. In den Diagrammen, die in diesem Kapitel gezeigt werden, ist der Frequenzverlauf des Schalldämm-Maßes  $R$  dargestellt. Auf der Ordinate (Y-Achse) ist das Schalldämm-Maß  $R$  in dB und auf der Abszisse (X-Achse) die Frequenz  $f$  in Hz angegeben. Die Frequenz ist in Terzen ( $1/3$  Oktav) aufgetragen.

In der Legende der Diagramme wird in der Bezeichnung der jeweiligen Kurve der Hersteller  $P$  der Vakuumverglasungen mit angegeben (vergleiche

Tabelle 1, S. 25). Die Anzahl  $n$  der gemessenen Verglasungen, sofern es mehr als eine ist, wird ebenfalls in der Kurvenbezeichnung angeführt. Zur Orientierung wird das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w$  (Einzahlwert) ebenfalls eingeführt. Der normativ abgedeckte Frequenzbereich für  $R_w$  liegt zwischen 100 Hz und 3150 Hz und ist in den Diagrammen (mit dünn gepunkteten, schwarzen Linien) gekennzeichnet. Zusätzlich werden die unteren Frequenzbänder für den Bereich 50 Hz bis 100 Hz und die oberen von 3150 Hz bis 5000 Hz angegeben. Der Frequenzbereich von 50 Hz bis 5000 Hz lässt sich wie folgt unterteilen:

- Tieffrequenter Bereich      50 Hz      bis      200 Hz
- Mittelfrequenter Bereich      250 Hz      bis      1000 Hz
- Hochfrequenter Bereich      1250 Hz      bis      5000 Hz

#### Luftschalldämmung von Vakuumglas und Einfachglas (einschaliges Bauteil)

Aus bauakustischer Sicht kann Vakuumglas annähernd wie eine monolithische Einfachscheibe betrachtet werden. Dies zeigten verschiedene Studien, in denen Vakuumgläser untersucht wurden (Ashmore et al. 2015), (Cabrera et al. 2016), (Nugroho et al. 2018) und (Lux et al. 2020). Dabei hängt die Schalldämmung hauptsächlich von der Flächenmasse, der Biegesteifigkeit, der inneren Dämpfung und der Dimension ab. Jede dieser Eigenschaften beeinflusst einen speziellen Frequenzbereich im

Verlauf der Schalldämmung. Die tieffrequente Schalldämmung wird neben der Scheibenmasse hauptsächlich von der Biegesteifigkeit und der Dimension (Höhe × Breite) geprägt. In diesem Bereich liegen die Eigenfrequenzen  $f_n$  des Vakuumglases. Diese können anhand von Gleichung (1) berechnet werden (Fasold und Veres 2003).

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B'}{m'} \left[ \left(\frac{n_x}{a}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{b}\right)^2 \right]} \text{ in Hz} \quad (1)$$

Dabei entspricht  $B'$  der Biegesteifigkeit der Platte in Nm;  $m'$  der Flächenmasse in kg/m<sup>2</sup>;  $n_x$  und  $n_y$  ganzen natürlichen Zahlen;  $a$  und  $b$  den Seitenlängen der Platte in m. Oberhalb der Eigenfrequenzen liegt der Wirkungsbereich des Massengesetzes (Bergersches Massengesetz). Innerhalb der Grenzen des Massengesetzes  $f_n < f_{\text{Massengesetz}} < f_c/2$  wird die Schalldämmung primär von der Flächenmasse beeinflusst. Mit Gleichung (2) kann das Schalldämm-Maß entsprechend dem Massengesetz berechnet werden (Fasold und Veres 2003).

$$R = 20 \lg(fm') \text{ in dB} \quad (2)$$

In (2) entspricht  $f$  der (betrachteten) Frequenz in Hz und  $m'$  der Flächenmasse in kg/m<sup>2</sup>. Der Anstieg der Schalldämmung in diesem Bereich liegt bei 6 dB/Oktave.

Ein Abfall des Schalldämm-Maßes tritt dann wieder auf, wenn die Koinzidenz oder Spuranpassung zu wirken beginnt. Koinzidenz bedeutet in der Bauakustik, dass die Wellenlänge der freien Biegewelle auf der Oberfläche des Bauteils mit der Spur der Wellenlänge des (schräg) einfallenden und des abgestrahlten Luftschalls übereinstimmt. Aufgrund dessen wird die Schalldämmung der Verglasung stark verschlechtert. Die Koinzidenzfrequenz  $f_c$  kann mit folgender Gleichung (3) berechnet werden (Fasold und Veres 2003).

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{B'}} \xrightarrow{\text{für Glas gilt dann}} f_c \cong \frac{12000}{t} \text{ in Hz} \quad (3)$$

Mit  $c_0$  wird die Schallgeschwindigkeit in Luft in m/s gegeben und  $t$  ist die Scheibendicke in mm.

### Einschalige Bauteile (Prinzipverlauf)

Der Frequenzverlauf von einschaligen Bauteilen lässt sich prinzipiell in drei bzw. vier Abschnitte einteilen (siehe Abbildung 34):

- **Bereich I:** Plattenschwingung (Eigenfrequenzen  $f_n$  der Platte) - bestimmt durch die Flächenmasse, die Biegesteifigkeit und die Dimension (Höhe × Breite).
- **Bereich II:** Massegesetz (kann mit Gleichung 2 berechnet werden) - bestimmt durch die Flächenmasse. Der Wirkungsbereich des Massegesetzes liegt oberhalb der Eigenfrequenzen und unterhalb der halben Koinzidenzfrequenz  $f_c$ .
- $f_n < f_{\text{Massengesetz}} < f_c/2$  mit einem Anstieg von 6 dB pro Oktave
- **Bereich III:** Koinzidenzbereich - bestimmt durch die Plattendicke und die Biegesteifigkeit
- **Bereich IV:** Nach dem Koinzidenzbereich stellt sich wieder die Wirkung des Massengesetzes ein.

Zu den einschaligen Bauteilen zählen Einscheibenglas (EG), Verbundglas (VG) und auch Vakuumglas, obwohl es aus zwei getrennten, vorgespannten EG besteht.

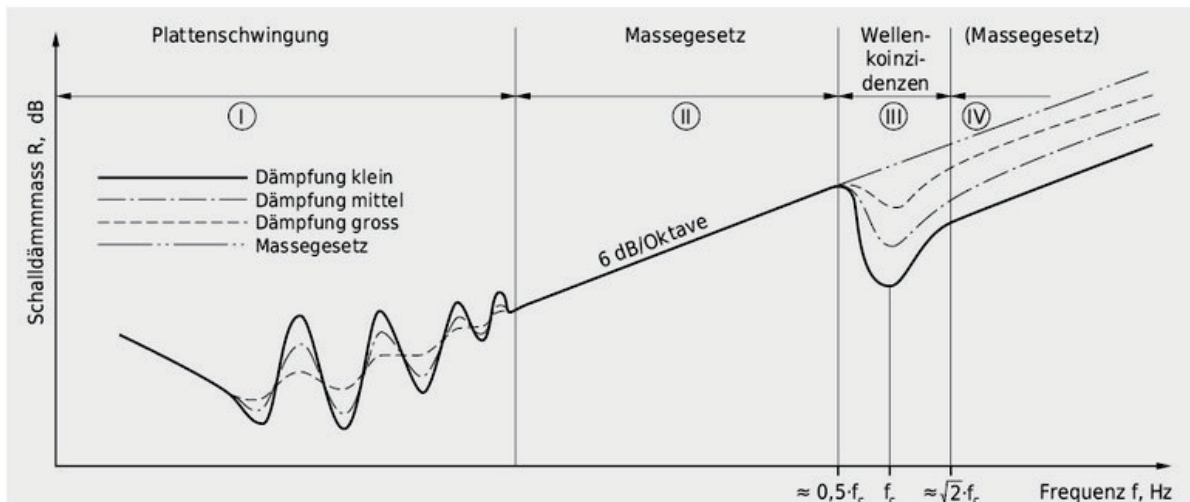


Abbildung 34: Qualitativer Verlauf der Schalldämmung eines einschaligen Bauteils als Funktion der Frequenz (Frequenzverlauf); Abbildung von <https://enbau-online.ch/bauphysik/7-4-schallausbreitung-im-gebaeude/> (am 14.07.2020)

### Zweischalige Bauteile (Prinzipverlauf)

Zweischalige Bauteile bestehen aus zwei „getrennten“ Schalen und können mittels einem Masse-Feder-Masse System physikalisch beschrieben werden (siehe Abbildung 35). Diese Frequenzverläufe lassen sich auch in vier Bereiche einteilen:

- **Bereich I:** Massegesetz (tiefe Frequenzen) - in diesem wirkt das Bauteil wie ein einschaliges System mit gleicher Masse.
- **Bereich II:** Doppelschalenresonanz  $f_r$  - in dieser wirkt das Masse-Feder-Masse System und es erfolgt ein Resonanzeinbruch (oft schlechter als das einschalige Grundbauteil). Die beiden Schalen schwingen im „Gegentakt“.
- **Bereich III:** Verbesserung (mittlere Frequenzen) - es ergibt sich eine Verbesserung mit einem Anstieg von 18 dB pro Oktave gegenüber einem einschaligen Bauteil.
- **Bereich IV:** Dickenresonanzen - es entstehen Einbrüche, die sich durch stehende Wellen im Zwischenraum ausbilden.

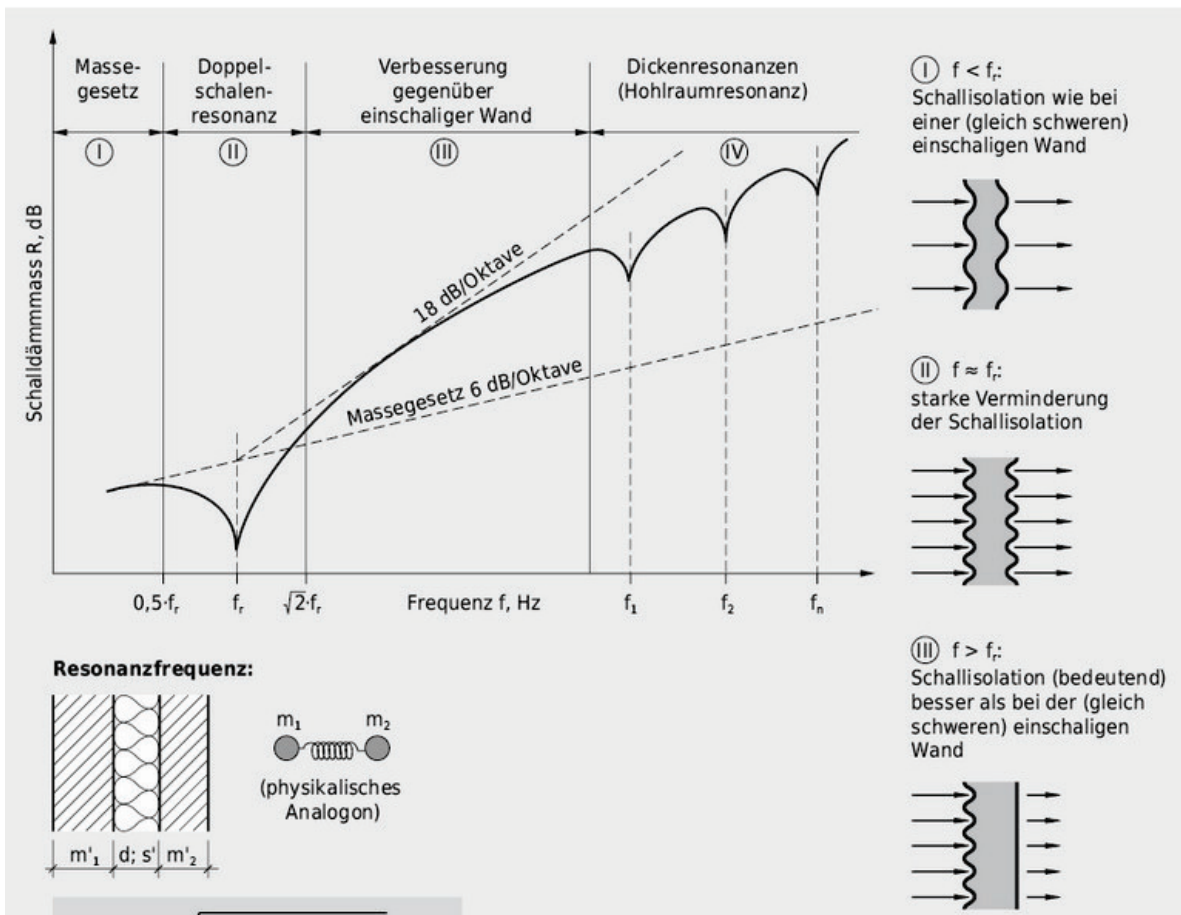


Abbildung 35: Qualitativer Verlauf der Schalldämmung eines zweischaligen Bauteils als Funktion der Frequenz (Frequenzverlauf); Abbildung von <https://enbau-online.ch/bauphysik/7-4-schallausbreitung-im-gebaeude/> (am 14.07.2020)

### 3.7.1. Schallschutz von Vakuumglas

#### 3.7.1.1. Ergebnisse der Schalldämmung von Einscheibenglas (EG)

Um das Verständnis zu vereinfachen, wird als erstes das schalltechnische Verhalten von Einfachglas beschrieben und diskutiert. Die Theorie zu diesem Verhalten wird in Abschnitt 3.7a angeführt, wobei sich das prinzipielle Verhalten von Einfachglas und Vakuumglas für diese Situation nicht unterscheidet.

In Abbildung 36 (auf der linken Seite) werden Einfachgläser mit ansteigender Dicke von 3 mm auf 8 mm verglichen. Zwischen den einzelnen EG liegt jeweils ein Dickenzuwachs von 1 mm und damit verbunden steigt auch die Flächenmasse  $m'$  an. Es ist gut zu erkennen, dass sich die Schalldämmung mit steigender Flächenmasse erhöht. Dies zeigt sich vor allem im mittelfrequenten Bereich. Eine Verbesserung im tieffrequenten Bereich findet erst ab  $\geq$  EG 10 mm statt. Des Weiteren verschiebt sich die Koinzidenzfrequenz von 4000 Hz zu 2000 Hz (siehe Tabelle 11). Das bedeutet, mit steigender Glasdicke und Biegesteifigkeit wandert die Koinzidenzfrequenz von höheren zu tieferen Frequenzen. Ab Scheibendicken von  $\geq$  6 mm bilden sich keine scharfen Einbrüche aus. Stattdessen entsteht ein breiter Einbruch, der über zwei Frequenzbänder läuft.

In Tabelle 11 werden die gemessenen, die theoretisch berechneten (nach Gleichung 2) und die in EN 12758:2019 angeführten Koinzidenzfrequenzen verglichen. Im Allgemeinen passen die ermittelten Werte gut zu den berechneten und können für Einschätzungen benutzt werden. Die Abweichungen zwischen Mess- und Rechenwert können zum einen an der vereinfachten Formel liegen, und zum anderen an der Glasdicke. Die Nennglasdicke von z. B. 4 mm stimmt nicht mit der wahren Glasdicke (von 3,9 mm) überein. Dies haben Glasdicken-Messungen mit dem GlassBuddy® Plus gezeigt. Die Unterschiede lagen im Bereich von -0,1 mm bis -0,3 mm. Die Messdaten aus der EN 12758:2019 stimmen gut mit den Messdaten aus diesem Projekt überein und können somit verwendet werden.

In Abbildung 36 (auf der rechten Seite) werden zwei EG angeführt und mit den zugehörigem berechneten Massengesetz gegenübergestellt. Die eingezeichneten EG haben das schalltechnische Verhalten eines einschaligen Bauteils (vergleiche Abbildung 34). Zusätzlich ist eine Zweischeiben-MIG mit einem SZR von 18 mm dargestellt, um die Unterschiede herauszuarbeiten. Die MIG verhält sich wie ein zweischaliges Bauteil (siehe Abbildung 35). Die Flächenmassen der 8 mm EG und der MIG sind nahezu gleich und können daher direkt verglichen werden.

Bei den zwei EG (4 mm und 8 mm) kann man erkennen, dass Gläser im mittelfrequenten Bereich gut mit dem Massegesetz beschrieben werden können. Durch die größere Flächenmasse der 8 mm EG weist diese Verglasung die höhere Schalldämmung gegenüber der 4 mm EG auf. Die obere Grenze der Wirkung des Massegesetzes liegt im Bereich (wie in der Theorie beschreiben) von  $f_c/2$ :

- 4 mm EG:  $3150 \text{ Hz}/2 = 1575 \text{ Hz}$
- 8 mm EG:  $2000 \text{ Hz}/2 = 1000 \text{ Hz}$

Der theoretische Anstieg von 6 dB/Oktave zeigt sich ebenfalls im Wirkungsbereich des Massegesetzes. Danach folgt der Koinzidenzbereich mit den Koinzidenzfrequenzen, die in Tabelle 11 angegeben sind und die Schalldämmung in diesem Bereich deutlich verringern. Danach folgt wieder ein Anstieg der Schalldämmung, der theoretisch mit dem Massegesetz beschrieben werden kann.

Die MIG Verglasung 4-18-4 verhält sich da etwas anders. Diese Verglasung hat aufgrund ihrer Zweischaligkeit eine Resonanzfrequenz bei 200 Hz (abgelesen aus dem Frequenzverlauf). Die Resonanzfrequenz  $f_r$  kann für Zweischeiben-MIG mit der Gleichung (4) berechnet werden.

$$f_r = 1200 \sqrt{\frac{1}{d_L} \left[ \left( \frac{1}{d_1} \right) + \left( \frac{1}{d_2} \right) \right]} \text{ in Hz} \quad (4)$$

In dieser Gleichung steht  $d_L$  für die Dicke der Luftschicht in mm und  $d_1, d_2$  für die Dicken der beiden Scheiben in mm. Diese Berechnung ergibt ein  $f_r$  bei 200 Hz. Damit passen die Messwerte gut zur Berechnung. Der Resonanzeinbruch verringert die Schalldämmung in dem Bereich von 160 Hz bis 500 Hz unter die der 4 mm EG, obwohl bei der MIG die doppelte Flächenmasse vorliegt. Nach dem Resonanzeinbruch ab 200 Hz wird mit diesem Aufbau ein Anstieg der Schalldämmung von 18 dB pro Oktave erreicht. Das hat zur Folge, dass ab 500 Hz bis 5000 Hz die Schalldämmung der 4 mm EG deutlich überschritten wird. Die Koinzidenzfrequenz liegt bei diesen zwei Verglasungen bei 3150 Hz. Betrachtet man den Einzahlwert, erreichen beide Verglasungen 30 dB. Gegenüber der 8 mm EG erreicht die MIG (trotz gleichem  $m'$ ) weder tief- noch mittelfrequent die Schalldämmung der EG. Die MIG kann ihr Potential erst ab 1000 Hz aufwärts zeigen. Dort wird die Schalldämmung der EG überschritten – zum einen, da ein steilerer Anstieg (der Schalldämmung) bei der MIG vorliegt, zum anderen, da die 8 mm EG aufgrund ihrer Eigenschaften einen Koinzidenzeinbruch bei niedrigeren Frequenzen ausbildet. Diese Unterschiede zeigen sich beim bewerteten Schalldämm-Maß mit einem Unterschied von 4 dB.

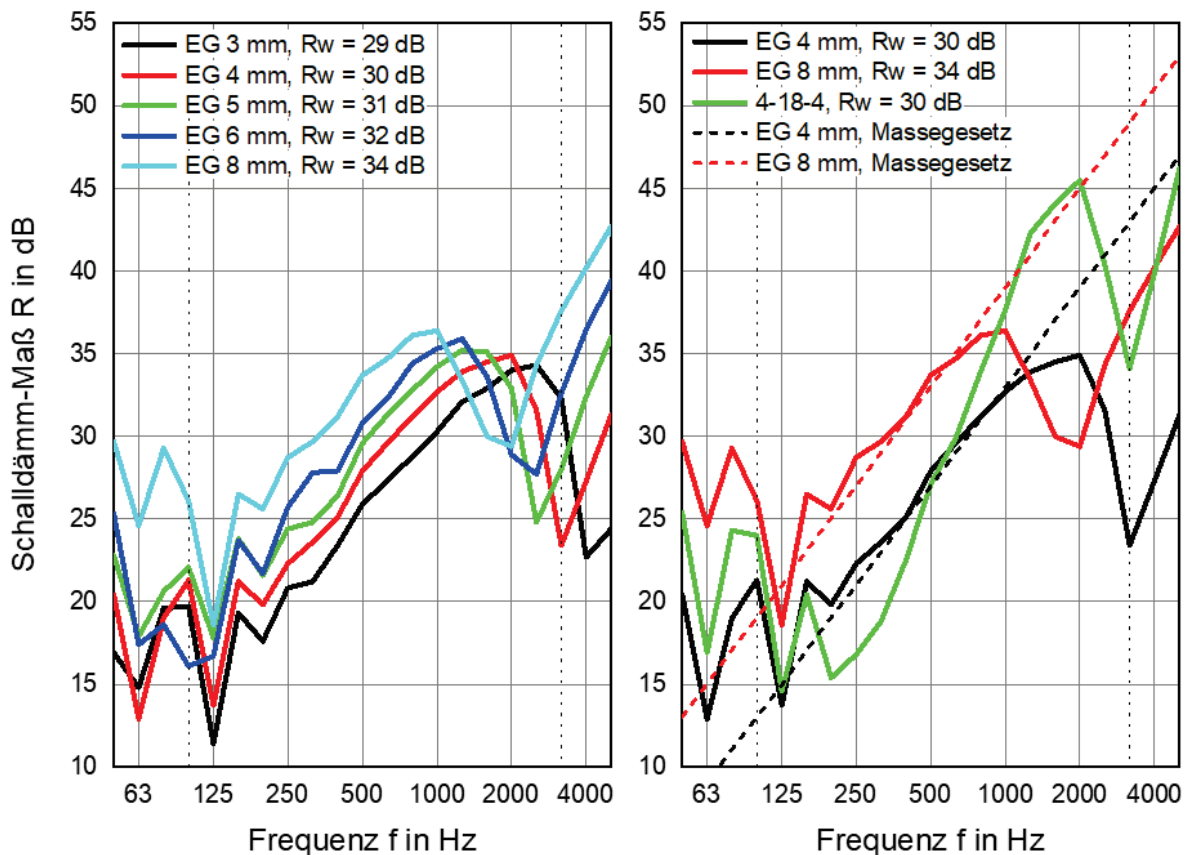


Abbildung 36: Vergleich von Einfachgläsern (EG) mit variierender Glasdicke (links) und zwei Einfachgläser, EG 4 mm und EG 8 mm im Vergleich zum berechneten Massengesetz (nach Gleichung 2) und zu einer Zweischeiben-Isolierverglasung (MIG) 4-18-4 (rechts) (eigene Abbildung)



Tabelle 11: Übersicht der gemessenen, berechneten (Gleichung 2) und abgelesenen (EN 12758:2019) Koinzidenzfrequenzen für Einfachgläser (EG)

Verglasung	Koinzidenzfrequenz			
	Standard	gemessen	berechnet	EN 12758:2019
		in Hz	in Hz	
3 mm EG		4000	4000	5000
4 mm EG		3150	3000	3150
5 mm EG		2500	2400	2500
6 mm EG		2000 – 2500	2000	2000 – 2500
8 mm EG		1600 – 2000	1500	1600

### 3.7.1.2. Ergebnisse der Schalldämmung von Vakuumglas und der Vergleich zu Standardprodukten wie Einscheibenglas (EG) und Verbundglas (VG)

In Abbildung 37 wird eine 4v4 Vakuumverglasung mit einem 4 mm EG (linke Seite) und einen 8 mm EG (rechte Seite) verglichen. Zusätzlich wird das berechnete Massegesetz (gestrichelte Linien) für beide EG angegeben. Bei der Gegenüberstellung der Vakuumverglasung mit 4 mm EG ist erkennbar, dass die 4v4 eine höhere Schalldämmung aufgrund der größeren Flächenmasse aufweist. Im Allgemeinen werden über den gesamten Frequenzbereich höhere Schalldämmungen erreicht. Beim Vakuumglas prägt sich aufgrund der zwei verwendeten 4 mm EG die Koinzidenzfrequenz bei 3150 Hz aus. Diese liegt genau auf der des EG. Bei der Betrachtung des Einzahlwertes ist ein Unterschied von 5 dB ersichtlich.

Wenn die 4v4 mit einem gleich schweren 8 mm EG verglichen wird, zeigen sich im tieffrequenten Bereich Unterschiede, die auf die unterschiedlichen Eigenschaften der verwendeten Gläser zurückzuführen sind. Da die Flächenmasse und die Dimension bei diesen beiden gleich sind, liegt es hauptsächlich an der Biegesteifigkeit der Grundgläser – im Fall der 4v4 sind das zwei vorgespannte 4 mm EG, die im Randbereich über den Randverbund und in der Fläche über ein Pillarraster gekoppelt sind. Im Gegensatz dazu steht die 8 mm Floatglas-Scheibe, die nicht vorgespannt ist. Im mittelfrequenten Bereich folgen beide Verglasungen dem berechneten Massengesetz bis zum Beginn des Koinzidenzbereiches, der bei der halben Koinzidenzfrequenz beginnt:

- 4v4:  $f_c/2 = 1575 \text{ Hz}$
- EG 8 mm:  $f_c/2 = 1000 \text{ Hz}$

Damit kann der Anstieg der Schalldämmung im Fall der 4v4 bis zu höheren Frequenzen genutzt werden. Es entstehen große Unterschiede im Schalldämm-Maß im Bereich der Koinzidenzen. Bei der Betrachtung des Einzahlwertes ist eine Differenz von 1 dB ersichtlich.

Die Zweischeiben-Isolierverglasung (MIG) hat im Vergleich zu den beiden anderen Verglasungen eine deutlich geringere Schalldämmung im Bereich von 125 Hz bis 1000 Hz. Das liegt (analog zu dem Vergleich EG versus MIG in Abbildung 36, rechts) an der Ausbildung einer Doppelschalenresonanz  $f_r$  bei 200 Hz. Damit fällt das Schalldämm-Maß im Bereich von 160 Hz bis 500 Hz unter das eines 4 mm EG (siehe Abbildung 37, rote Kurve, links und blaue Kurve, rechts). Dieser Bereich ist enger gegenüber dem der 8 mm EG bzw. der 4v4. Eine deutliche Verbesserung stellt sich dafür aber im hochfrequenten Bereich ab 1250 Hz ein. Diese liegt über der Schalldämmung des Vakuumglases. Bei diesen beiden

Systemen liegt der Koinzidenzeinbruch auf der gleichen Frequenz. Diese Unterschiede sind auch im bewerteten Schalldämm-Maß ersichtlich, mit Unterschieden von 4 dB für das 8 mm EG bzw. 5 dB für das Vakuumglas.

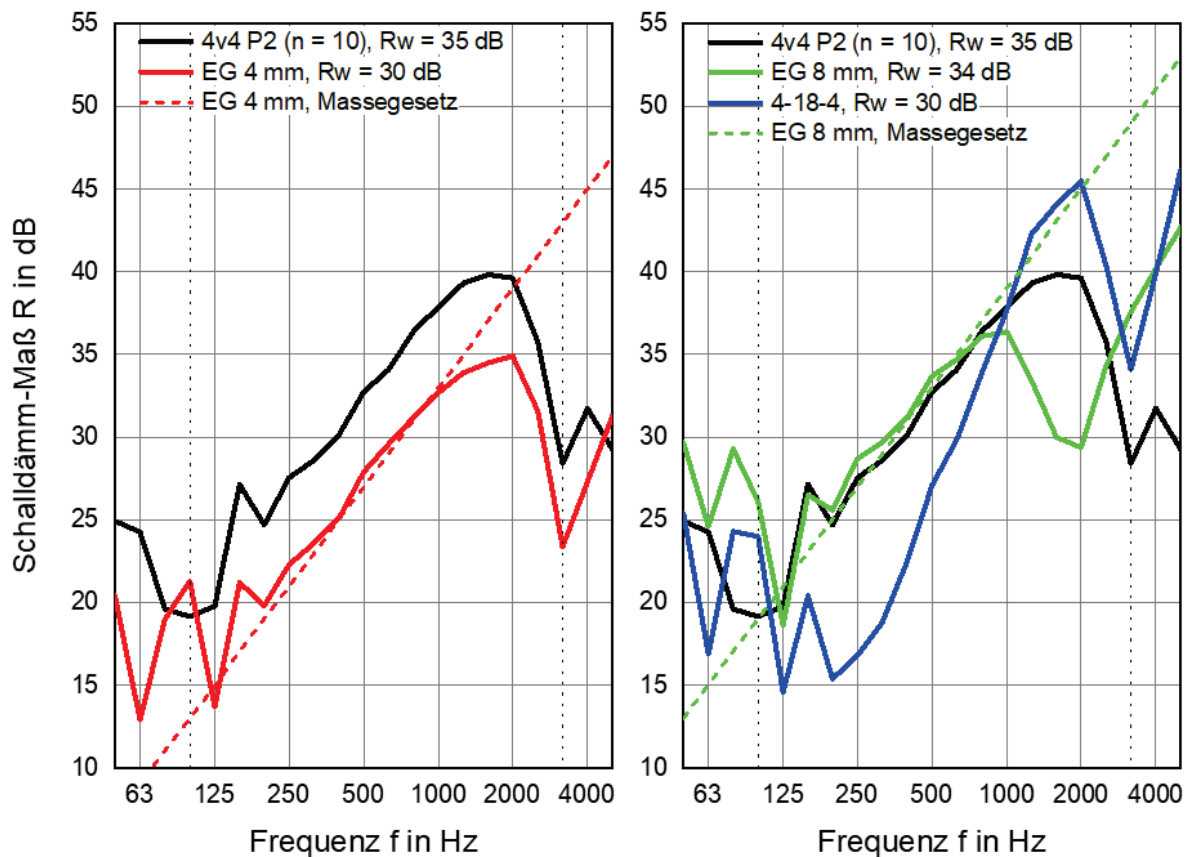


Abbildung 37: Vergleich von einem 4v4 Vakuumglas mit einem 4 mm Einfachglas (EG) und dem zugehörigen Massegesetz (berechnet mit Gleichung 2) auf der linken Seite; Vergleich von einem 4v4 Vakuumglas mit einem 8 mm Einfachglas (EG) und dem zugehörigen Massegesetz (berechnet mit Gleichung 2) und einer Zweischeiben-Isolierverglasung (MIG) auf der rechten Seite

In Abbildung 38 auf der linken Seite wird ein 4v4 Vakuumglas mit zwei Verbundgläsern (VG), einem 44.2.VSG und einem 44.2 VSGa verglichen. Hier zeigen sich analog zu Abbildung 37 (rechts) Unterschiede in der tieffrequenten Schalldämmung aufgrund der unterschiedlichen Biegesteifigkeit der Systeme. Die beiden VG sind in diesem Bereich sehr ähnlich. Die größeren Unterschiede ergeben sich zum Vakuumglas. Im mittelfrequenten Gebiet, dem Wirkungsbereich des Massegesetzes, ist die Schalldämmung zwischen den Frequenzen 200 Hz bis 800 Hz nahezu deckungsgleich. Differenzen ergeben sich zum VSG-System, welches den gleichen Koinzidenzeinbruch wie ein 8 mm EG aufweist (vergleiche Tabelle 12). Das 44.2 VSG-System gleicht im schalltechnischen Verhalten dem eines 8 mm EG. Die 4v4 und die 44.2 VSGa verhalten sich bis in den Koinzidenzbereich gleich und bilden auch die gleiche  $f_c$  bei 3150 Hz aus. Was sich deutlich unterscheidet, ist die Tiefe des Einbruchs (von  $f_c/2$  auf  $f_c$ ):

- 4v4: von 39,8 dB auf 28,4 dB → Differenz 11,4 dB
- 44.2 VSGa: von 40,2 dB auf 38,0 dB → Differenz 2,2 dB

Daraus wird ersichtlich, wo der größte Vorteil der PVB-Folie mit akustischen Eigenschaften liegt. Dies zeigt sich auch bei der Betrachtung der Einzahlwerte, denn dort ergeben sich Unterschiede von 2 dB für die 4v4 und 3 dB für die 44.2 VSG.

Auf der rechten Seite von Abbildung 38 werden 4v4 Vakuumgläser von verschiedenen Herstellern verglichen. Auffällig ist, dass sich die 4v4\* (blau, rechte Seite) tieffrequent im Bereich von 50 Hz bis 200 Hz ganz anders verhält als die anderen drei Vakuumgläser. Die tieffrequente Schalldämmung hängt primär von der Dimension, der Flächenmasse und der Biegesteifigkeit ab. Die Flächenmasse ist bei allen Verglasungen ident. Darum ist in diesem Fall die Dimension (und die damit verbundene Steifigkeit der Verglasung) für das tieffrequente Verhalten verantwortlich und erzeugt die Unterschiede. Die restlichen Systeme zeigen in diesem Bereich nur geringe Unterschiede. Im mittelfrequenten Gebiet (Wirkungsbereich des Massegesetzes) sind die Frequenzverläufe deckungsgleich. Kleine Differenzen ergeben sich im Koinzidenzbereich. Bei 3150 Hz bildet sich die gleiche Koinzidenzfrequenz aus, aber die Tiefe unterscheidet sich etwas bei der 4v4\* gegenüber den anderen. Dies liegt vermutlich auch an der geringeren Scheibendimension. Die Biegesteifigkeit ändert sich etwas aufgrund der Größe und das wiederum führt zu einem leicht geänderten Verhalten im Koinzidenzbereich. Betrachtet man den Verlauf nach der Koinzidenz, prägt sich bei drei Kurven im Gegensatz zu 4v4 P2 (schwarz, rechte Seite) ein Anstieg aus. Dort zeigt sich ein Abfall zwischen 4000 Hz und 5000 Hz. Für dieses Verhalten konnte noch keine eindeutige Erklärung gefunden werden. Vermutet wird ein Einfluss der vorgespannten EG, welche zum Aufbau der Vakuumgläser verwendet werden. Das bewertete Schalldämm-Maß der Verglasungen zeigt nur eine geringe Variation von  $\pm 1$  dB. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es keine gravierenden Unterschiede zwischen 4v4-Systemen der unterschiedlichen Hersteller gibt. Somit sind die Verglasungen (untereinander) gut vergleichbar.

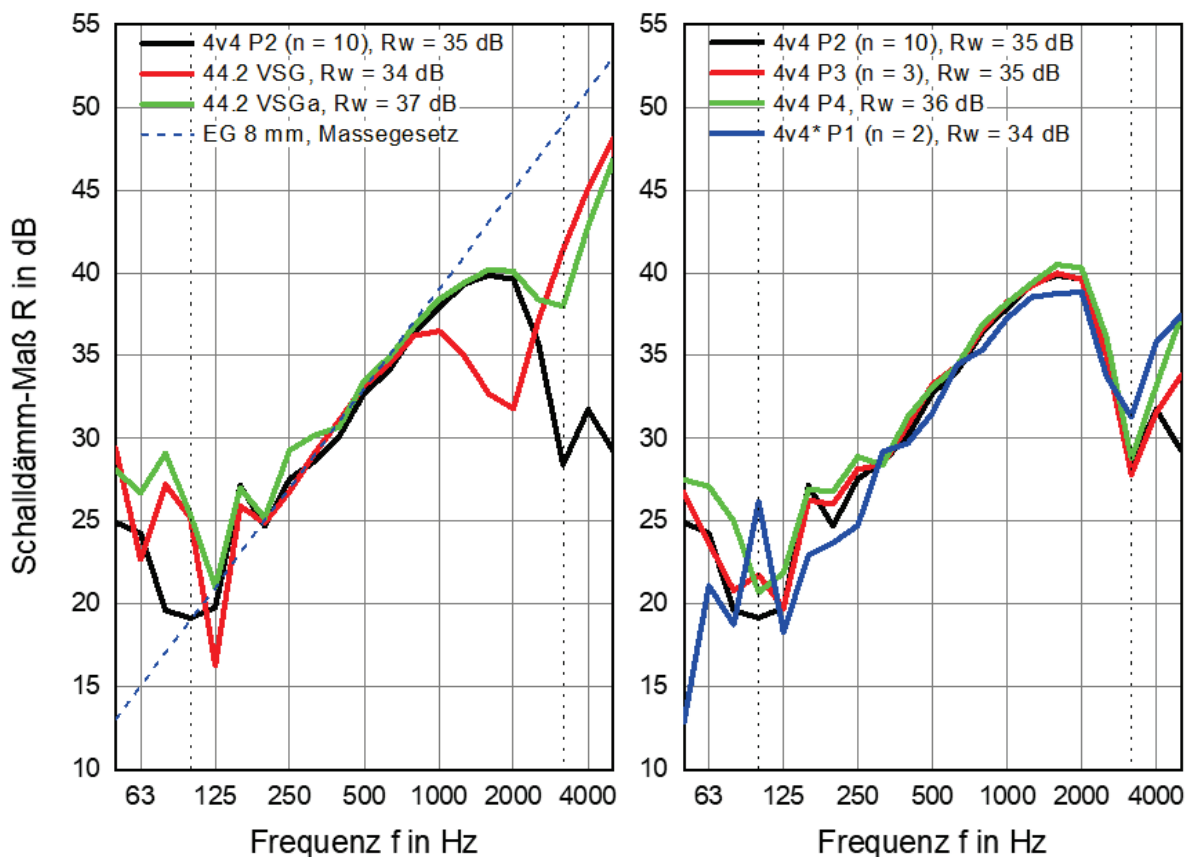


Abbildung 38: Vergleich von einem 4v4 Vakuumglas mit einem 44.2 Verbundsicherheitsglas ohne Akustikfolie (VSG) und mit Akustikfolie (VSGa) auf der linken Seite; Vergleich von 4v4 Vakuumgläsern unterschiedlicher Hersteller (Vakuumglas 4v4\* hat eine kleinere Dimension als die anderen drei Systeme) auf der rechten Seite

### 3.7.1.3. Ergebnisse der Schalldämmung von Vakuumglas zum Vergleich von symmetrischen und asymmetrischen Aufbauten

In diesem Abschnitt werden symmetrische und asymmetrische Vakuumgläser verglichen. In diesem Fall bedeutet

- symmetrisch, dass das Vakuumglas aus zwei gleichen, vorgespannten EG aufgebaut ist, wie zum Beispiel 5v5 (zwei 5 mm EG → symmetrisch) und
- asymmetrisch, dass das Vakuumglas aus zwei unterschiedlichen EG aufgebaut ist, wie zum Beispiel 4v6 (eine 4 mm EG und eine 6 mm EG → asymmetrisch).

Beide vorher angeführten Vakuumverglasungen haben eine Gesamtglasdicke von 10 mm aber mit einem unterschiedlichen Aufbau. Abbildung 39 zeigt symmetrische Vakuumgläser auf der linken und asymmetrische auf der rechten Seite.

Bei den gleichartigen Vakuumgläsern sieht man, dass mit zunehmender Flächenmasse die Schalldämmung ansteigt. Bei den Verglasungen  $\geq 5v5$  zeigt sich eine hohe Verbesserung im tieffrequenten Bereich. Die Koinzidenzfrequenzen der einzelnen Vakuumgläser bilden sich bei den verwendeten Einzelgläsern aus (vergleiche Tabelle 12). Die Koinzidenzfrequenzen, die bei den untersuchten EG gemessen wurden, passen genau zu denen der Vakuumgläser. Selbst beim Vergleich mit der EN 12758:2019 zeigen sich nur geringe Abweichungen. Vergleicht man die symmetrischen mit den asymmetrischen Systemen (siehe Abbildung 39)

1. 5v5 (links, grüne Kurve) mit 4v6 (rechts, schwarze Kurve) mit einer Gesamtglasdicke von 10 mm,
2. 6v6 (links, blaue Kurve) mit 5v8 (rechts, rote Kurve) mit einer Gesamtglasdicke von 12 mm bzw. 13 mm,

zeigen sich bei beiden Gesamtglasdicken im Frequenzverlauf nahezu keine Unterschiede. Nur beim zweiten Vergleich im Bereich der Koinzidenz, die sich leicht verschiebt, sind Unterschiede erkennbar. Ansonsten stellen sich die Koinzidenzfrequenzen nicht so ein wie erwartet. Sie liegen zwischen den Werten der zwei verwendeten EG und entsprechen somit den Werten der symmetrischen Vakuumgläsern. Durch die Verstimmung der ungleichen Aufbauten wurde eine Verringerung des Koinzidenzeinbruches erwartet. Dieser Effekt ist bei diesen Messungen nicht aufgetreten.

Die ungleich aufgebauten Vakuumgläser zeigen gegenüber analog aufgebauten VSGa (siehe Abbildung 39, rechte Seite) im Verlauf der Schalldämmung (tief- und mittelfrequent) nur geringe Abweichungen. Die größten Differenzen ergeben sich im Koinzidenzbereich. Die Einbrüche bilden sich an den gleichen Frequenzen aus, aber der Abfall ist bei der VSGa deutlich geringer. Die Differenzen der Koinzidenzeinbrüche sind:

- 4v6 von 40,0 dB auf 28,9 dB → Differenz 11,1 dB
- 46.2 VSGa von 40,5 dB auf 39,1 dB → Differenz 1,4 dB
- 5v8 von 40,3 dB auf 29,8 dB → Differenz 10,5 dB
- 58.2 VSGa von 40,8 dB auf 39,4 dB → Differenz 1,4 dB

Damit liegen die Abweichungen zwischen den Verglasungen gleicher Dicke bei ungefähr 10 dB. Dies zeigt sich auch in den bewerteten Schalldämm-Maßen, die für die VSGa Systeme um 2 dB bis 3 dB höher sind.

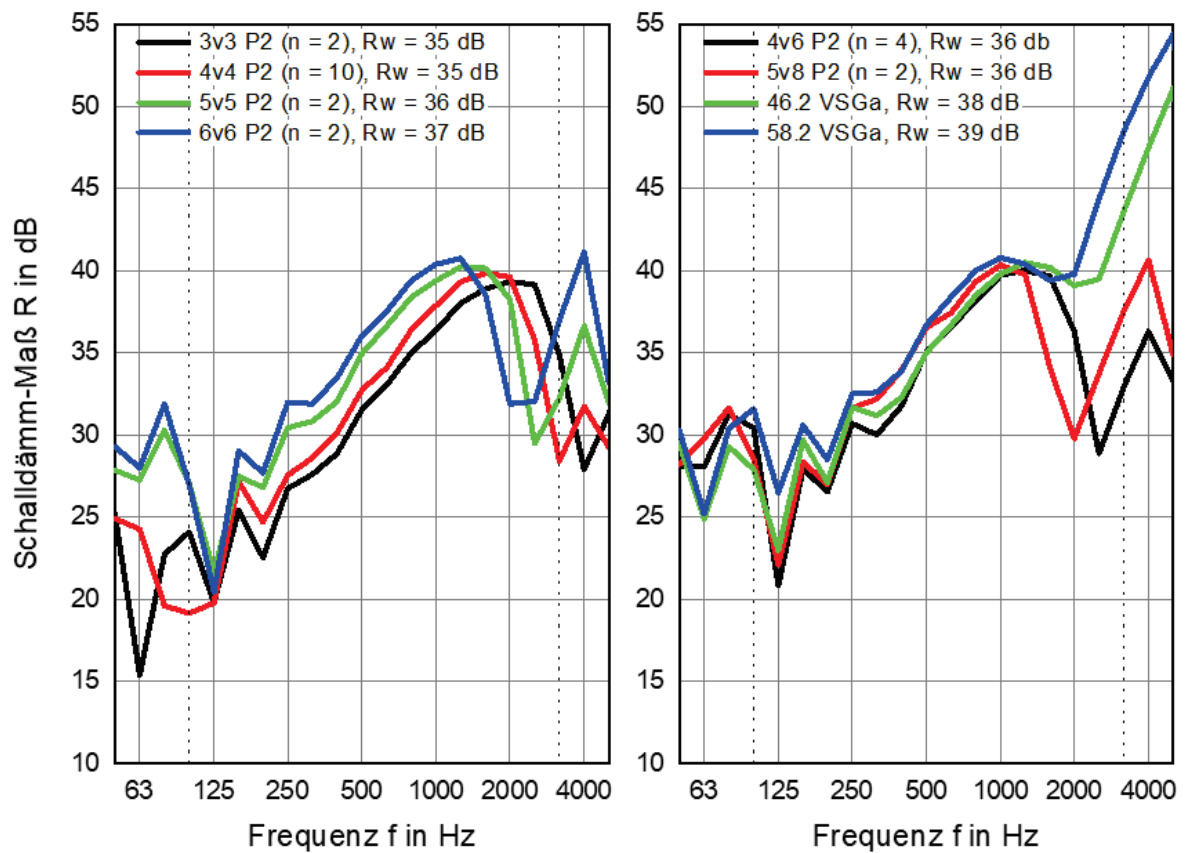


Abbildung 39: Frequenzverlauf von verschiedenen aufgebauten symmetrischen Vakuumgläsern, auf der linken Seite und verschiedenen asymmetrischen Vakuumgläsern zu vergleichbar aufgebauten Verbundgläsern mit Akustikfolie (VSGa), auf der rechten Seite (eigene Abbildung)

Tabelle 12: Übersicht der gemessenen, berechneten und abgelesenen (aus EN 12758:2019) Koinzidenzfrequenzen  $f_c$  für Einfachgläser (EG), Verbundgläser (VG) und Vakuumglas bezogen auf die Gesamtglasdicke  $d_{ges}$

$d_{ges}$	$f_c$	Verglasung			$f_c$	Verglasung	
		berechnet mit $d_{ges}$	Standard	gemessen		EN 12758:2019	Vakuum
in mm	in Hz			in Hz	in Hz		in Hz
3	4000		3 mm EG	4000	5000	--	--
4	3000		4 mm EG	3150	3150	--	--
5	2400		5 mm EG	2500	2500	--	--
6	2000		6 mm EG	2000 – 2500	2000 – 2500	3v3	4000
8	1500		8 mm EG	1600 – 2000	1600	4v4	3150
10	1200		--	--	--	5v5	2500
			--	--	--	4v6	2500
12	1000		--	--	--	6v6	2000 – 2500
13	923		--	--	--	5v8	2000
8	1500		44.2 VSG	1600 – 2000	1600	4v4	3150
			44.2 VSGa	2500 – 3150	--	4v4	3150
10	1200		46.2 VSGa	2500 – 2500	--	4v6	2500
13	923		58.2 VSGa	1600 – 2000	--	5v8	2000

### 3.7.1.4. Ergebnisse der Schalldämmung von Vakuumglas zum Vergleich von aufgespannten und laminierten Aufbauten

In diesem Abschnitt werden die Unterschiede zwischen aufgespannten (+) und laminierten (L) Vakuumgläsern herausgearbeitet. Zusätzlich werden die Gläser mit reinen Vakuumgläsern bzw. einem aufgespannten 8 mm EG verglichen. Reine Vakuumgläser sind Verglasungen die ohne weiteren Aufbau, wie Aufspannen und Laminieren, auskommen.

Abbildung 40 (auf der linken Seite) zeigt Verglasungen mit einer Gesamtglasdicke von 12 mm. Das bedeutet, alle Verglasungen haben nahezu die gleiche Flächenmasse. Es werden drei Vakuumverglasungen, eine aufgespannt, eine laminiert und eine reine Vakuumverglasung mit einem 8 mm EG, das auch mit einer 4 mm EG aufgespannt wurde, verglichen. Im tieffrequenten Bereich zeigen alle Verglasungen bis auf das aufgespannte 4v4+4 einen gut vergleichbaren Verlauf. Im mittelfrequenten Gebiet (Wirkungsbereich des Massegesetzes) sind die Schalldämmungen bis 630 Hz deckungsgleich. Danach bilden sich größere Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Koinzidenzfrequenzen aus. Am ungünstigsten fällt die aufgespannte 8+4 EG aus, wobei sich durch das Aufspannen der dünneren 4 mm EG die Koinzidenz mehr in Richtung 2000 Hz verschiebt und der Abfall gegenüber einer reinen 8 mm EG (siehe Abbildung 36) nicht mehr so stark ausgeprägt ist. Damit fällt der Anstieg der Schalldämmung nach der Koinzidenz günstiger aus und übersteigt ab 2500 Hz alle anderen Verglasungen. Das aufgespannte 4v4+4 und das reine 6v6 haben bis 1250 Hz die gleiche Schalldämmung. Aufgrund der früheren Koinzidenz der 6v6 fällt das Schalldämm-Maß bei niedrigeren Frequenzen ab. Darum erreicht die aufgespannte Verglasung 4v4+4 in diesem Bereich die höhere Schalldämmung und fällt erst danach ab. Das laminierte 4v4L4 Vakuumglas weist bis 2000 Hz die höchste Schalldämmung auf und fällt erst danach ab. Dies zeigt sich auch im bewerteten Schalldämm-Maß, welches beim laminierten System um 2 dB höher liegt als bei den restlichen drei Verglasungen.

In Abbildung 40 (auf der rechten Seite) werden ein aufgespanntes und ein laminiertes System mit einem reinen Vakuumglas verglichen. Dieses Vakuumglas 5v8 ist in der Gesamtglasdicke um 1 mm dünner als sie beiden anderen Verglasungen. Damit ist die Flächenmasse auch etwas geringer aber immer noch gut vergleichbar. Aufgrund der unterschiedlichen Glasaufbauten bildet sich der tieffrequente Bereich unterschiedlich aus. Ab 250 Hz ist der Frequenzverlauf sehr ähnlich, aber erwartungsgemäß liegt die reine 6v6-Variante etwas unter dem aufgespannten und dem laminierten System. Bis ca. 800 Hz bilden sich keine großen Unterschiede aus. Danach wirken die unterschiedlichen Koinzidenzbereiche. Bei der 6v6-Variante bildet sich bei 2000 Hz ein starker Koinzidenzeinbruch aus, der die Schalldämmung klar verringert. Das aufgespannte System verhält sich ähnlich, allerdings bildet sich die Koinzidenzfrequenz bei 2500 Hz aus. Dies liegt daran, dass bei diesem System eine Verstimmung vorliegt, da die aufgespannte EG eine andere Dicke aufweist als die symmetrische 4v4-Variante. Zusätzlich ist der Einbruch nicht so stark ausgeprägt. Damit erreichen die Schalldämm-Maße größere Werte gegenüber dem reinen 6v6-System, liegen aber immer noch deutlich unter dem laminierten System. Das laminierte Vakuumglas kann den Anstieg der Schalldämmung bis 2000 Hz nutzen. Danach folgt der Einflussbereich der Koinzidenz mit einem Einbruch bei 3150 Hz. Obwohl der Abfall stark ausgeprägt ist, liegt die Schalldämmung über den anderen beiden Systemen. Diese Unterschiede zeigen sich auch deutlich in den Einzahlwerten mit Unterschieden von 3 dB bzw. 5 dB.

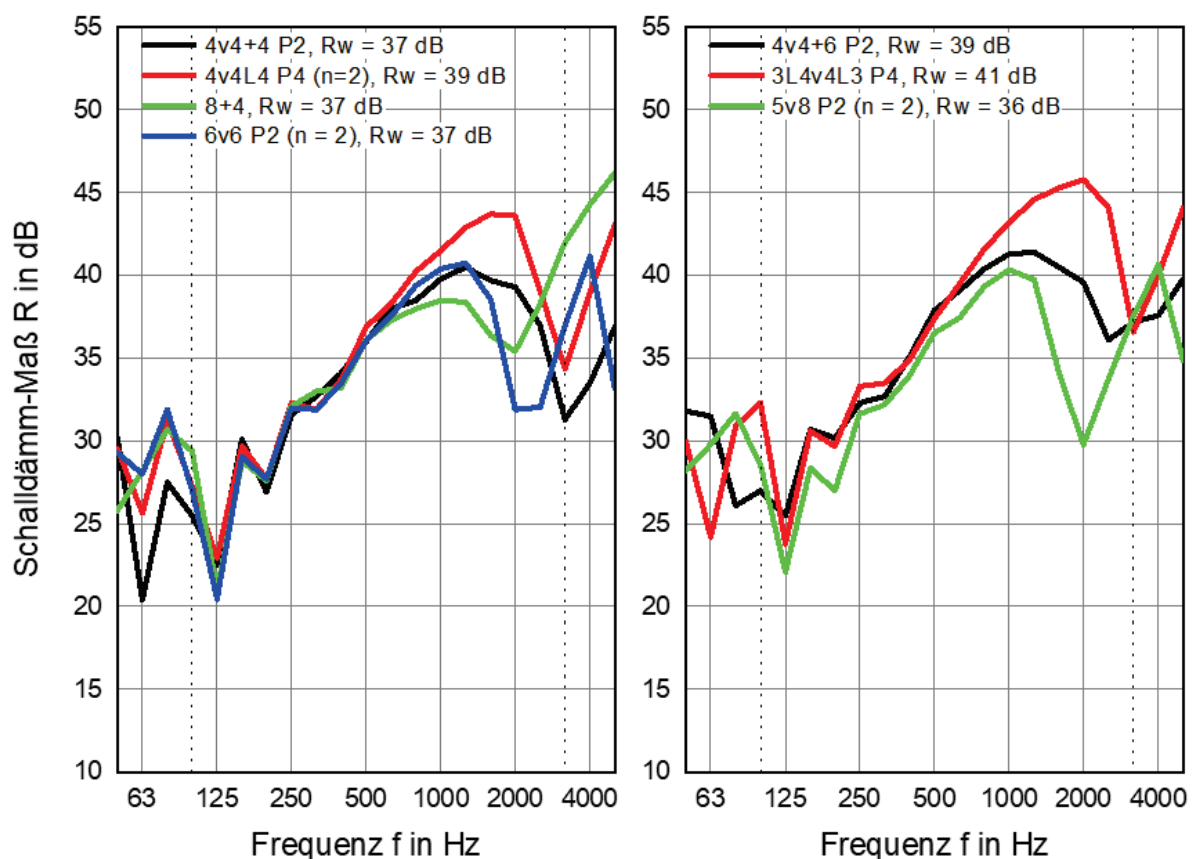


Abbildung 40: Frequenzverlauf von aufgespannten (+) und laminierten (L) 4v4 Vakuumglas zu einem gleichdicken 6v6 und einen aufgespannten (+) EG System mit einer Gesamtglasdicke von 12 mm (links); zu einem asymmetrischen 5v8 Vakuumglas mit einer Gesamtglasdicke von 14 mm bzw. 13 mm (eigene Abbildung)

In Abbildung 41 ist das Verbesserungsmaß für folgende aufgespannte und laminierte Systeme dargestellt:

- 4v4+4, 4v4L4 und 8+4 (linke Seite)
- 4v4+6 und 3L4v4L3 (rechte Seite)

Das Verbesserungsmaß wird berechnet, indem vom Schalldämm-Maß der Verglasung mit zusätzlichem Aufbau das Schalldämm-Maß der Grundverglasung ohne Zusatz abgezogen wird (siehe Gleichung 5).

$$\Delta R_w = R_w(\text{Verglasung mit Zusatz}) - R_{w0}(\text{Grundverglasung ohne Zusatz}) \quad (5)$$

Damit ergibt sich für negative  $R_w$ -Werte eine Verminderung und für positive eine Verbesserung. Die Grundverglasung war in allen Fällen ein 4v4 Vakuumglas bzw. 8 mm EG, welches mit einem weiteren EG bestückt wurden. Im ersten Fall wurde auf die Grundverglasung eine 4 mm EG aufgespannt bzw. laminiert. Abbildung 41 (links) zeigt prinzipiell für alle Grundverglasungen eine Verbesserung über den gesamten Frequenzbereich. Diese Verbesserung liegt im Allgemeinen zwischen 2 dB bis 3 dB. Eine Steigerung um mehr als 5 dB wird bei den Vakuumverglasungen in den Frequenzbändern zwischen 80 Hz und 100 Hz erreicht. So eine Verbesserung sieht man bei dem 8 mm EG im Bereich von 1250 Hz bis 2500 Hz. Im Gegensatz dazu liegt die Steigerung durch die zusätzliche 6 mm EG in den meisten Frequenzbändern bei 5 dB und mehr (siehe Abbildung 41, rechts). Für die laminierte Variante fällt die Steigerung im Bereich vom 630 Hz bis 2500 Hz nicht so hoch aus bzw. sinkt bis auf 0 dB. Je nach Modifikation (aufspannen, laminieren) und nach Dickenvariation der zusätzlichen EG bilden sich aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften spezielle Verläufe in der Schalldämmkurve aus.

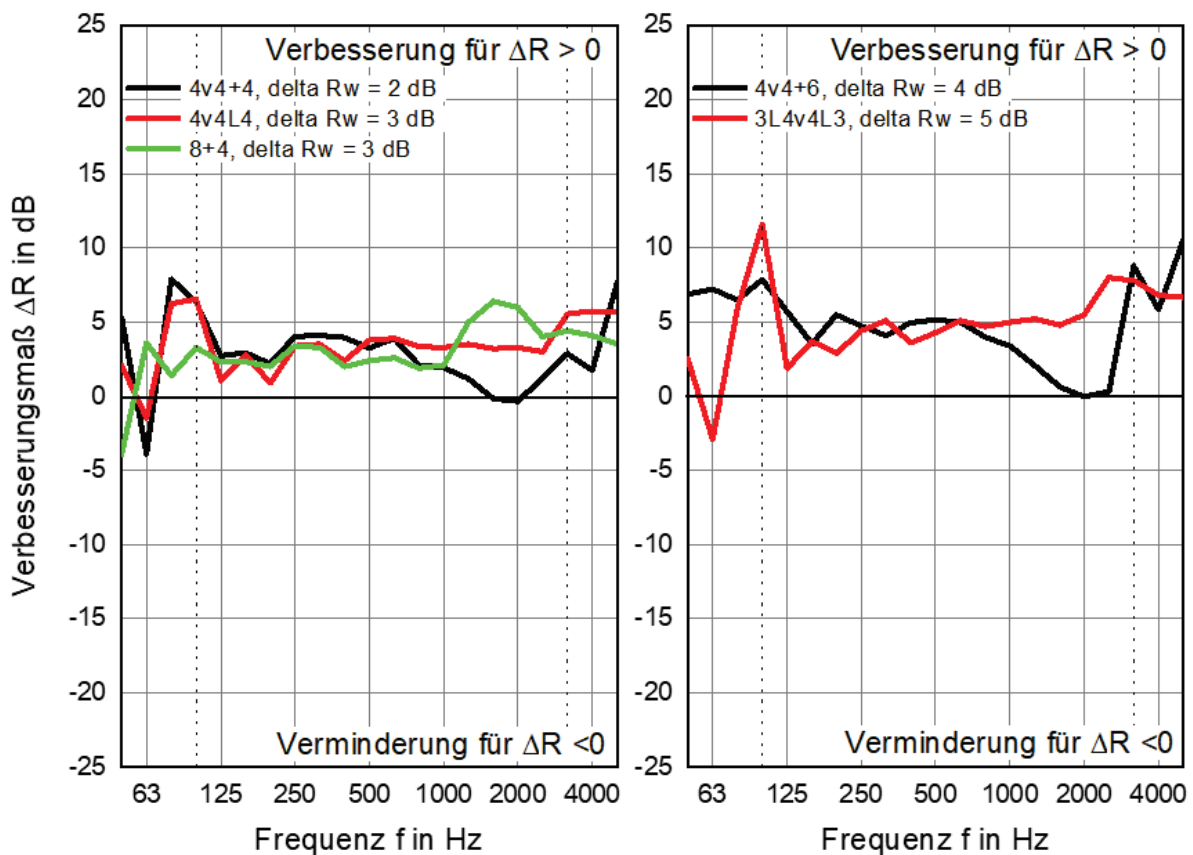


Abbildung 41: Verbesserungsmaß von den aufgespannten (+) und laminierten (L) Vakuumgläsern mit einem 4 mm EG bezogen auf das Grundglas (links); mit einem 6 mm EG bezogen auf das Grundglas (rechts) (eigene Abbildung)



### 3.7.1.5. Ergebnisse der Schalldämmung von Vakuumglas im Vergleich zu Zweischeiben-Isolierverglasungen

In diesem Abschnitt werden die Zweischeiben-Isolierverglasungen diskutiert, die in den meisten Fällen aus einem Vakuumglas und einer 44.2 VSGa (Abbildung 42, links) bzw. einer 4 EG (Abbildung 42, rechts) aufgebaut waren. Diese Aufbauten haben luftgefüllte Scheibenzwischenräume (SZR) von 8 mm und 18 mm. Diese SZR bewirken eine Veränderung im schalltechnischen Verhalten, da eine Zweischaligkeit des Bauteils erreicht wird. Das heißt, es wird (aus physikalischer Sicht) ein Masse-Feder-Masse-System konstruiert. Zum Vergleich werden für beide Aufbauarten gleichartige aufgespannte und laminierte Verglasungen (ohne SZR) benutzt, die wie ein einschaliges Bauteil wirken.

Auf der linken Seite werden 4v4 Vakuumgläser, die mit einem 44.2 VSGa kombiniert sind, einmal ohne SZR (aufgespannt) und einmal mit einem 18 mm SZR verglichen. Dabei zeigt sich, dass sich durch den SZR eine Resonanz im Bereich von 125 Hz ausbildet. In diesem Gebiet wird die Schalldämmung gegenüber der aufgespannten Variante deutlich um 7 dB reduziert. Dieser Effekt zeigt sich auch bei der Standardverglasung 8-18-44.2 VSGa. Dort liegt die Reduktion gegenüber der 4v4+44.2 VSGa bei 8 dB. Danach wird mit den Aufbauten, die einen SZR besitzen, ein Anstieg der Schalldämmung um 18 dB pro Oktave erreicht. Ab 315 Hz aufwärts übersteigen die Schalldämm-Werte der beiden Systeme die der aufgespannten Verglasung. Die Standard-Zweischeiben-Isolierverglasung zeigt im Bereich von 1250 Hz bis 1600 Hz einen Koinzidenzeinbruch, der die Schalldämmung verringert. Dieser passt nicht ganz zu dem der 8 mm EG. Dieser würde laut EN 12758:2019 eher zu einer 10 mm EG passen, das genau dort einen Einbruch aufweist. Die Zweischeiben-Isolierverglasung mit dem Vakuumglas kann den Anstieg der Schalldämmung bis zu einer Frequenz von 2000 Hz aufrechterhalten. Danach folgt der Koinzidenzbereich mit einer  $f_c$  bei 3150 Hz, der Koinzidenz einer 4 mm EG. Die teilweise großen Unterschiede in den Frequenzverläufen der Verglasungen zeigen sich kaum bei der Betrachtung der Einzahlwerte, da diese nur um max. 2 dB differieren.

In Abbildung 42 auf der rechten Seite werden Zweischeiben-Isolierverglasungen Vakuumgläsern gegenüber gestellt, die einen SZR von 8 mm und 18 mm haben. Den beiden Aufbauten stehen zwei Systeme (aufgespannt und laminiert) ohne SZR gegenüber. Es bilden sich Resonanzen bei den Aufbauten mit SZR aus, die aber aufgrund des variierenden Abstandes nicht an der gleichen Stelle liegen. Dieser Effekt wird im Abschnitt detaillierter ausgeführt. Es ist ersichtlich, dass bei der 4v4-8-4 die Schalldämmung in einem Bereich ab 160 Hz bis 1250 Hz unter den Systemen ohne SZR liegt. Die Vakuum-MIG mit dem SZR von 8 mm liegt über 1000 Hz mit den Schalldämmwerten im Bereich des laminierten VIG. Das aufgespannte Vakuumglas hat gegenüber allen anderen Verglasungen ab 1000 Hz aufwärts die geringste Schalldämmung. Die Vakuum-MIG mit dem 18 mm Abstand bildet ihre Resonanz bei 125 Hz aus, was an dem tiefen Einbruch zu erkennen ist. Danach steigt die Schalldämmung mit 18 dB pro Oktave und erreicht den höchsten Schalldämm-Wert ab 800 Hz. Ab ca. 1600 Hz stellt sich bei allen untersuchten Gläsern der Koinzidenzbereich ein. Dieser fällt aufgrund des Verglasungsaufbaus – es wurden nur 4 mm EG verwendet – relativ gleich aus. Das heißt, der Abfall ist relativ gesehen bei allen annähernd gleich und die  $f_c$  liegt bei 3150 Hz. Bei der Betrachtung der Einzahlwerte gibt es Unterschiede bis zu 5 dB. In diesem Fall erreichen die Aufbauten ohne SZR mit 37 dB bzw. mit 39 dB die höchsten bewerteten Schalldämm-Maße. Die MIG mit dem größeren SZR erreicht einen Einzahlwert von 35 dB und fällt damit 1 dB günstiger aus als die MIG mit dem kleineren SZR.

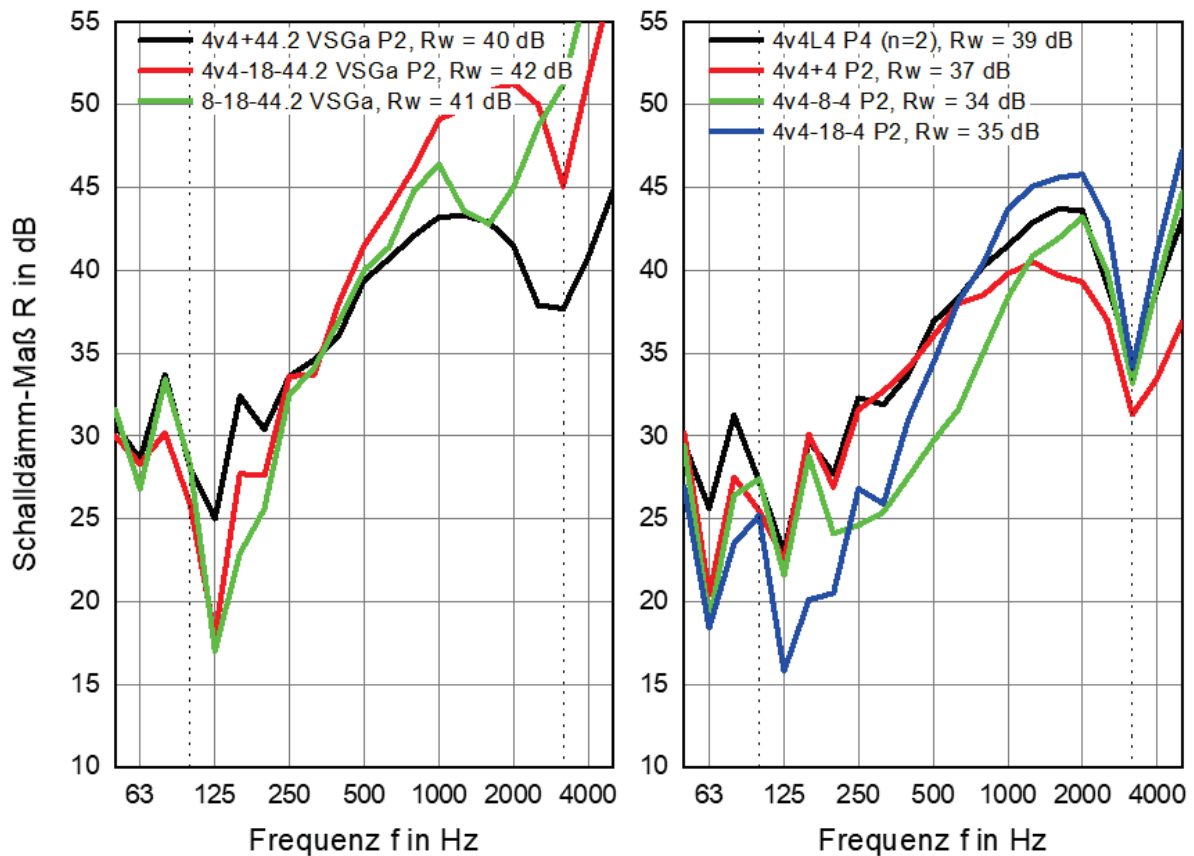


Abbildung 42: Frequenzverlauf von zwei Zweischeiben-Isolierverglasungen mit einem SZR von 18 mm im Vergleich zu einem aufgespannten (+) System, die alle mit einem 44.2 VSGa kombiniert waren (links) und zwei Zweischeiben-Isolierverglasungen mit einem SZR von 8 mm und 18 mm im Vergleich zu einem aufgespannten (+) und einem laminierten (L) System (rechts). (eigene Abbildung)

### 3.7.1.6. Ergebnisse der Schalldämmung von Vakuumglas zum Einfluss des Scheibenzwischenraumes (SZR)

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Scheibenzwischenraumes (SZR) näher untersucht. Dazu wird das Verbesserungsmaß R benutzt, welches nach Gleichung (5) berechnet werden kann. Abbildung 43 zeigt diese Differenzdarstellung für MIG-Systeme mit variierendem SZR (links) und VIG-Systeme mit variierendem SZR (rechts). Für diese Untersuchung wurden hauptsächlich klassische MIG-Aufbauten verwendet, da die Effekte durch den SZR sehr vergleichbar zu VIG sind und keine gravierenden Unterschiede gefunden wurden. Bei den MIG wurde ein Aufbau von 8-8-4 benutzt und nur der SZR mit 12 mm, 18 mm und 22 mm verändert. Dabei war die Grundverglasung eine 8 mm EG, welche von der jeweiligen MIG abgezogen wurde. Bei den VIG-Verglasungen war ein 4v4 die Grundverglasung, die abgezogen wurde. Ansonsten war der Aufbau gleich.

In Abbildung 43 links ist zu erkennen, dass sich mit steigendem SZR eine Verbesserung der Schalldämmung ergibt. Die Resonanzfrequenzen für die untersuchten Verglasungen wurden zum Vergleich berechnet und in den Diagrammen mit  $f_r$  markiert und beschriftet. Wird der SZR vergrößert, verschiebt sich die Resonanzfrequenz  $f_r$  zu tieferen Frequenzen (siehe Tabelle 13). Dies bedingt einen tieferen Einbruch der Schalldämmung im Bereich von  $f_r$ . Der Frequenzbereich, in dem dieser Effekt zu tragen kommt, wird allerdings verkleinert. Für die 8-8-4-Variante ergibt sich eine Verringerung der Schalldämmung durch den Effekt der Doppelschaligkeit von 200 Hz bis 800 Hz. Bei der 8-12-4 MIG liegt dies im Bereich von 125 Hz bis 400 Hz, dafür ist der Einbruch deutlich tiefer ausgeprägt. Im Bereich der

Koinzidenz der 8 mm EG mit 1600 Hz bis 2000 Hz ergibt sich bei allen untersuchten MIG eine deutliche Verbesserung. Im Bereich der Koinzidenz der 4 mm EG bei 3150 Hz zeigt sich auch eine Verbesserung, die aber viel geringer ist. Bei einem Blick auf die Unterschiede im Einzahlwert dieser Systeme bezogen auf die Grundverglasung (8 mm EG) werden die MIG um 1 dB bzw. 2 dB besser.

Die gleichen, vorher beschriebenen Auswirkungen zeigen sich auch bei den VIG-Aufbauten (siehe Abbildung 43, rechts). Bei einem Blick auf den Einzahlwert fällt auf, dass sich die Verglasung mit einem SZR mit 8 mm bezogen auf die Grundverglasung um 1 dB verringert. Bei einem SZR mit 18 mm wird das gleiche bewertete Schalldämm-Maß erreicht wie mit dem 4v4 Vakuumglas. Das heißt, für Zweischeiben-Isolierverglasungen mit einem Vakuumglas sollte ein SZR  $\geq 18$  mm gewählt werden, um eine Verbesserung zu erzielen.

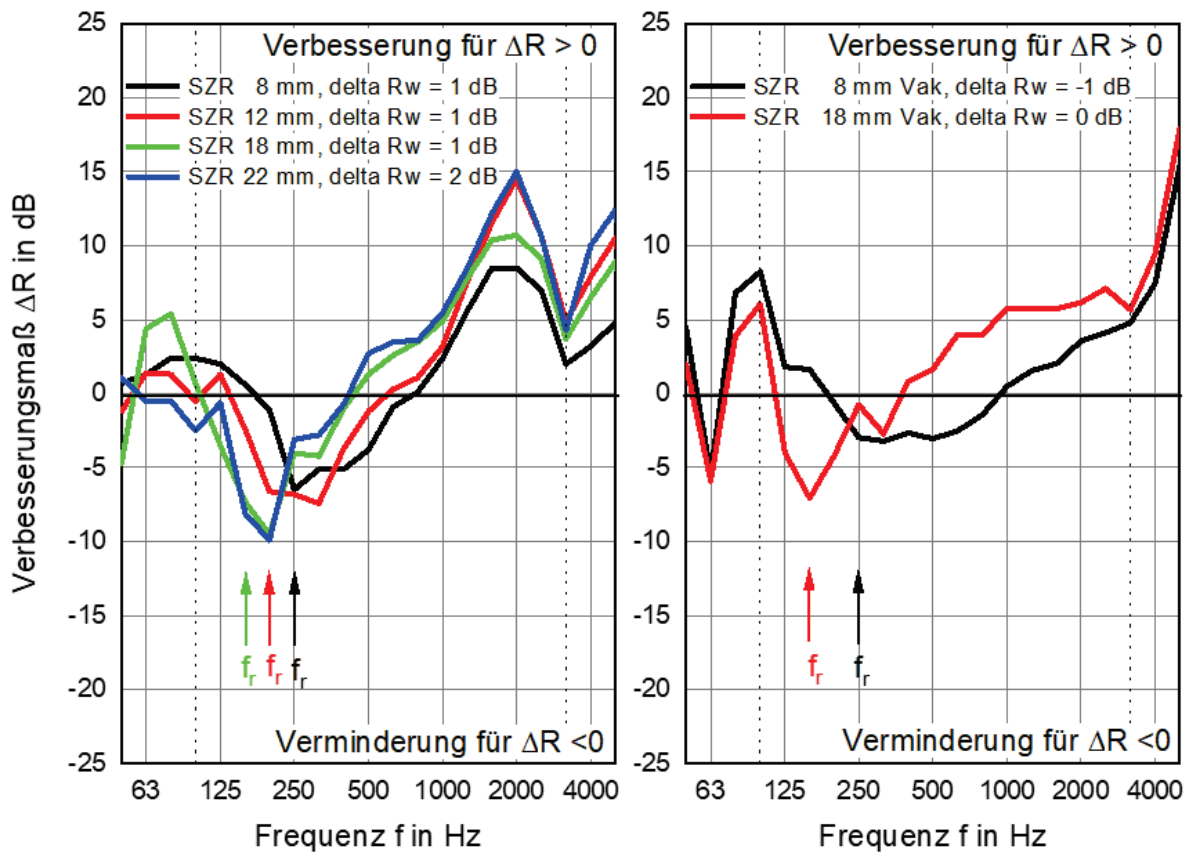


Abbildung 43: Verbesserungsmaß von Zweischeiben-Isolierverglasungen (MIG) mit variierendem SZR (links) und Zweischeiben-Isolierverglasungen (VIG) mit variierendem SZR (rechts). (eigene Abbildung)

Tabelle 13: Übersicht der errechneten und gemessenen Resonanzfrequenzen  $f_r$  von den untersuchten Zweischeiben-Isolierverglasungen für MIG und VIG

Verglasung	SZR	Art	gemessen	abgelesen
			$f_r$	$f_r$
	in mm		in Hz	in Hz
8-8-4	8	MIG	260	260
8-12-4	12		212	200
8-18-4	18		173	200
8-22-4	22		157	200
4v4-8-4	8	VIG	260	250
4v4-18-4	18		157	160

### 3.7.1.7. Ergebnisse der Schalldämmung von Vakuumglas – Übersicht der bewerteten Schalldämm-Maße $R_w$ und Spektrum-Anpassungswerte C und $C_{tr}$ :

In Tabelle 14 werden die Einzahlwerte  $R_w$  und die Spektrum-Anpassungswerte C und  $C_{tr}$  der gemessenen Verglasungen zusammengefasst. Zusätzlich wird die Anpassung für Straßenverkehrslärm ( $R_w + C_{tr}$  oder  $R_{A,tr}$ ) angegeben. Die Bedeutung dieser Kenngrößen ist in Deutschland sehr gering und wird gemäß DIN 4109 noch nicht gefordert. In anderen europäischen Ländern sind diese Werte von größerer Bedeutung. Hier wird das bewertete Schalldämm-Maß mit Bezugnahme des Straßenverkehrslärms gefordert. Dies ist vor allem in Frankreich der Fall. In anderen europäischen Ländern wie Österreich und der Schweiz wird die Schalldämmung auf ein normiertes Straßenverkehrsspektrum bezogen und dies als Anforderung gestellt. Anhand eines normierten Straßenverkehrsspektrums wird der Anpassungswert  $C_{tr}$  festgelegt. Im Fokus steht die Schalldämmung im tieffrequenten Bereich, somit wird dieser Bereich stärker berücksichtigt gegenüber dem Anpassungswert C. Im Allgemeinen ist das Schalldämm-Maß einer Verglasung bei tiefen Frequenzen geringer, was zu einer Minderung des Einzahlwertes unter Einbezug von  $C_{tr}$  führt.

Bei Mehrscheiben-Isolierglas (MIG und auch VIG) prägt sich durch die Zwei- bzw. Dreischaligkeit eine Resonanz im Bereich von 200 Hz aus. Das war auch bei den hier untersuchten MIG- und VIG-Systemen der Fall. Diese ergibt sich aus der Koppelung der beiden Scheiben über die eingeschlossene Luftschicht (Masse-Feder-Masse-System). Diese Doppelscheibenresonanz verursacht eine verminderte Schalldämmung in diesen Frequenzbändern. Somit wird der  $C_{tr}$  größer und der Einzahlwert (bei Berücksichtigung) niedriger gegenüber Einfachgläsern (EG).

Das ift Rosenheim gibt für luft- und argongefüllte MIG Systeme (abhängig vom Scheibenaufbau) einen  $C_{tr}$ -Bereich von -4 dB bis -7 dB an (Hessinger und Saß 2020). Die hier untersuchten MIG- und VIG-Aufbauten liegen mit ihrem Anpassungswert für Straßenverkehrslärm in diesem Bereich. Bei gleichem Verglasungsaufbau konnten keine Unterschiede zwischen MIG- und VIG-Systemen gefunden werden. Im Gegensatz dazu liegen die untersuchten Vakuumgläser, Einfachgläser (EG) und Verbundgläser (VG) in einem Bereich von -2 dB bis -4 dB. Somit sind diese im Allgemeinen etwas geringer.

Tabelle 14: Zusammenfassung der bewerteten Schalldämm-Maße und Spektrum-Anpassungswerte  $C$  und  $C_{tr}$ , die bei den Messungen der untersuchten Verglasungen im bewerteten Frequenzbereich ermittelt wurden. Zusätzlich wird die Anpassung für Straßenverkehrslärm ( $R_w + C_{tr}$  oder  $R_{A,tr}$ ) angegeben und Vergleichswerte aus der EN 12758:2019 genannt. Bei den MIG- und VIG-Aufbauten wird auch der Scheibenzwischenraum (SZR) angeführt.

Verglasung	SZR in mm	Art	gemessen		EN 12758:2019		Bemerkung
			$R_w$ (C; $C_{tr}$ ) in dB	$R_{A,tr}$ in dB	$R_w$ (C; $C_{tr}$ ) in dB	$R_{A,tr}$ in dB	
3 mm	--		29 (-1; -4)	25	28 (-1; -4)	24	
4 mm	--		30 (-2; -3)	27	29 (-2; -3)	26	
5 mm	--	EG	31 (-2; -2)	29	30 (-1; -2)	28	
6 mm	--		32 (-2; -3)	29	31 (-2; -3)	28	
8 mm	--		34 (-2; -3)	31	32 (-2; -3)	29	
44.2 VSG	--		34 (-1; -3)	31	33 (-1; -3)	30	
44.2 VSGa	--	VG	37 (-1; -4)	33	--	--	
46.2 VSGa	--		38 (-1; -3)	35	--	--	
58 VSGa	--		39 (0; -2)	37	--	--	
3v3 P2(n = 2)	--		35 (-1; -4)	31	--	--	
4v4* P1 (n = 2)	--		34 (-2; -4)	31	--	--	
4v4 P2 (n = 10)	--		35 (-2; -4)	31	--	--	
4v4 P3(n = 3)	--		35 (-2; -3)	32	--	--	
4v4 P4	--	Vakuumglas	36 (-2; -4)	32	--	--	
5v5 P2 (n = 2)	--		36 (-2; -2)	34	--	--	
4v6 P2 (n = 4)	--		36 (-2; -3)	33	--	--	
6v6 P2 (n = 2)	--		37 (-2; -3)	34	--	--	
5v8 P2 (n = 2)	--		36 (-2; -2)	34	--	--	
8+4	--	aufgespannt	37 (-1; -3)	34	--	--	
4-18-4	18		30 (-1; -5)	25	29 (-1; -4)	25	4-(6 bis 16)-4
8-8-4	8		35 (-2; -4)	31	34 (-2; -4)	30	8-(6 bis 16)-4
8-12-4	12		35 (-2; -6)	29	34 (-2; -4)	30	8-(6 bis 16)-4
8-18-4	18	MIG	35 (-2; -7)	28	--	--	
8-22-4	22		36 (-3; -7)	29	--	--	
8-18-44.2 VSG	18		36 (-2; -5)	31	37 (-2; -5)	32	VG 8-6bis16-4-6bis16-8 VG
8-18-44.2 VSGa	18		41 (-3; -7)	34	--	--	
4v4+4	--	aufgespannt	37 (-1; -2)	35	--	--	
4v4+6	--	aufgespannt	39 (-1; -3)	36	--	--	
4v4+44.2	--	aufgespannt	40 (-1; -3)	37	--	--	
4v4L3	--	laminiert	39 (-2; -4)	35	--	--	
4v4L4	--	laminiert	39 (-2; -4)	35	--	--	
3L4v4L3	--	laminiert	41 (-2; -4)	37	--	--	
4v4-8-4	8		34 (-1; -3)	31	--	--	
4v4-18-4	18	VIG	35 (-1; -5)	30	--	--	
4v4-18-44.2 VSG	18		41 (-2; -7)	34	--	--	
4v4-18-44.2 VSGa	18		42 (-2; -7)	35	--	--	

Verglasungen werden normativ mit der Dimension  $1230 \times 1480 \text{ mm}^2$  geprüft. Darum ergibt sich mit einem Nachweis über die Dimension kein Einfluss auf das Schalldämm-Maß. Bekannt ist aber, dass durch unterschiedliche Formate das Schalldämm-Maß und die Spektrum-Anpassungswerte variiert werden können. Prinzipiell können vier Parameter den  $C_{tr}$ -Wert von Verglasungen ändern (Hessinger und Saß 2020):

- Masse: Bei tiefen Frequenzen kann eine höhere Schalldämmung mittels größerer Masse erzielt werden. Im Fall von Verglasungen wird dies mit größeren Glasdicken erreicht. Dadurch wird aber gleichzeitig die Biegesteifigkeit vergrößert und die Schalldämmung wird im mittel- und hochfrequenten Bereich nicht besser.
- Scheibenzwischenraum (SZR): Wird der SZR vergrößert, bewegt sich die Doppelscheibenresonanz zu tieferen Frequenzen. Dieser Effekt wirkt sich im Allgemeinen günstig auf die Schalldämmung aus.
- Verbundglas (VG): Werden bei VG Folien mit akustischen Eigenschaften benutzt, wird das Schalldämm-Maß im Frequenzbereich von 100 Hz bis 5000 Hz positiv beeinflusst.

Gasfüllung im SZR: Unterschiedliche Gasfüllungen (Luft, Argon,  $\text{SF}_6$  oder Krypton) haben unterschiedliche Einflüsse auf das Schalldämm-Maß. Diese Einflüsse sollen hier nicht tiefergehend ausgeführt werden. Prinzipiell ist es aber so, dass Luft- und Argon-Füllungen tieffrequent eher günstiger ausfallen und nach der Doppelscheibenresonanz (mittel- und hochfrequent) ungünstiger gegenüber  $\text{SF}_6$  und Krypton liegen.

### 3.7.2. Schallschutz von Vakuumglasfenster

Im vorherigem Kapitel 3.7.1 wurden die akustischen Eigenschaften von Verglasungen beschrieben und die Ergebnisse präsentiert. Für die Anwendung in der Praxis ist es wichtig zu wissen, wie sich die Schalldämmwerte der Verglasung in einer Fensterkonstruktion verhalten. In diesem Kapitel werden die akustischen Eigenschaften der Verglasungen in Bezug auf Fensterelemente untersucht. Dafür wird ein neu entwickeltes Fenster mit zwei Verglasungen untersucht – einer 44.2 VSG Verglasung (siehe Abbildung 44, links) und einer 4v4 Vakuumverglasung (siehe Abbildung 44, rechts). Zusätzlich wird das Verbesserungsmaß in Abbildung 45 dargestellt, um die Veränderungen besser sichtbar zu machen.

Betrachtet man die Diagramme, wird ersichtlich, dass es im Frequenzverlauf zwischen den Fenstern und der Verglasung nur geringe Unterschiede gibt. Die größten Verbesserungen bezogen auf die Verglasungen gibt es im tieffrequenten Bereich. Das liegt vermutlich an der etwas höheren Flächenmasse des Fensters mit Verglasung. Zusätzlich wird die Biegesteifigkeit der Verglasung beeinflusst, da die Verglasung kleiner ist bzw. im Flügel befestigt wird. Damit kann festgehalten werden, dass es Veränderungen im schalltechnischen Verhalten der Verglasungen im Fenster gibt. Diese fallen in den untersuchten Aufbauten klein aus. Bei Betrachtung der Einzahlwerte verbessert sich das Fenster gegenüber der Verglasung mit der 44.2 VSG um 2 dB. Für die 4v4 Vakuumverglasung gibt es keine Verbesserung gegenüber dem Fenster.

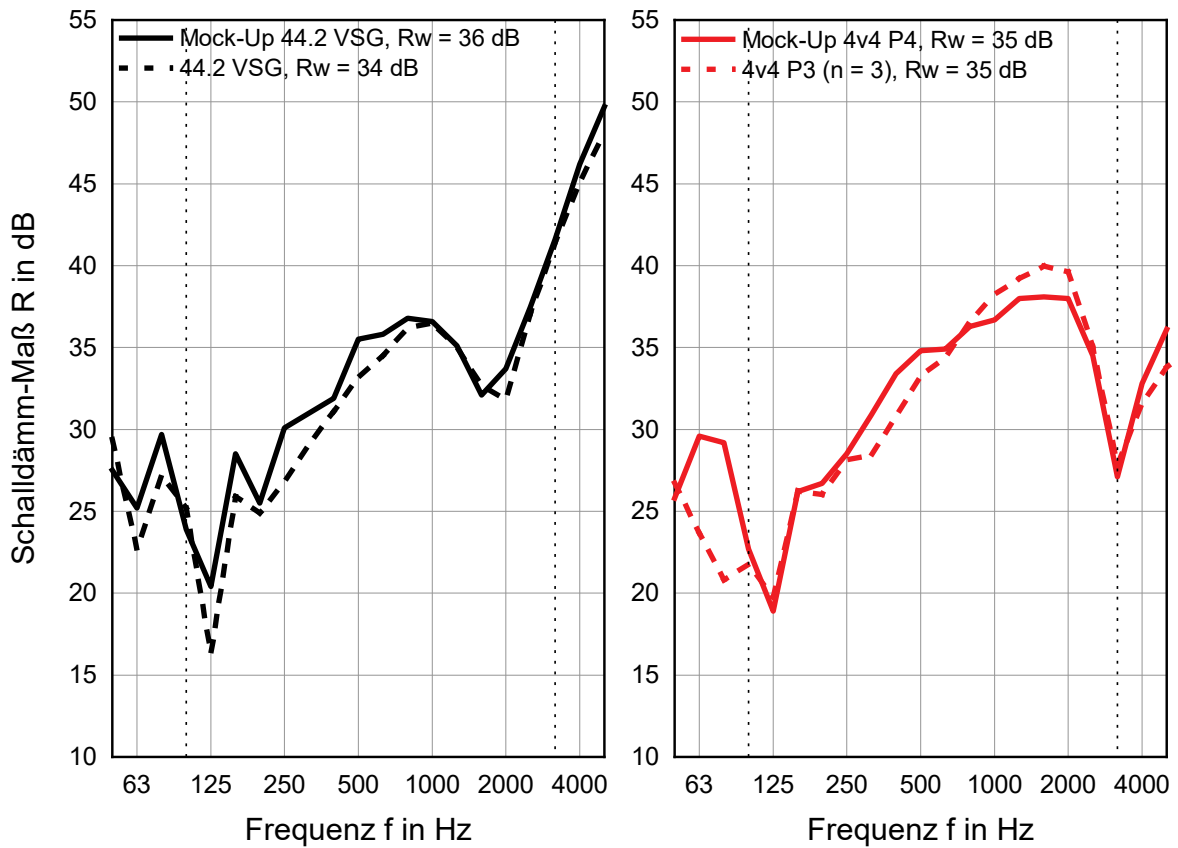


Abbildung 43: Frequenzverlauf des Schalldämm-Maßes für ein neu entwickeltes Fenster mit einer 44.2 VSG bezogen auf die reine Verglasung (links) und mit einer 4v4 bezogen auf die reine Verglasung (rechts). (eigene Abbildung)

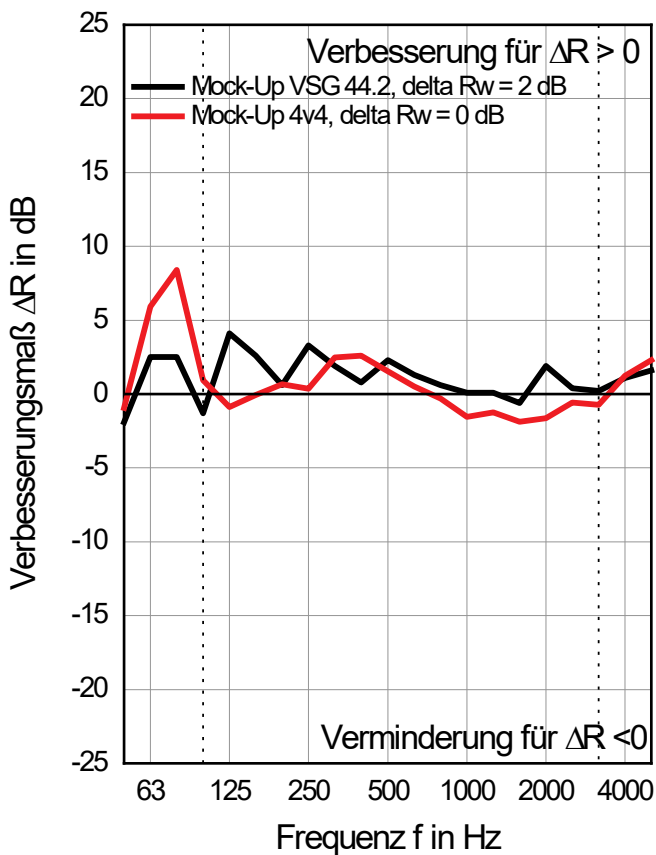


Abbildung 44: Verbesserungsmaß des untersuchten Fensters mit der 44.2 VSG und der 4v4 Verglasung (eigene Abbildung)

In der Literatur (Hessinger und Saß 2020) wurde eine Analyse aus Laborprüfungen (siehe Abbildung 46) durchgeführt. Dabei wurden Einfachfenster mit Dreischeiben-Isolierverglasungen den Schalldämm-Maßen der reinen Verglasung gegenübergestellt. Diese Auswertung zeigt, dass es eine grundsätzliche Abhängigkeit zwischen der Schalldämmung der Fensterkonstruktionen von der Schalldämmung der Dreischeiben-Isolierverglasungen gibt. Dies kann auch anhand der hier untersuchten Fenster bestätigt werden. Es liegen allerdings Streuungen der Schalldämm-Werte aufgrund von Konstruktionsmerkmalen wie Rahmenmaterialien, Anzahl und Wirkung der Falzdichtungen, Formate genauso wie Produktschwankungen etc. vor. Diese Einflüsse sind zu vielfältig, um sie im Rahmen dieses Forschungsprojektes zu untersuchen. Die Auswertung zeigt aber, dass das Verhalten der Prognosewerte aus DIN 4109-35 bzw. der Produktnorm DIN EN 14351-1 gut abgebildet wird.

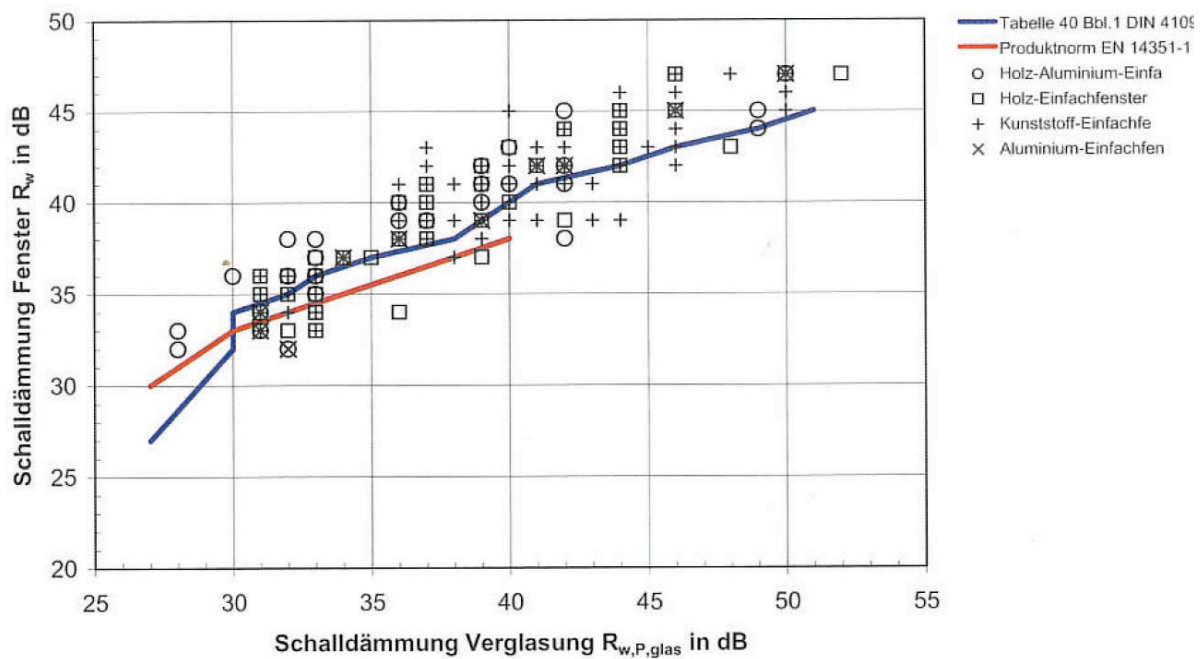


Abbildung 45: Schalldämmung von Einfachfenstern mit Dreischeiben-Isolierverglasungen als Funktion der Schalldämmung der Verglasung (Hessinger und Saß 2020)



## 4. Schlussfolgerungen

Aus den Forschungs- und Entwicklungsbemühungen des Projektes FIVA lassen sich einige spezifische Erkenntnisse ableiten. Nachstehend wurde versucht, dies jeweils einem thematischen Bereich zuzuordnen.

### **Thema Vakuumglas (und dessen Performance)**

In den zahlreichen thermischen Simulationen und Versuchen, die im Rahmen des Projektes gemacht wurden, konnte die Faustregel von einem erforderlichen 40 mm Glaseinstand am jeweiligen Glasrand, um Kondenswasser-Freiheit am Randverbund zu sichern, als gute Annäherung identifiziert werden. Im Zweifelsfall ist dennoch in jedem Fall eine thermische Simulation durchzuführen, um Kondenswasser-Freiheit sicherzustellen.

Eine weitere Faustregel für das Konstruieren von Fenstern mit Vakuumglas mit aufgeklebten Flügelrahmenkonstruktionen ist die Anordnung / das Aufkleben des Vakuumglases eher auf der Außenseite des Flügelrahmens, denn auf der Innenseite (dabei ist die Scheibe auf die gesamte Flügelbreite zu applizieren). Dies ist analog zur Anordnung von Wärmedämmung in opaken Bauteilen zu verstehen: Die Schicht mit dem größten Temperaturabfall bzw. dem größten Wärmedämmeffekt soll möglichst weit außen angeordnet werden.

Hinsichtlich des Schallschutzes konnte festgestellt werden, dass Vakuumglas tendenziell besser performt als vergleichbares Isolierglas. Zum Beispiel weist ein leichtes Vakuumglas mit dem Aufbau 3/v/3 ein bewertetes Schalldämmmaß  $R_w$  von etwa 35 dB auf. Mit entsprechenden Glasaufbauten können Werte bis  $R_w$  42 dB erreicht werden.

### **Fensterkonstruktionen mit Vakuumglas**

Anhand der beiden Faustregeln aus der obigen Sektion lässt sich folgendes Statement für die Fensterkonstruktion ableiten: Aus technischen und ästhetischen Gründen erscheint eine Applikation von energieeffizienten Vakuumgläsern in Standardrahmenkonstruktionen für Mehr-Scheiben-Isoliergläser bei neuen Fenstern nicht sinnvoll (für schützenswerte, baukulturell wertvolle Bestandskonstruktionen gilt dieser Satz nicht, hierzu siehe FFG-Projekt VAMOS, FFG-Projekt-Nummer: 878272).

Bei den Prototypen, die in FIVA entwickelt wurden, wurde betreffend die Beschläge entschieden, auf mechatronische Komponenten zu setzen: Dies war einerseits erforderlich, um die innovativen Öffnungsszenarien verwirklichen und die teilweise implementierten Lüftungsstellungen realisieren zu können, andererseits spielte der Bedienungskomfort der Fenster eine große Rolle. Die Beschläge wurden entgegen der allgemein heute üblichen Praxis nicht im Flügelrahmen, sondern jeweils im Stockrahmen platziert. Dies bringt einige Vorteile mit sich, wie zum Beispiel der Verzicht auf die Stromübergabe vom Stock zum Flügel über die Beschlagskomponenten. Mit dieser Anordnung der Beschlagskomponenten sind eine Reihe von Herausforderungen verbunden, wie der Platzbedarf der Beschläge unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Vermeidung von Wärmebrücken, die Kabelführung bzw. Verkabelung und die Zugänglichkeit für Wartung und Reparatur. Ein Lösungsansatz hierzu war ein vierseitig umlaufender Kabelkanal zur flexiblen Integration sowohl von Beschlagsteilen, wie auch den erforderlichen Verkabelungen.

Zusammenfassend können folgende Aussagen über die erfolgten Konstruktionen getätigt werden (und gewissermaßen als Empfehlung für weiterführende Entwicklungsarbeiten verstanden werden):

Hinsichtlich der Dimensionierung ist die Stockkonstruktion durch die Beschlagskomponenten und die Flügelkonstruktion durch das Vakuumglas determiniert.

Für zukünftige Entwicklungen ist hinzuzufügen, dass alle potenziellen thermischen Schwachstellen im Detail zu untersuchen sind.

Hinsichtlich der thermischen Performance der Fensterprototypen ist festzuhalten, dass sehr niedrige  $U_w$ -Werte (bis zu  $0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) mit entsprechenden Vakuumgläsern errechnet werden konnten ( $U_g$  des Vakuumglases  $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Da die aktuelle Normung für die Berechnung von U-Werten von Fenstern mit Vakuumglas und geklebten Scheiben keine angepassten Rechenverfahren bietet, bleibt zu betonen, dass diese U-Wert-Angaben als Annäherung zu verstehen sind.

Im Folgenden werden die einzelnen Fensterprototypen zusammenfassend beschrieben:

- Das raumseitig flächenbündige, nach innen öffnende Dreh-Fenster überzeugte aus architektonisch ästhetischer Sicht (flächenbündige Ganzglasoptik mit Schattenfuge), durch automatisiertes Lüften, mit der traditionellen Öffnungsweise nach innen und der Applikationsmöglichkeit eines außenliegenden Sonnenschutzes. Herausfordernd erscheint die wärmeschutztechnische Optimierung bei innen applizierter Vakuumglasscheibe und die Integration der Beschlagskomponenten in die Gesamtkonstruktion.
- Das nach außen öffnende Parallel-Abstell-Dreh-Fenster zeigt Besonderheiten in Bezug auf die mögliche Lüftung (paralleles Abstellen des Flügels von ca. 60 mm) bei gleichzeitigem funktionstüchtigen, außenliegenden Sonnenschutz. Die passgenaue Positionierung, Montage und Verkabelung der Beschläge wurde durch einen Kabelkanal gelöst. In Österreich hat das nach außen öffnende Fenster keine Tradition, wodurch möglicherweise die Kundenakzeptanz leidet.
- Bei dem Schwing-Klapp-Fenster wurde auf eine innovative und ungewohnte Öffnungsbewegung gesetzt, die eine ganze Reihe von funktionellen Vorteilen bietet, wie z.B. den Verzicht auf bewegliche Schließteile. Gleichzeitig zeigte die Befragung möglicher Nutzer die geringste Kundenakzeptanz, wobei anzumerken ist, dass bis zur Serienreife dieses Prototyps noch weitere essentielle Entwicklungsschritte notwendig sind und auf verbesserte Kundenakzeptanz hingearbeitet werden sollte.
- Das innovative Konzept des Abstell-Schiebe-Fensters überzeugte sowohl die FachexpertInnen, als auch VertreterInnen der potentiellen EndkundInnen („Wohnende“) in mehrfacher Hinsicht: insbesondere die klare Ästhetik, die einfache Bedienung, die Parkposition des geöffneten Flügels vor der Wand und die Möglichkeit der Nutzung der gesamten Tiefe der Fenster/Wandleibung stechen besonders hervor. Noch nicht zufriedenstellend gelöst ist die Integration des außenliegenden Sonnenschutzes. Auch die Weiterentwicklung an den Teleskopschienen hinsichtlich einer verbesserten Technologie, welche auf die Anforderungen von Fenstern (Witterungseinwirkung, Anzahl der Bewegungszyklen, Windlasten im geöffneten Zustand) Rücksicht nimmt, ist notwendig.

Eine weitere Erkenntnis aus dem Projekt, die aus mehreren Gründen für die vier Prototypen nicht weiterverfolgt wurde, war die Entwicklung einer Vakuumdichtung. Durch Erzeugung eines Unterdrucks im Hohlprofil der Dichtung wird deren Volumen so reduziert, dass der Fensterflügel zum Öffnen frei

gegeben wird. Damit ergeben sich völlig neue Möglichkeiten bei der Umsetzung von z. B. Schiebefenstern.

Weiterentwicklungen der vorgestellten Prototypen sind auf jeden Fall unter Partizipation potentieller Kundenkreise durchzuführen, um auf die Anforderungen der EndkundInnen hinzuarbeiten. Die bereits durchgeführten Befragungen zeigten, dass sich das Abstell-schiebe- und das nach innen öffnende Fenster hoher Kundenakzeptanz erfreuen, während beim Schwing-Klapp-Fenster und dem nach außen öffnenden Fenster noch Verbesserungspotential besteht.

### **Zusammenfassung**

Das Projekt FIVA hat gezeigt, dass die kritische Notwendigkeit zum holistischen Überdenken der Gesamtkonstruktion „Fenster“ bei der Integration von Vakuumglas besteht. Als solches wurde die Innovation der Vakuumgläser als Einladung zur Entwicklung einer neuen, disruptiven Fensterkonstruktion verstanden. Substanzielles Umdenken in der Branche wird in näherer Zukunft notwendig werden, um die österreichische Technologieführerschaft abzusichern. Dabei können Anleihen an den Branchen „Tür“ und „Fassade“ genommen werden, sowie auch die notwendigen Qualifikationsprofile von involvierten MitarbeiterInnen von klassischen Fensterbauern aus dem Holz/Tischlerbereich zu Mechatronikern und Elektronik/Elektrik-Experten erstreckt werden müssen.

Die Detailergebnisse liegen allen Projektpartnern vor, wurden in acht Projektmeetings ausführlich präsentiert und diskutiert und haben bereits Eingang in die aktuellen F&E Bemühungen der Firmen gefunden. Darüber hinaus wurden Folgeprojekte, welche die unterschiedlichen Entwicklungen weiter vorantreiben sollen, angedacht. Insbesondere das Abstell-Schiebe-Fenster soll in einem gemeinsamen Folgeprojekt der Projektpartner weiterentwickelt und marktauglich gemacht werden.

Die Ergebnisse sind für die gesamte Fenster-, Türen-, Beschlags- und Glasbranche von höchstem Interesse und wurden bereits mehrfach publiziert und die Prototypen in einer Sonderschau präsentiert. Das Feedback war enorm und fand auch entsprechenden Niederschlag in der Fachpresse. Insgesamt wurde mit diesem Projekt ein wichtiger Impuls für die gesamte Fensterbranche gegeben und die Innovationskraft und Technologieführerschaft Österreichs auf diesem Gebiet eindrucksvoll sichtbar gemacht.

## 5. Ausblick und Empfehlungen

Die vielversprechenden, positiven Ergebnisse in Bezug auf die Verwendung von Vakuumglas und der Entwicklung einer neuen Fenstergeneration halten dazu an, diese Forschungsinitiative fortzuführen. Das gesamte Forschungskonsortium, bestehend aus zwei Forschungsinstituten, fünf Fensterherstellern und zwei Zulieferbetrieben sind übereinstimmend zu dem Schluss gekommen, die Prototypenentwicklung jedenfalls weiter voranzutreiben.

Folgende weiterführenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind avisiert, bzw. wurden zum Teil bereits eingeleitet:

- Die FH Bern / Schweiz hat gemeinsam mit der Fa. MACO und anderen ein grenzüberschreitendes Innosuisse-Forschungsprojekt „M-Window“ aufgesetzt, bei dem durch einen innovativen Fensterbeschlag die Digitalisierung von Fenstersystemen für den Endverbraucher ermöglicht werden soll. **Das Beschlagsschema aus dem Prototyp A bildet hier die Grundlage und soll bis zur Serienreife vorangetrieben werden.**
- Dem **Prototyp D, dem Abstell-Schiebe-Fenster**, wird vom Projektkonsortium das größte Innovationspotential zugeschrieben. Das betrifft sowohl die technische Umsetzbarkeit und Leistungsperformance als auch die Kundenakzeptanz und gestalterische Ausformung. Für den Herbst 2020 ist ein Sondierungsgespräch hinsichtlich eines sich dieser Thematik widmenden Folgeprojektes geplant. Wesentliche Aspekte eines solchen Projektes sind die Steuerung, Integration in die Gebäudeautomation, sowie die Entwicklung entsprechender, für die Verwendung in Fenstern geeigneter Teleskopschienen und Antriebssysteme.
- In diesem Kontext besteht auch großes Interesse, ein Demonstrationsbauwerk mit entsprechenden Fensterkonstruktionen auszustatten, um die Konstruktion hinsichtlich technischer Umsetzbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Abschwächung von sommerlicher Überwärmung (Nachtlüftung), Integration in bestehende Gebäudeautomationsroutinen, Motorisierung und Steuerung zu erforschen. Bei allen Konstruktionsprototypen stellen sowohl die Integration in den Bauablaufs-Prozess sowie eine Langzeitbeobachtung im Einbauzustand spannende F&E-Bemühungen dar, welche im Interesse des Konsortiums von FIVA liegen.
- Aufgrund der immer größer werdenden Glasflächen ist das Thema Schallschutz weiterhin von größtem Interesse, nicht nur in Bezug auf den Einsatz von Vakuumglas, und soll in weiterführenden F&E Projekten tiefergehend behandelt werden.
- Eine Potentialstudie über die Marktgängigkeit (betreffend das Interesse der EndkundInnen und ArchitektInnen/PlanerInnen) der innovativen Fensterprototypen würde einen weiteren Schritt Richtung Marktreife bedeuten.

Die Bemühungen im FIVA Projekt haben die Notwendigkeit unterstrichen, Simulationswerkzeuge weiterzuentwickeln, mit denen die thermo-hygrischen Prozesse an und in Fenstern unter Berücksichtigung von allen relevanten Wärme- und Massetransportprozessen besser beschrieben werden können. Darüber hinaus ist die Entwicklung von entsprechender Normung bzw. Ergänzung und Abänderung bestehender Normung eine Notwendigkeit. Die aktuellen Normen kennen kein Vakuumglas, so dass beispielsweise die Anwendung der Berechnungsnorm für Fenster-U-Werte für die vier Prototypen nur im akademischen Umfeld als akzeptable Annäherung erscheint.

## 6. Verzeichnisse

### 6.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fensterentwicklung (Quelle: ift-Rosenheim) .....	13
Abbildung 2: Holz- und Kunststofffenster in historischer und aktueller Konstruktionsausführung (Zusammenstellung anhand der Schnittzeichnungen von diversen Herstellern) .....	13
Abbildung 3: Glasentwicklung (Quelle: ift-Rosenheim) .....	14
Abbildung 4: Forschungslandschaft zum Thema Vakuumglas (eigene Darstellung Projektkonsortium / Konsortialführung) .....	16
Abbildung 5: Ablauf des FIVA-Projektes - Arbeitspakete (APs) (eigene Darstellung, erstveröffentlicht im Forschungsantrag zu FIVA) .....	17
Abbildung 6: Projektpartner – Firmenlogos (Bildquellen: Fa. Gaulhofer, Fa. Internorm, Fa. Katzbeck, Fa. Svoboda, Fa. Wicknorm, Fa. Maco, Fa. Ieb Eisele, Dr. Hohenstein Consulting).....	18
Abbildung 7: Das Projektteam anlässlich der Projektsitzung bei der Fa. Katzbeck in Rudersdorf (von links): Wilfried Eisele (iEB), Oliver Eisele (iEB), Herbert Ehrenleitner (Fa. Wick), Phillip Svoboda (Fa. Svoboda), Peter Schober (Holzforschung Austria), Manfred Wick (Fa. Wick), Florian Höllbacher (Maco), Manfred Uhrig (iEB), Alois Svoboda (Fa. Svoboda), Ulrich Pont (TU-Wien), Peter Reisenauer (Katzbeck), Mathias Habersatter (Fa. Maco), Dietmar Hammer (Gaulhofer), Helmut Hohenstein (Hohenstein Consultancy), Manfred Deutsch (Katzbeck), Magdalena Wölzl (TU Wien), Matthias Schuss (TU Wien), nicht am Bild die Kollegen der Fa. Internorm (Herbert Hochreiter, Dominik Hoffmann) und weitere Kollegen der Fa. Maco (Robin Duchac, Koneczny). (Eigene Aufnahme TU Wien / HFA, Konsortialführung FIVA) .....	18
Abbildung 8: Darstellung der thermischen Simulationen – Beispiel (eigene Darstellung TU Wien / HFA, Konsortialführung) .....	20
Abbildung 9: Position der Messfühler (Darstellung Projektkonsortium FIVA).....	22
Abbildung 10: Erscheinungsform von Vakuumglas: links Vakuumglas (4v4) Draufsicht, rechts Seitenansicht (Vakuumglas von einem der untersuchten Hersteller- Hersteller 1) (Abbildung: Eigene Photographie HFA) .....	24
Abbildung 11: Aufbau der zusammengespannten Verglasungen (in diesem Fall 4v4+4) (Eigene Fotos HFA) .....	25
Abbildung 12: Prototyp A: Abstellmodul für Lüftungsstellung und zum Öffnen (freigeben) des Fensters (Eigene Foto des Projektkonsortiums).....	30
Abbildung 13: Prototyp A: Links, Innenansicht; Mitte, Flächenbündigkeit; Rechts, Außenansicht (Eigene Fotos des Projektkonsortiums).....	31
Abbildung 14: Prototyp A: Links, Verschlussmodul und Ecklager; Rechts, Außenansicht mit ZIP-Store als Sonnenschutz (Eigene Fotos des Projektkonsortiums) .....	31
Abbildung 15: Mechatronische Beschlagkomponenten (eigenes Foto Projektkonsortium FIVA).....	33
Abbildung 16: Prototyp B: Links, Zeichnung des Platzbedarfes für mechatronische Beschläge; Mitte, Ausführung der Fräsung für mechatronische Beschläge; Rechts, „Kabelkanal“ für mechatronische Beschläge (eigene Fotos des Projektkonsortiums FIVA) .....	34

Abbildung 17: Prototyp B: Links, Außenansicht; Mitte, Ganzglasoptik; Rechts, Lüftungsstellung und Sonnenschutz (eigene Fotos des Projektkonsortiums FIVA).....	35
Abbildung 18: Prototyp B: Links, Verriegelungsmodul; Mitte, Eckmodul; Rechts, Kabelkanal (eigene Fotos des Projektkonsortiums FIVA) .....	36
Abbildung 19: Bewegungsstudie (eigene Darstellung Projektkonsortium FIVA) .....	37
Abbildung 20: Prototyp C: Außenansicht geschlossen und halb geöffnet; Innenansicht halb und ganz geöffnet (eigene Fotos) .....	38
Abbildung 21: Prototyp C: Links, Einlaufkulissee und Schere; Rechts, Spindelantrieb (eigene Fotos) ...	39
Abbildung 22: Schwerlast-Vollauszug für die Möbel- und Autoindustrie (Fa. Accuride und Fa Kippwerk) .....	40
Abbildung 23: Prototyp D: Handmuster mit Teleskopschiene (geschlossen, halb offen, offen) (Eigene Fotos, Konsortium FIVA).....	41
Abbildung 24: Prinzipskizze Abstell-Schiebefenster (Darstellung von U. Pont).....	42
Abbildung 25: Positionsstellungen des Abstell-Schiebefensters (Abbildung U. Pont & M. Wölzl).....	42
Abbildung 26: Von links nach recht: geschlossen, abgestellt (Lüftungsstellung), halb offen, ganz offen (eigene Abbildungen, Projektkonsortium FIVA).....	44
Abbildung 27: Links, Innenansicht geschlossen; Rechts, abgestellt in Lüftungsöffnung (eigene Abbildungen, Projektkonsortium FIVA).....	44
Abbildung 28: Links, außen flächenbündig; Rechts, Teleskopschiene mit Fangeinrichtung zum selbstständigen Schließen (eigene Abbildungen, Projektkonsortium FIVA) .....	44
Abbildung 29: Die vier Fensterprototypen in der Sonderschau am Fenster-Türen-Treff 2020 in Salzburg (eigene Abbildungen, Projektkonsortium FIVA).....	46
Abbildung 30: Analyse und Bewertung der vier Prototypen durch die Besucher des Fenster-Türen-Treff 2020 (eigene Abbildungen, Projektkonsortium FIVA).....	46
Abbildung 31: Gesamtauswertung der Fragebögen zu den vier Funktionsprototypen (eigene Abbildung) .....	47
Abbildung 32: Schnitt durch das Versuchsmuster und Detail zum Dichtungsanschluss (eigene Abbildungen, Projektkonsortium FIVA).....	48
Abbildung 33: Untersuchte Dichtungsvarianten und ermittelte Ergebnisse (eigene Darstellung).....	49
Abbildung 34: Qualitativer Verlauf der Schalldämmung eines einschaligen Bauteils als Funktion der Frequenz (Frequenzverlauf); Abbildung von <a href="https://enbau-online.ch/bauphysik/7-4-schallausbreitung-im-gebaeude/">https://enbau-online.ch/bauphysik/7-4-schallausbreitung-im-gebaeude/</a> (am 14.07.2020).....	52
Abbildung 35: Qualitativer Verlauf der Schalldämmung eines zweischaligen Bauteils als Funktion der Frequenz (Frequenzverlauf); Abbildung von <a href="https://enbau-online.ch/bauphysik/7-4-schallausbreitung-im-gebaeude/">https://enbau-online.ch/bauphysik/7-4-schallausbreitung-im-gebaeude/</a> (am 14.07.2020).....	53
Abbildung 36: Vergleich von Einfachgläsern (EG) mit variierender Glasdicke (links) und zwei Einfachgläser, EG 4 mm und EG 8 mm im Vergleich zum berechneten Massengesetz (nach Gleichung 2) und zu einer Zweischeiben-Isolierverglasung (MIG) 4-18-4 (rechts) (eigene Abbildung).....	55
Abbildung 37: Vergleich von einen 4v4 Vakuumglas mit einem 4 mm Einfachglas (EG) und dem zugehörigem Massengesetz (berechnet mit Gleichung 2) auf der linken Seite; Vergleich von einen 4v4	

Vakuumglas mit einem 8 mm Einfachglas (EG) und dem zugehörigem Massengesetz (berechnet mit Gleichung 2) und einer Zweischeiben-Isolierverglasung (MIG) auf der rechten Seite .....	57
Abbildung 38: Vergleich von einem 4v4 Vakuumglas mit einem 44.2 Verbundsicherheitsglas ohne Akustikfolie (VSG) und mit Akustikfolie (VSGa) auf der linken Seite; Vergleich von 4v4 Vakuumgläsern unterschiedlicher Hersteller (Vakuumglas 4v4* hat eine kleinere Dimension als die anderen drei Systeme) auf der rechten Seite .....	58
Abbildung 39: Frequenzverlauf von verschiedenen aufgebauten symmetrischen Vakuumgläsern, auf der linken Seite und verschiedenen asymmetrischen Vakuumgläsern zu vergleichbar aufgebauten Verbundgläsern mit Akustikfolie (VSGa), auf der rechten Seite (eigene Abbildung).....	60
Abbildung 40: Frequenzverlauf von aufgespannten (+) und laminierten (L) 4v4 Vakuumglas zu einem gleichdicken 6v6 und einem aufgespannten (+) EG System mit einer Gesamtglasdicke von 12 mm (links); zu einem asymmetrischen 5v8 Vakuumglas mit einer Gesamtglasdicke von 14 mm bzw. 13 mm (eigene Abbildung) .....	62
Abbildung 41: Verbesserungsmaß von den aufgespannten (+) und laminierten (L) Vakuumgläsern mit einem 4 mm EG bezogen auf das Grundglas (links); mit einem 6 mm EG bezogen auf das Grundglas (rechts) (eigene Abbildung).....	63
Abbildung 42: Frequenzverlauf von zwei Zweischeiben-Isolierverglasungen mit einem SZR von 18 mm im Vergleich zu einem aufgespannten (+) System, die alle mit einem 44.2 VSGa kombiniert waren (links) und zwei Zweischeiben-Isolierverglasungen mit einem SZR von 8 mm und 18 mm im Vergleich zu einem aufgespannten (+) und einem laminierten (L) System (rechts). (eigene Abbildung) .....	65
Abbildung 43: Verbesserungsmaß von Zweischeiben-Isolierverglasungen (MIG) mit variierendem SZR (links) und Zweischeiben-Isolierverglasungen (VIG) mit variierendem SZR (rechts). (eigene Abbildung) .....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
Abbildung 44: Frequenzverlauf des Schalldämm-Maßes für ein neu entwickeltes Fenster mit einer 44.2 VSG bezogen auf die reine Verglasung (links) und mit einer 4v4 bezogen auf die reine Verglasung (rechts). (eigene Abbildung).....	70
Abbildung 45: Verbesserungsmaß des untersuchten Fensters mit der 44.2 VSG und der 4v4 Verglasung (eigene Abbildung) .....	70
Abbildung 46: Schalldämmung von Einfachfenstern mit Dreischeiben-Isolierverglasungen als Funktion der Schalldämmung der Verglasung (Hessinger und Saß 2020) .....	71

## 6.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Vakuumverglasungen, die direkt vom Hersteller geliefert wurden (eigene Aufstellung HFA) .....	25
Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Einscheibengläser (EG), Verbundgläser (VG), Mehrscheiben-Isoliergläser (MIG) und Vakuum-Isoliergläser (VIG) (eigene Aufstellung HFA).....	26
Tabelle 3: Klassifizierung der Schlagregendichtheit (vgl. EN 1027 und EN12208).....	27
Tabelle 4: Klassifizierung der Windlast (gemäß EN 12211).....	28
Tabelle 5: Klassifizierung der relativen frontalen Durchbiegung (gemäß EN 12211) .....	28
Tabelle 6: Prototyp A - Sim. 3.1.....	32
Tabelle 7: Prototyp B - Sim. 3.2 (Darstellungen basierend auf eigenen Simulationen).....	36
Tabelle 8: Prototyp C - Sim. 3.3 4 .....	39
Tabelle 9: Prototyp D - Sim. 3.4.....	45
Tabelle 10: Untersuchte Dichtungsvarianten und ermittelte Ergebnisse (eigene Darstellung) .....	48
Tabelle 11: Übersicht der gemessenen, berechneten (Gleichung 2) und abgelesenen (EN 12758:2019) Koinzidenzfrequenzen für Einfachgläser (EG) .....	56
Tabelle 12: Übersicht der gemessenen, berechneten und abgelesenen (aus EN 12758:2019) Koinzidenzfrequenzen $f_c$ für Einfachgläser (EG), Verbundgläser (VG) und Vakuumglas bezogen auf die Gesamtdicke $d_{ges}$ .....	61
Tabelle 13: Übersicht der errechneten und gemessenen Resonanzfrequenzen $f_r$ von den untersuchten Zweischeiben-Isolierverglasungen für MIG und VIG.....	67
Tabelle 14: Zusammenfassung der bewerteten Schalldämm-Maße und Spektrum-Anpassungswerte C und $C_{tr}$ , die bei den Messungen der untersuchten Verglasungen im bewerteten Frequenzbereich ermittelt wurden. Zusätzlich wird die Anpassung für Straßenverkehrslärm ( $R_w + C_{tr}$ oder $R_{A,tr}$ ) angegeben und Vergleichswerte aus der EN 12758:2019 genannt. Bei den MIG- und VIG-Aufbauten wird auch der Scheibenzwischenraum (SZR) angeführt.....	68



### 6.3. Literaturverzeichnis

AnTherm. Online verfügbar unter: <http://antherm.at/antherm/Waermebruecken.htm> (abgerufen am 08.07.2020).

Ashmore, N.; Cabrera, D.; Kocer, C. (2015): Acoustic properties of vacuum insulating glazing. In: Acoustics 2015 Hunter Vally, 15. - 18. November 2015, S. 1–9.

Cabrera, D., Ashmore, N., Kocer, C. (2016): Airborne sound insulation of vacuum insulating glazing. General observations from measurements. In: *Building Acoustics* 23 (3-4), S. 193–206. DOI: 10.1177/1351010X16676811.

Chmurny, I. und Szabo, D. (2019): 'Thermal Irregularities in Vacuum Glazing'. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 471 (February 2019): 062012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/6/062012>.

DIN 4108-2, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz (DIN 4108-2:2002-12)

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

DIN 4108-4, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte (DIN 4108-4:2017-03)

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)

EN ISO 6946, Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946:2017)

EN 1026:2000-06, Fenster und Türen – Luftdurchlässigkeit – Prüfverfahren

EN 1027:2000-06, Fenster und Türen – Schlagregendichtheit – Prüfverfahren

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

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

- EN 12046-1:2003-11, Bedienungskräfte – Prüfverfahren – Teil 1: Fenster
- EN 12207:1999-11, Fenster und Türen – Luftdurchlässigkeit – Klassifizierung
- EN 12208:1999-11, Fenster und Türen – Schlagregendichtheit – Klassifizierung
- EN 12210:1999+AC:2002-08, Fenster und Türen – Widerstandsfähigkeit bei Windlast – Klassifizierung
- EN 12211:2000-06, Fenster und Türen – Windwiderstandsfähigkeit – Prüfverfahren
- EN 14351-1:2006+A2:2016-09, Fenster und Türen – Produktnorm, Leistungseigenschaften – Teil 1: Fenster und Außentüren
- Fasold, W., Veres, E. (2003): Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. 2. Aufl. Berlin: Huss-Medien Verl. Bauwesen. Online verfügbar unter <http://www.gbv.de/dms/ilmenau/toc/348682778.PDF>.
- Hohenstein H. (2017): Literatur-, Markt- und Hintergrundrecherche im Bereich Vakuumverglasungen (VG). Anhang zum Endbericht des Projektes MOTIVE (FFG-No.: 854690)
- Hessinger, J., Saß, B. (2020): Schalldämmung von Fenstern, Türen und Vorhangfassaden. In: Nabil A. Fouad (Hg.): Bauphysik Kalender 2020. Bau- und Raumakustik, 20. Jahrgang, Bd. 2020. Berlin: Ernst & Sohn, A Wiley Brand, S. 593–644.
- Hohenstein, H. und Heiduk, E. (2016): Endbericht Sondierungsprojekt VIG-SYS-RENO, Anhang 1: Literatur-, Markt und Hintergrundrecherche für innovative Verglasungslösungen mit Fokus auf Vakuumverglasungen (VG) und aller für das Projekt relevanten Themenbereiche. (FFG-No.: 845225).
- ift Rosenheim – Institut für Fenstertechnik, Rosenheim. Online verfügbar unter: <https://www.ift-rosenheim.de>, (abgerufen am 08.07.2020 )
- ISO/FDIS 19916-1, Glass in building- Vacuum insulating Glass; Part 1: Basic specification of products and evaluation methods for thermal and sound insulation performance (ISO/FDIS 19916-1:2018)
- Kippwerk, Teleskopschienen Schwerlast- Tragkraft bis 200. Online verfügbar unter: [https://www.kippwerk.de/xs\\_db/DOKUMENT\\_DB/www/KIPP\\_DE\\_CH\\_PL/BEDIENTEILE/DataSheet/de/K05/K0544\\_Datasheet\\_12484\\_Teleskopschienen\\_Schwerlast-Vollauszug\\_Tragkraft\\_bis\\_200\\_kg--de.pdf](https://www.kippwerk.de/xs_db/DOKUMENT_DB/www/KIPP_DE_CH_PL/BEDIENTEILE/DataSheet/de/K05/K0544_Datasheet_12484_Teleskopschienen_Schwerlast-Vollauszug_Tragkraft_bis_200_kg--de.pdf) (abgerufen am 08.07.2020)
- Krick, B. (2014) Passivhausfenster sind profitabel für Bauherren!/Passive house windows are profitable for building owners! – Vortrag bei der Fassadenbautagung 2014, TU Wien. (13. Juni 2014)
- Lux, C.; Nusser, B., Schober, P. (2020): Untersuchung der akustischen Performance von Vakuumisolierverglasung (VIG). In: Deutsche Gesellschaft für Akustik (Hg.) 2020 – 46. Deutsche Jahrestagung für Akustik, S. 179–182.
- Nugroho, A. C.; Cabrera, D.; Kocer, C. (2018): Improving the airborne sound insulation properties of vacuum insulating glazing using dissimilar pane thickness and a laminated pane. Experimental results. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1075, S. 12063. DOI: 10.1088/1742-6596/1075/1/012063.

- 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)
- Pont, U., Heiduk, E., Schober, P., Romirer, H., Dolezal, F., Proskurnina, O., Schuss, M., Sustr, C., Hohenstein, H. und Mahdavi, A.: (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.
- Pont, U., Schober, P. und Mahdavi, A. (2018): 'FIVA - Fensterprototypen Mit Integriertem Vakuumglas (Projektantrag Im Rahmen Der 5. Ausschreibung Stadt Der Zukunft Der FFG)'. Report for Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG / Bundesministerium Für Verkehr, Innovation Und Technologie; Report No. Ansuchen Um Forschungsförderung, 2018; 58 Pages. Wien
- Pont, U., Schober, P. und Mahdavi, A. (2019): 'VAMOS - Vakuumglas-Kastenfenster: Performance-Monitoring in Sanierungsprojekten'. Online verfügbar unter: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/vamos.php> (abgerufen am 08.07.2020)
- Pont, U., Schuss, M., Mahdavi, A., Schober, P., Hauer, K. und Lux, C. (2017): 'MOTIVE - Modellierung, Optimierung, Und Technische Integration von Vakuumglas-Elementen'. Ein Projektbericht im Rahmen des Programms Stadt der Zukunft 24/2018. Berichte Aus Energie- Und Umweltforschung. Online verfügbar unter: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/motive-modellierung-optimierung-und-technische-integration-von-vakuumglas-elementen.php>
- Ward, T. und Sanders, C. (2017): 'Conventions for calculating linear thermal transmittance and temperature factors'; brepress, Scotland 2007
- Wölzl, M (2019): Fensterkonstruktionen mit Vakuumglas: Simulationsbasierte Weiterentwicklung von innovativen Fensterkonstruktionen. Masterarbeit, TU Wien, betreut durch U. Pont & A. Mahdavi

## 7. Anhang

### 7.1. Kontakt zum Projektkonsortium

Senior Scientist Dipl.Ing. Dr.techn. Ulrich PONT  
Univ.Ass. DI. Magdalena WÖLZL, BSc.

Forschungsbereich Bauphysik und Bauökologie,  
TU Wien  
Karlsplatz 13/4  
A-1040 Wien

[ulrich.pont@tuwien.ac.at](mailto:ulrich.pont@tuwien.ac.at) |  
[magdalena.woelzl@tuwien.ac.at](mailto:magdalena.woelzl@tuwien.ac.at)  
+43 01 58801 27033

Dipl.-HTL-Ing. Peter SCHOBER

Holzforschung Austria  
Franz-Grill-Straße 7  
A-1030 Wien

[p.Schober@holzforschung.at](mailto:p.Schober@holzforschung.at)  
+43 1 798 26 23-38

## 7.2. Liste von im Rahmen des Projektes erfolgten Publikationen

(Stand November 2020)

### Publikationen (in alphabetischer Ordnung)

- Christian Lux, Bernd Nusser, Peter Schober: Experimental investigation an airborne sound insulation of vacuum insulating glazing (VIG) in: inter-noise 23-26 August 2020
- Christian Lux, Bernd Nusser, Peter Schober: Schallschutz Vakuumglas – Leistungsspektrum und Grenzen in: Tagungsband des Fenster-Türen-Treff 2020, S. 70-82
- Christian Lux, Bernd Nusser, Peter Schober: Untersuchung der akustischen Performance von Vakuumisoliertglas (VIG) in: DAGA 2020 - Jahrestagung für Akustik, Hannover, März 2020, S. 179-182
- Magdalena Wölzl, Ulrich Pont, Ardeshir Mahdavi, Peter Schober: "Configuration Optimization of Building Details via Parametric Numeric Simulation: A Case Study of Windows with Vacuum Glass"; Vortrag: SIMAUD2020, TU Wien, Wien, Österreich (COVID19-bedingt: Webconference); 25.05.2020 - 26.05.2020; in: "2020 Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design", A. Chronis, G. Wurzer, W Lorenz, C.M. Herr, U. Pont, D. Cupkova, G. Wainer (Hrg.); SIMAUD / The Society for Modeling and Simulation International, (2020), ISBN: 978-1565553712; Paper-Nr. 281-287, 7 S.
- Magdalena Wölzl, Ulrich Pont, Peter Schober, Ardeshir Mahdavi: "Simulation-based performance comparison of Facade Constructions: Vacuum glazing versus common insulation glass"; Vortrag: EnviBUILD2019 - Buildings and Environment International Conference, Bratislava, Slovake; 07.11.2019; in: "Book of Abstracts of the 14th enviBUILD 2019", J. Hraska, P. Hanuliak et al. (Hrg.); Spektrum:STU, (2019), ISBN: 978-80-227-4959-6.
- Magdalena Wölzl, Ulrich Pont, Peter Schober, Matthias Schuss, Ardeshir Mahdavi: "Numeric thermal bridge simulation in Window Construction Assessment: A Case Study Pertaining to Vacuum-Glass Windows"; Poster: Vienna Young Scientist Symposium 2019, TU Wien, Vienna, Austria; 13.06.2019 - 14.06.2019; in: "VSS - Vienna Young Scientist Symposium June 13-14, 2019", K. Ehrmann, H. Mansouri Khosravi (Hrg.); (2019), ISBN: 978-3-9504017-9-0; S. 36 - 37.
- Magdalena Wölzl: "Fensterkonstruktionen mit Vakuumglas: Simulationsbasierte Weiterentwicklung von innovativen Fensterkonstruktionen"; Betreuer/in(nen): U. Pont, A. Mahdavi; Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Bauphysik und Bauökologie, 2019; Abschlussprüfung: 23.10.2019.
- Peter Schober, Jakob Haberl, Ulrich Pont, Magdalena Wölzl, Matthias Schuss: Das „Morgenfenster“, Entwicklung smarterer und energieeffizienter Fensterprototypen mit Vakuumglas, in: Holzforschung Austria, 1, 2020, S. 6-8
- Peter Schober, Jakob Haberl, Ulrich Pont, Magdalena Wölzl, Matthias Schuss, Ardeshir Mahdavi: Das „Morgenfenster“ – ein Blick in die Zukunft, in: Holz-Zentralblatt, 11, 13. März 2020, S. 228
- Ulrich Pont, Magdalena Wölzl, Peter Schober, Shiva Najaf Khosravi, Matthias Schuss, Ardeshir Mahdavi: "Recent progress in the development of windows with vacuum glass"; Vortrag: Digital Proceedings CESBP2019 - Matec Web of Conferences 282, 02020, Prag, Tschechische Republik; 02.09.2019 - 05.09.2019; in: "Digital Proceedings CESBP2019", R. Cerny (Hrg.); Matec Web of Conferences, 282 (2019), Paper-Nr. 2020, 8 S.
- Ulrich Pont, Matthias Schuss, Peter Schober, Ardeshir Mahdavi: "Conception and Assessment of Technical Solutions for the Application of Vacuum Glazing in Contemporary Window Constructions"; Vortrag: BauSIM2018 - 7. Deutsch-Österreichische IBPSA -Konferenz Tagungsband, Karlsruhe, Germany; 26.09.2018 - 28.09.2018; in: "Proceedings of BauSim2018", A. Wagner, P. von Both et al. (Hrg.); (2018), Paper-Nr. 1107, 8 S.
- Ulrich Pont, Peter Schober, Magdalena Wölzl, Matthias Schuss, Ardeshir Mahdavi: "Implementation of vacuum glazing into existing and new windows: A report on recent research and development efforts"; Vortrag: BSA2019 - Building Simulation Applications - 4th IBPSA - Italy Conference, Bozen/Bolzano, Italy; 19.06.2019 - 21.06.2019; in: "Book of Abstract / to be published", A. Gasparella et al. (Hrg.); (2019).
- Ulrich Pont, Peter Schober, Magdalena Wölzl: "Vakuumglas - über den traditionellen Einsatz hinausgedacht"; Architektur & Bau Forum (eingeladen), 09/2019 (2019), 09; S. 34 - 35.

- Ulrich Pont, Peter Schober: Das Morgenfenster – Entwicklung smarter und energieeffizienter Fensterprototypen (mit Vakuumglas) in: Tagungsband des Fenster-Türen-Treff 2020, S. 32-38
- Ulrich Pont, Peter Schober, Magdalena Wölzl: „Das Morgenfenster“; Architektur & Bau Forum (eingeladen), 09/2020 (2020), S.23.
- Ulrich Pont, Peter Schober, Magdalena Wölzl: „Wie sehen die Fenster von Morgen aus? Ein Blick in eine (möglicherweise) nahe Zukunft betreffend zeitgenössischer Fensterkonstruktion.“ Angenommen für BauenPlus (2020).
- Ulrich Pont, Magdalena Wölzl, Matthias Schuss, Peter Schober, Ardeshir Mahdavi: "Exploring novel solutions for incorporating vacuum glazing in new and existing window constructions"; Talk: NSB2020 - 12th Symposium on Building Physics, Tallinn, Estonia; 2020-09-07 - 2020-09-09; in: "NSB2020", J. Kurnitski, T. Kalamees et al. (ed.); 172 (2020), ISSN: 2267-1242; 8 pages.

## Zeitschriften

- bauelemente-bau 01/20 S. 15: Fenster-Türen-Treff feiert Geburtstag; Mit Beitrag zu den Fensterprototypen von FIVA
- Fenster + Türen 2020 S. 6 f.: Blick nach vorne; Mit Beitrag zu den Fensterprototypen von FIVA
- GFF // 5-6/2020 S. 72 f: Das Fenster von morgen schon heute; Mit ausführlichem Beitrag zu den Fensterprototypen von FIVA
- Glaswelt 04.2020 S. 84 f: 20 Jahre Vorausdenken, Mit ausführlichem Beitrag zu den Fensterprototypen von FIVA
- HOLZDesign (2020) 4, S. 20: Fenster-Türen-Jubiläum, Mit Beitrag zu den Fensterprototypen von FIVA.
- Holzkurier 13 / 26.03.2020 S. 26: Das Fenster-Türen-Jubiläum; Mit Beitrag zu den Fensterprototypen von FIVA
- holztechnologie 61 (2020) 2 S. 56 f: 20. Fenster-Türen-Treff; Mit Beitrag zu den Fensterprototypen von FIVA
- Holz-Zentralblatt Nummer 12, 20.März 2020 S. 249: Jubiläumsveranstaltung sehr gut besucht; Mit ausführlichem Beitrag zu den Fensterprototypen von FIVA
- Tischler-Journal (2020) 4, S. 26f.: Blick nach vorne, Mit ausführlichem Beitrag zu den Fensterprototypen von FIVA
- Peter Schober, Jakob Haberl, Ulrich Pont, Magdalena Wölzl, Matthias Schuss, Ardeshir Mahdavi: „Einfach auf die Seite geschoben“ (Artikel über Prototyp D), angenommen für Glaswelt (11/2020). Link: <https://www.glaswelt.de/top-thema/fensteroeffnungsarten-neu-gedacht-einfach-auf-die-seite-geschoben> (Abgerufen 30.11.2020)