

10 Jahre simulationsgestützte Entwicklung von Fenstern mit Vakuumglas für neue und Bestandsfensterkonstruktionen

Ulrich Pont¹, Magdalena Wölzl¹, Peter Schober², Matthias Schuss¹

1 TU Wien, Inst. f. Architekturwissenschaften, Austria, E-Mail:

{ulrich.pont|magdalena.woelzl|Matthias.schuss}@tuwien.ac.at

2 Holzforschung Austria, Wien, Österreich, E-Mail: peter.schober@outlook.at

Kurzfassung

Die AutorInnen haben im Jahr 2014 begonnen die Integration von damals vergleichsweise neuen Vakuumgläsern (VG) für verschiedene Fensterkonstruktionen zu untersuchen. Dabei spielte numerische Wärmebrückensimulation eine wesentliche Rolle, da im Vergleich zu aufwendiger Mock-Up-Erstellung und Differenzklimakammertest mit der Simulation rasch und vergleichsweise zuverlässig die thermische Performance kritischer Bereiche (Randverbund, Abstandhalter) beurteilt werden konnte. Namhafte Unternehmen von Fenster- und Zulieferindustrie sowie des Fensterbauhandwerks konnten für kooperative Forschungsprojekte gewonnen werden, in welchen die auf Simulation basierenden Entwicklungsstände unterschiedlicher technologischer Integrationsvarianten in iterativen Prozessen unter Berücksichtigung mannigfaltiger Spezifika weiterentwickelt werden konnten, bis Funktionsprototypen bzw. Realisierungen in Realbauwerken erreicht wurden. Die Verwendung von numerischer Wärmebrücken-simulation war hier auf der einen Seite weiterhin ein wesentliches Werkzeug, auf der anderen Seite konnten die Ergebnisse mit Realmessdaten abgeglichen und hinsichtlich ihrer Genauigkeit bewertet (und bestätigt) werden. Der Beitrag zieht nach 4 Projekten und 10 Jahren intensiver Bemühungen Bilanz über die erreichten Ergebnisse und diskutiert die Vorteile und Herausforderungen, die sich mit der Verwendung von Simulationswerkzeugen ergeben haben.

Abstract

In 2014, the authors started to investigate the integration of then comparatively new vacuum glass products for different window constructions. Numerical thermal bridge simulation played a key role here, as the thermal performance of critical areas (edge seal and distance pillars) could be assessed quickly and comparatively reliably

using the simulation, compared to complex mock-up creation and testing in differential climate chambers. Building on two exploratory projects, cooperative research projects were started and carried out with well-known representatives of the window and supplier industry and the window construction trade, in which the simulation-based development statuses of different technological integration variants could be further developed in iterative processes, considering many different specifics, until functional prototypes or realizations in real buildings were achieved. The use of numerical thermal bridge simulation continued to be an essential tool here on the one hand, while on the other hand the results could be compared with real measurement data and evaluated (and confirmed) with regard to their accuracy. After 4 projects and 10 years of intensive efforts, the article takes stock of the results achieved and discusses the advantages and challenges that have arisen with the use of simulation tools.

Einleitung

Die Kulturgeschichte des Fensters kann als reichhaltig und interessant betrachtet werden, jedoch galten Fenster schon immer als Schwachstelle in der Gebäudehülle im Hinblick auf Statik und die verschiedenen Schutzfunktionen der Hülle. Diese Funktionen betreffen die Wärme- und Schalldämmung, die Wasser- und Winddichtigkeit sowie Verschattung und den Schutz vor (sommerlicher) Überhitzung in der heißen Jahreszeit. In Mitteleuropa hat der technologische Fortschritt der Fenster-technologien in den letzten 250 Jahren vielleicht die technisch fortschrittlichsten Fenster der Welt hervorgebracht, allerdings ist die Geschichte verschiedener Entwicklungsmeilensteine eine vergleichsweise lineare: Iterative Verbesserungen umfassten das Hinzufügen einer zusätzlichen Ebene mit Fensterflügeln (Kastenfenster), die Einführung von Dichtungen in Fugen und Stulp, die Vervielfachung der Glasscheiben pro Fensterflügel inklusive

ruhender Gaszwischenräume (Zweifach- und Dreifachverglasung), die Einführung von auf den Scheiben angebrachten Folien, die den Strahlungswärmedurchgang durch die Gläser beeinflussen, die Verwendung verschiedener Gase (anders als trockene Luft) als Füllgase für Zwischenräume, die Entwicklung dichter Randabschlüsse und die standardmäßige Anwendung von Dreh-Kipp-Beschlägen. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese linearen Verbesserungen sich ihrer maximalen Effizienz annähern. Es muss an dieser Stelle aber betont werden, dass solche Fenster heute in der Regel oft schwere Konstruktionen mit Dreifachverglasungen sind, die auch zum Teil stark dimensionierte und damit manchmal klobig wirkende Rahmenkonstruktionen erfordern.

Die Idee von Gläsern mit evakuiertem Innenraum („Vakuumglas“ / VG) existiert schon lange, die persistierenden technischen Probleme eine Dauerhaftigkeit des Vakuums sicherzustellen, können aber erst seit einigen Jahren (10 – 20 Jahre, vergleiche dazu Pont et al. 2018a) als gelöst betrachtet werden. Unter einem Vakuumglas versteht man in der Regel zwei parallele Glasscheiben, die einen kleinen, evakuierten Zwischenraum von oft weniger als einem Millimeter aufweisen. Zur Aufrechterhaltung der Parallelität der Scheiben sowie des Vakuums ist in der Regel ein Gitter aus winzigen Abstandhaltern („Pillar“) integriert, sowie besteht ein dichter Randverbund entlang der Kanten. Darüber hinaus verfügen die meisten Vakuumverglasungen über eine sogenannte Getterfläche, die Restpartikel aus dem evakuierten Raum filtern soll, sowie oft auch über eine Evakuierungsöffnung. Da die Wärmeübertragungsprozesse Konvektion und -leitung jeweils ein Medium erfordern, das im evakuierten Zwischenraum nicht vorhanden ist, weisen solche Gläser typischerweise sehr gute Wärmedämmleistungen bei vergleichsweise geringer Systemstärke auf. Der Randverbund (in den meisten Fällen aus Glas oder Metall gefertigt) und die Pillar stellen jedoch lineare und punktuelle Wärmebrücken dar und müssen bei der Planung und Konstruktion von Fenstern berücksichtigt werden. Neuere Entwicklungen scheinen die Problematik der linearen Wärmebrücke entlang des „kalten“ Randverbundes durch technologischen Fortschritt und zielgerichtete Konstruktion zu adressieren und nennen dies "Vakuumglas der nächsten Generation", im Gegensatz zum älteren "Vakuumglas der 1. Generation" (VGLASS, 2024). Abb. 1 veranschaulicht die wichtigsten Begriffe und Bestandteile typischer VG-Produkte (1. Generation) und ihre Umsetzung in Rahmenkonstruktionen. Angesichts der

wärmetechnischen Eigenschaften von Vakuumglas - hohe Wärmedämmfähigkeit bei eher geringer Systemstärke - erschien und erscheint eine Anwendung sowohl im Fensterneubau als auch als Option zur energieeffizienzsteigernden Nachrüstung historisch bedeutsamer Bausubstanz sinnvoll: Zu Beginn der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Autoren im Jahr 2014 war dieses Potenzial angesichts der wenigen Veröffentlichungen, die sich mit der Integration von VG in neue/zeitgemäße und historische Fenster beschäftigten, noch nicht ausgeschöpft. Mit anderen Worten: Während sich die Forschung und Entwicklung stark auf die Technologie von VG konzentrierte, wurde die Anwendungs-forschung im Bereich der (europäischen) Fenstertechnik nicht in zufriedenstellender Weise eingesetzt. Ziel dieses Beitrages ist es, die eingesetzten Methoden und abgeleiteten Ergebnisse von 10 Jahren Forschung an Fenstern mit implementierten VGs darzustellen. Dabei werden die damit verbundenen Herausforderungen und Voraussetzungen, die diese Anstrengungen ermöglicht haben, aus einer ex-post Perspektive beschrieben. Darüber hinaus wird ein Ausblick auf die jüngsten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gegeben.

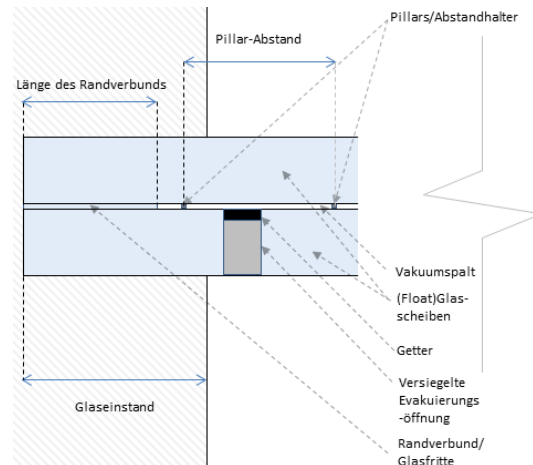


Abbildung 1: Typische Elemente & Terminologie von VG der 1. Generation (Abb.: AutorInnen)

Anwendungsfälle, Voraussetzungen & Beobachtungen

Die hochwärmedämmenden VG erscheinen sowohl für neue Fensterkonstruktionen als auch für die Nachrüstung von bestehenden, historisch bedeutsamen Fensterkonstruktionen, wie z.B. Wiener Kastenfenstern, gut geeignet zu sein. Dabei haben die Zielsetzungen für beide Anwendungsfälle Gemeinsamkeiten, aber auch große Unterschiede: Neue Fenster können und sollten auf ein optimales thermisches Verhalten

hin optimiert werden und dabei sollen dem heutigen gestalterischen Zeitgeist entsprechen. Dementsprechend ist die Integration anderer zeitgemäßer Technologien (z.B. Anbindung an Gebäudeautomation, Motorisierung zwecks hochwertiger und autonomer hygienischer Lüftung, etc.) wünschenswert. Darüber hinaus können für solche Fenster auch nicht-konventionelle Bedienungs- und Öffnungsschemata in Betracht gezogen werden, z.B. ungewöhnliche Öffnungsarten und -richtungen. Historisch bedeutsame Fenster sollen dagegen möglichst unter Erhalt der bestehenden Erscheinungsform thermisch verbessert werden. Daher muss jeder Eingriff mit den in der Regel zarten (Holz-)Konstruktionen kompatibel sein, aber gleichzeitig eine sorgfältige Berücksichtigung der linearen Wärmebrücke entlang des Vakuumglas-Randverbundes sicherstellen. Abb. 2 fasst die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zusammen. Aus einer Ex-post-Perspektive lassen sich Beobachtungen (B) und Voraussetzungen (V) benennen, die zum Erfolg der Forschung in den vergangenen 10 Jahren beigetragen haben (Tab. 1).



Abbildung 2: Unterschiede zwischen den F&E-Ansätzen für neue und bestehende Fensterkonstruktionen (eigene Abbildung AutorInnen)

Tabelle 1: Beobachtungen (B) und Voraussetzungen (V) für erfolgreiche VG-Fenster-F&E-Projekte

Typ	Beschreibung
B1	Die Forschung an VGs selbst datiert bis zurück ins Jahr 1913 (oder früher, vgl. Zoller 1913), es gab jedoch vor unseren Forschungsbemühungen wenige Publikationen zum Thema VG-Integration in (europäische) Fenster.
B2	Die zentraleuropäischen Fensterhersteller haben das große Potential von VG stets anerkannt, waren aber zögerlich solitäre Pionierforschungsarbeit als Einzelunternehmen durchzuführen, v.a. aufgrund von Vorbehalten gegen VGs (Dauerhaftigkeit, rasche Verfügbarkeit bei Glasbruch)
B3	Für die Glasindustrie würde das Umschwenken von Dreischeibenverglasungen auf VGs betriebswirtschaftliche Herausforderungen bedeuten: Es wird eine Scheibe weniger benötigt, große Investitionen in Produktionstechnik, sowie Lizenzgebühren an Patenhalter wären erforderlich.

B4	Grundsätzlich werden Fenster im gesamten Wertschöpfungsprozess von „Planen, Bauen, Sanieren“ als thermisch/energetische Schwachpunkte betrachtet.
V1	Aufgrund der Vorbehalte gegenüber dem VG waren extensive Testserien mit VG-Produkten erforderlich um Verhalten und Charakteristiken kennenzulernen
V2	In der F&E-Arbeit waren klar definierte Entwicklungsziele zu definieren (wie auch „Nicht-Ziele“) um für neue und Bestandsfenster zu Ergebnissen zu kommen.
V3	Für die F&E-Arbeiten war ein Konsortium aus Stakeholdern unterschiedlicher Hintergründe erforderlich (Wissenschaft und Wirtschaft/Industrie) um multiperspektivisch arbeiten zu können. Außerdem war es wesentlich eine vertrauensvolle, zielgerichtete, konstruktive Arbeitsatmosphäre sicherzustellen und Partikularinteressen einzelner Stakeholder zu berücksichtigen, aber gegenüber den generellen Entwicklungszielen hintanzuhalten.

Überblick über die VG-F&E-Projekte

Mit dem Sondierungsprojekt VIG-SYS-RENO (2014-2015) wurde ein erster Grundstein für Integration von Vakuumglas in historisch relevante Bestandsfenster gelegt. Dieser Startpunkt hatte mehrere Gründe: Zum einen hat in China eine Firma in großem Maßstab die VG-Produktion gestartet, zum anderen äußerten fach einschlägige, öffentliche Forschungsförderungsprogrammen Interesse an Projekten, die Bestandsgebäude durch Einzelmaßnahmen zu ertüchtigen im Stande wären. Es wurden prinzipielle Eigenschaften verschiedener VGs im Labor vermessen und simulations- und laborbasierte Nachrüstmöglichkeiten für Flügelfenster mit VG verifiziert. Anschließend wurde ein weiteres Sondierungsprojekt namens MOTIVE (2016-2017) durchgeführt. In diesem Projekt wurden disruptive neue Ansätze für neue Fenster mit VG in einer hohen Anzahl angedacht und einer prinzipiellen Simulation und einem kleinmaßstäblichen Mock-Up-Test unterzogen. Da die österreichische Fensterindustrie sowie die Beschlag- und Dichtungsindustrie ihr Interesse in diese Richtung bekundeten, starteten wir ein Verbundprojekt mit dem Namen FIVA (2018 - 2020), um neue Fenster mit VG weiterzuentwickeln. Als Ergebnis erhielten wir vier funktionale Prototypen von hochisolierenden Fenstern mit VG, die es in dieser Form nicht von der Stange gab. Um auch dem Forschungstrack im Gebäudebestand weiter zu folgen, wurde das Projekt VAMOS (2019-2021) gestartet, in welchem – gemeinsam mit Fensterbau-Tischlereien - sechs bestehende Bauwerke mit Kastenfenstern ausgewählt wurden und eine Reihe von Fenstern mit Vakuumglas ertüchtigt und dann einem rigorosen Langzeitmonitoring unterzogen wurden. Aktuell wird einer der Fensterprototypen aus dem FIVA-projekt (ein Abstell-Schiebefenster) im Rahmen von Auftragsforschung gemeinsam mit einem

namhaften Industriepartner weiterentwickelt (Projekte SLIDE und MOVISTA, laufend seit 2021).

Methoden

Die multiperspektivischen und iterativen Arbeitsabläufe, die für die Entwicklung und Prüfung von mit VG ausgestatteten Fenstern erforderlich sind, erfordern unterschiedliche Ansätze, Methoden und Hintergrundwissen aus verschiedenen Bereichen, einschließlich Tischlerei, Industrietechnik, Bauphysik, normative Prüfung, Monitoring und Diagnostik sowie Marketing- und Kommunikationsfähigkeiten. Abb. 3 veranschaulicht den Arbeitsablauf bzw. die Verteilung der Arbeitspakete im Projekt FIVA, das sich auf die Entwicklung neuer Fenster mit Vakuumglas zusammen mit wichtigen Akteuren der österreichischen Fensterbauindustrie konzentrierte. Dabei bildete der iterative Ansatz zur Verbesserung der Konstruktion, der thermischen sowie der akustischen Leistung der Fensterprototypen ein Schlüsselement bei der Entwicklung von vier Fensterprototypen. In späteren Phasen des Projekts wurden die eher endgültigen Funktionsprototypen typischen Prüfroutinen wie Luftdichtheit, Dichtheit gegen Wind-Driven Rain usw. unterzogen. Darüber hinaus wurden (end-)nutzerbezogene Aspekte bearbeitet, da neue Fenstertypologien eine gewisse Akzeptanz bei den Verbrauchern voraussetzen, da sie sich sonst aus industrieplanerischer und wirtschaftlicher Sicht nicht als erfolgreiches Bauteil durchsetzen können.

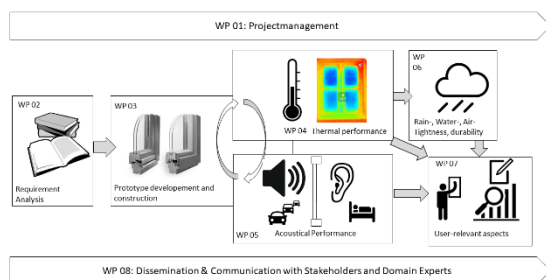


Abbildung 3: Arbeitspakete und Projekttablauf des Projektes FIVA (eigene Abbildung AutorInnen)

In unserer Forschungs- und Entwicklungsarbeit setzten wir in der Regel die folgenden Methoden ein: **(i) Skizzenbasiertes Design** als Grundlage für iterative Konstruktionsverbesserungen: Anhand von technischen Zeichnungen von VGs und (bestehenden) Fenstertechnologien (2D-Schnittentwürfen, 3D-Skizzen), wurde die Integration der VG-Produkte in bestehende (Kasten-)Fensterrahmen erarbeitet sowie die Kompatibilität mit bestehenden Rahmen zeitgenössischer Fensterprodukte geprüft.

Während bei ersterem die Änderung der Rahmengeometrie keine Option war, wurde bei letzterem schnell klar, dass bestehende Fensterrahmenkonstruktionen aufgrund fehlender Randverbundabdeckung und damit einhergehender Probleme mit perimetralen Wärmebrückeneffekten (und damit verbundener Kondensation) nicht ohne weiteres für VG geeignet waren. Noch vor den Simulationsbemühungen wurde beschlossen, neue Fenster mit Vakuumglas eher mit disruptiven neuen Ansätzen anzugehen als bestehende linearen Entwicklungsbemühungen fortzusetzen. **(ii) Simulation** (und Berechnung): Simulationen ermöglichen einen schnellen und einfachen Einblick in die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Fensterkonstruktionen. Numerische Wärmebrückensimulation wurde verwendet, um wichtige Leistungsindikatoren für die Details der Fensterkonstruktion zu erhalten (sowohl in 2D- als auch in 3D-Simulationen). Diese Indikatoren umfassten den f_{Rsi} -Wert, die mind. Oberflächentemperaturen sowie die Temperaturen innerhalb der Konstruktion an bestimmten kritischen Stellen (z.B. Kondensationsrisiko hinter Gummidichtungen). Neben thermischen Simulationen wurden in den letzten Jahren auch numerische Methoden für das mechanische Verhalten von festen und beweglichen Teilen von Rahmenentwicklungen eingesetzt. Es versteht sich von selbst, dass an bestimmten Punkten des Entwicklungsprozesses sowohl die angenommenen Eingangsdaten in der Modellierung (z.B. "Ersatzleitfähigkeit des Vakuumpalts") als auch die "relativen" Ergebnisinformationen aus den Simulationen (z.B. Vergleich der Oberflächentemperaturen verschiedener Konstruktionsvarianten) kritisch bewertet und validiert/verifiziert werden mussten. Ein wesentlicher Punkt war auch die Frage, ob man – durch die Pillars – stets 3D-Simulationen anwenden sollte oder nicht? In Pont und Mahdavi (2017) konnte gezeigt werden, dass die Abweichung in Ergebnissen bei 2D-Simulationen bei entsprechender Modellierung kaum ins Gewicht fallen. **(iii) Labortests und Monitoring:** Eine der Hauptanstrengungen in den ersten Jahren der beschriebenen Bemühungen war die Prüfung von VG-Produkten im Hinblick auf ihre thermischen, akustischen, mechanischen und dauerhaften Eigenschaften. Während vor zehn Jahren in Europa keine industrielle VG-Produktion lief, bedeutete der Kauf von VG-Scheiben vergleichsweise lange Lieferzeiten, da die Scheiben aus den Vereinigten Staaten oder Fernostasien zu unseren Prüfeinrichtungen kamen. Natürlich wurde die Haltbarkeit der Glasprodukte in dieser Situation der Lieferzeiten zu einem noch wichtigeren Thema: Eine typische

Frage der Tischler lautete: "Was soll ich tun, wenn eine der Scheiben bricht? Wie lange wird es dauern, bis ich Ersatz bekomme?" Diese Frage wurde einerseits durch globale Ereignisse wie COVID-19 oder den Containerschiffsstau im Suezkanal verschärft, verlor aber auch dadurch an Relevanz, dass 2020 eine europäische Produktionslinie anließ. In späteren Phasen wurde Monitoring insbesondere für die Kastenfenster mit VG durchgeführt. Hier konnten wir nachweisen, dass unsere Simulationen, die von vergleichsweise extremen Randbedingungen ausgingen, als solide Grundlage für eine Leistungsvorhersage der mit VG ausgestatteten Fenster dienen können. In der Realität stellte sich jedoch heraus, wie wichtig eine sorgfältige handwerkliche Ausführung beim Einbau und bei der Montage von Fenstern mit VG ist, da z.B. Lücken in der Gummidichtung die Leistung des Fensters negativ beeinflussen und die thermische Verbesserung durch die VG-Scheibe bei weitem wett machen können. **(iv) Aspekte des Handwerks und der Industrietechnik:** In den kollaborativen F&E-Projekten zu neuen Fenstern und ertüchtigten Kastenfenstern wurden Aspekte der effektiven Montage, der Statik der Bauteile, der Vorfertigung im Werk, des Transports, der Montage, des Anschlusses an die umgebenden Wandsysteme, der Feinabstimmung der beweglichen Teile und der Wartung zu einer wichtigen und zu berücksichtigenden Perspektive, die vor allem von den Industriepartnern eingebracht wurde. Dies geschah in iterativen Entwicklungsschritten in einem Ping-Pong-Austausch mit Simulationsbemühungen. Die Industriepartner stellten auch Funktionsprototypen und Mock-ups für Labor- und Praxistests her. Ein sehr wichtiger Aspekt in diesem methodischen Ansatz war auch die Reduzierung der Komplexität der Entwürfe im Hinblick auf das "KISS"-Prinzip (keep it super simple), da wir oft mögliche, aber schwer zu realisierende Lösungen identifiziert haben, die wir in weiteren Entwicklungsschritten weggelassen haben, da ihre Chance, gebaute Realität zu werden, vergleichsweise gering war. **(v) Peer Review:** Wie bereits erwähnt, war eine offene und konstruktive Atmosphäre in den F&E-Projekten, an denen mehrere Firmen beteiligt waren, eine entscheidende Voraussetzung für schnelle Fortschritte. Der Arbeitsfortschritt wurde in diesem Sinne einer ständigen internen Begutachtung unterzogen. In späteren Phasen wurden die verschiedenen Projekte auch von externen Fachleuten begutachtet: Vier Prototypen ungewöhnlicher neuer Fenster, die VG wurden beim Fenster-Türen-Treff 2020 ausgestellt. Dort wurden Fachkollegen gebeten,

diese Prototypen anhand eines strukturierten Bewertungsbogens kritisch zu beurteilen. Bei den Kastenfenstern, die einem umfangreichen Monitoring der wichtigsten Leistungsindikatoren unterzogen wurden, wurden Personen, die sich oft in unmittelbarer Nähe dieser Demonstrationsfenster aufhielten (z.B. bei Büronutzung jene, deren Arbeitsplatz an das Fenster angrenzte), um zusätzliches, subjektives Feedback gebeten.

Ergebnisse

Nachstehend wird ein Einblick in die erzielten Ergebnisse gegeben: Aufgrund der Platzbeschränkungen eines Papers sei an dieser Stelle auf die vom Fördergeber betriebene Ergebnisberichtplattform verwiesen, wo die umfassenden Endberichte frei zugänglich sind (via www.nachhaltigwirtschaften.at; Pont et al. 2018a, Pont et al. 2018b, Pont et al. 2020, Pont et al. 2023b)

Kastenfensterertüchtigung

Im Rahmen des VIG-SYS-RENO-Projekts wurde die Verbindungsstelle zwischen Vakuumglas und Holzrahmen von Kastenfenstern als kritische Zone identifiziert (Kondensation oder Vereisung an kürzlich nachgerüsteten Fenstern ist nicht akzeptabel). Die Simulationen ergaben jedoch, dass ohne eine grundlegende Änderung der Geometrie und/oder des Materials der Holzfensterprofile ein immanentes Kondensationsrisiko bestehen bleiben würde. Interessant war auch, wie sich die Verwendung von VG im äußeren oder inneren Flügel auswirkt. Die alte Faustregel, dass hochdämmende Schichten möglichst auf der Außenseite von Konstruktionen angeordnet werden sollten, während Schichten mit hohem Diffusionswiderstand möglichst auf der Innenseite von Konstruktionen angeordnet werden sollten, ist nur schwer anwendbar, da VGs in der Regel sowohl einen hohen Diffusions- als auch einen hohen Wärmedurchlasswiderstand aufweisen. Abb. 4 zeigt die Temperaturkonturen entlang der Innenoberfläche von beiden Flügeln von Kastenfenstern für verschiedene Fälle (Float/Float, Vakuum/Float, Float/Vakuum). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Verwendung von VG auf der Innenseite zu einem kälteren Zwischenraum und einer niedrigeren Oberflächentemperatur auf dem äußeren Flügel führt, während eine Verwendung auf der Außenseite die Temperaturen des anderen Flügels nicht wesentlich beeinflusst. Da diese Ergebnisse von einem Wärmebrückensimulationsprogramm stammen, sind konvektive Effekte in dieser Analyse nur rudimentär berücksichtigt. Abb. 5 zeigt eine schematische

Darstellung des Wärmestroms bei der Verwendung von VG in Innen- und Außenflügeln von Kastenfenstern. In Anbetracht dieser (und anderer) Ergebnisse wurde deutlich, dass eine Umsetzung und Realmonitoring erforderlich sind, um die Leistung von mit VG ausgestatteten Fenstern beurteilen zu können. Abb. 6 zeigt eines der Demobauwerke und die Messausstattung. Tab. 2 bietet einen Überblick über die Demonstrationsstandorte und die verschiedenen Eigenschaften der entsprechenden Fenster.

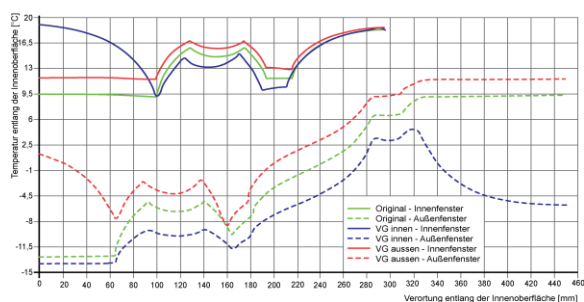


Abbildung 4: Temperaturverlauf entlang der Flügel von Kastenfenstern unterschiedlicher Konfiguration (Abbildung: AutorInnen)

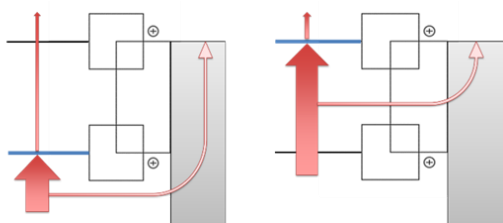


Abbildung 5: Konzeptuelle Darstellung des Wärmestromverlaufes bei Anwendung von VG im Innen- (l.) & Außenflügel (r.) (Abb: AutorInnen)

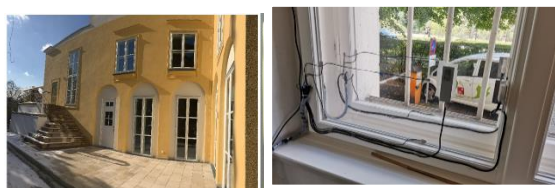


Abbildung 6: Testgebäude (l.) und mit Monitoring-Equipment ausgestattetes Kastenfenster (Abb: AutorInnen)

Wir konnten nachweisen, dass sich die U-Werte der Fenster deutlich verbessert haben und dass - bei entsprechenden Begleitmaßnahmen (wie Heizkörper in den Räumen/unter den Fenstern, Anbringen von Dichtungen usw.) - bei normalen (nicht extremen) Winterbedingungen kein Kondensationsrisiko besteht. Sowohl aus Messungen als auch aus Berechnungen/Simulationen wurde festgestellt, dass die Flügel Fenster erheblich verbessert werden können (Rückgang von 2,5-3,5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ auf 0,5-1,5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Für ein typisches Wiener Gründerzeitgebäude würde die VG-

Verbesserung Kastenfenstern zu einer Verringerung des Heizbedarfs um etwa 10 % führen, abhängig vom Fenster-Wand-Verhältnis des entsprechenden Gebäudes.

Tabelle 2: Testsites für VG in Kastenfenstern

Bild	Beschreibung
	Schloss in Wels Rahmenstockfenster in der Leibung Innen öffnend, 2flg. + Oberlicht Wohnraum Maßnahme: Glastausch
	Villa in Wien Pfostenstockfenster außenbündig außenöffnend, 2flg. + Oberlicht Wohnraum/Wohnung Maßnahme: Außenfenster neu
	Universitätsgebäude Wien Pfostenstock außenbündig Außen-öffnend, 2flg. Büroraum Maßnahme: Flügel neu
	Stift Wilhering Doppelrahmen außenbündig Innen-öffnend, 2 flg. Leerraum (keine Nutzung) Neufenster im Steingewände
	Architekturbüro in Salzburg Pfostenstock außenbündig außen-öffnend 2flg. Büroraum Neufenster
	Büroräumlichkeiten Innsbruck Rahmenstock in der Leibung innen-öffnend 2flg. Büroraum Neufenster.

Neufenster mit Vakuumglas

Im Rahmen der Projekte MOTIVE und FIVA konnten verschiedene VG-Fenster entwickelt werden, welche zum Teil recht exotische Bedienungs-/Öffnungsschemata bieten. Im Rahmen des FIVA-Projekts konnten vier verschiedene Funktionsprototypen entwickelt, getestet und als Mock-Ups realisiert werden. Tabelle 3 zeigt diese Funktionsprototypen A - D und einige Schlüsseleigenschaften, die aus Simulationen abgeleitet wurden. Durch die Verwendung eines High-End-VG mit einem U_g -Wert von 0,4 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (Systemdicke weniger als 1 cm) konnten sehr gute U_{Win} -Werte erzielt werden (alle unter 0,8 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Die in der Tabelle angegebene Mindesttemperatur unterstellt stationäre Innen- und Außentemperaturen von 20 °C bzw. -10 °C. Die U-Werte dieser Funktionsprototypen wurden anhand der EN ISO 10077 (2018, 2020) berechnet (zum Zeitpunkt der Durchführung kannte diese Norm keine VGs). Diese Funktionsprototypen wurden im Rahmen des Fenster-Türen-Treffs 2020 in Salzburg einem Peer Review unterzogen. Abbildung 7 zeigt die Ausstellung mit den Mock-Ups. Die Bewertung verschiedener Merkmale des Funktionsprototyps erfolgte im österreichischen Schulnotensystem (1... ausgezeichnet, 5 nicht zufriedenstellend). Während alle Prototypen grundlegend

wohlwollend bewertet wurden, wurden die Prototypen A und D aufgrund ihrer Innovation (D) und der Aspekte Kundenakzeptanz, Montage und Bedienung (A) favorisiert. Diese Prototypen und die Ausstellung veranschaulichten das Potenzial neuer, innovativer Fenster mit VG, Motorisierung/ Automatisierung und Integration innovativer Technologien. Dabei ist eine zentrale Botschaft des Projektergebnisses, dass einige disruptive Innovationen in jeden kommenden Entwicklungsschritt neuer Fenstertechnologien integriert werden sollten.

Tabelle 3: Funktionsprototypen aus FIVA

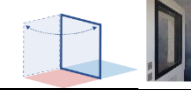
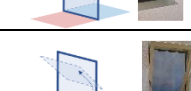
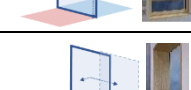
Darstellung	Spezifika
	Type A- Drehfenster innen öffnend f_{Rsi} : 0.74 $\theta_{si,min}$: 12,23 °C U_{Win} : 0.78 W.m ⁻² .K ⁻¹
	Type B- Drehfenster außen öffnend f_{Rsi} : 0.77 $\theta_{si,min}$: 13,05 °C U_{Win} : 0.72 W.m ⁻² .K ⁻¹
	Type C- Kippfenster f_{Rsi} : 0.75 $\theta_{si,min}$: 12,55 °C U_{Win} : 0.68 W.m ⁻² .K ⁻¹
	Type D- Abstell-Schiebefenster f_{Rsi} : 0.74 $\theta_{si,min}$: 12,07 °C U_{Win} : 0.64 W.m ⁻² .K ⁻¹



Abbildung 7: Ausgestellte VG-Fenster-Funktionsprototypen (Abb: AutorInnen)

Prototyp D hat zu einer Folgeentwicklung geführt: Während das Original mit handelsüblichen Teleskopauszügen, die man aus dem Automobilbau kennt, ausgestattet wurde und vergleichsweise aufwändige Beschläge und Motorisierung beinhaltete, hat die Weiterentwicklung im Rahmen des SLIDE/MOVISTA – Projektes von Grund auf neue Beschläge adressiert (KDM-INNO, 2024). Nach zwei Jahren intensiver Entwicklungsarbeit wurde das MOVISTA-Fenster auf der weltgrößten Messe für Bauelemente, der Bau 2023 in München, Deutschland, ausgestellt. Es wurde von Fachleuten und Endkunden gut aufgenommen, und obwohl der gezeigte Prototyp noch nicht auf dem Markt erhältlich war, deuteten mehrere Besucher an, dass sie aufgrund seiner Integrationsmöglichkeiten in die Gebäudeautomation, seiner Ästhetik, des platzsparenden Bedienkonzepts und der

Robustheit der integrierten Technologien sofort eine große Anzahl dieser Fenster kaufen würden. Abbildung 8 veranschaulicht schematisch das Bedienungs-/Öffnungsschema des Fensterprototyps sowie den ausgestellten Fensterprototyp zeigt.



Abbildung 8: Prinzipieller Bewegungsablauf von Prototyp D bzw. dem MOVISTA Fenster (l. Abb: AutorInnen); MOVISTA-Mock-Up wie auf der Bau 2023 gezeigt (r., Image Source: KDM-INNO.com)

Schlussfolgerung und Ausblick

Der gegenständliche Beitrag zeigte die Ansätze, applizierten Methoden (insbesondere die numerische Wärmebrückensimulation) und in Auszügen die Ergebnisse von Forschungs- und Entwicklungsbemühungen in Richtung der Integration von VG in zeitgenössische und historisch wertvolle Fenster. Die Integration von VG in bestehende Kastenfensterkonstruktionen kann einen wertvollen Beitrag zur Reduktion von Energiekonsum und Emissionen des Gebäudebestands beitragen, ohne die üblichen destruktiven Auswirkungen auf die Bauwerke zu haben, die ein Fenstertausch zu neuen Fenstern mit einer Ebene und größeren Stockmaßen verursacht. Bei der Genese von neuen Fenstern hat sich gezeigt, dass übliche Denkmuster und das Verfolgen des üblichen linear-iterativen Entwicklungspfades der vergangenen Dekaden nicht wirklich sinnvoll ist, da die VGs (zumindest die der ersten Generation) ganz andere Konstruktionsprinzipien benötigen: Tatsächlich sollte der Fensterflügel anhand der Erfordernisse des eingesetzten VG konstruiert werden, während Stock und feststehende Elemente als Einhausung von Motorisierung, Verschlüssen und auch Dichtungen dienen sollten. Solche Fenster können auch die Transformation von reinen Hüllelementen zu haustechnischen Systemen durch die Einbindung in Gebäudeautomation leisten (z.B. automatisiertes Lüften). Gleichwohl die gezeigten Forschungen über 10 Jahre passierten, ist ein Ende der Entwicklungen bei weitem nicht erreicht. Neben der weiteren Verfeinerung der technischen Aspekte der gezeigten Fensterprototypen hinsichtlich heutiger Notwendigkeiten (Stichwort: Verschattung), ist auch die Kommunikation über die Technologie an interessierte Stakeholder ein großes Thema, um beispielsweise das weitere

Verlustiggehen von Kastenfenstern zu verhindern. Das bezieht auch Sanierungsfördergeber mit ein, in deren Förderungsprogrammen beim Fenster in der Regel nur der Fenstertausch gefördert wird, nicht aber die Sanierung. Aspekte wie Einbettung in die Kreislaufwirtschaft sind aber gerade beim Bestand ein großes Thema, während Vorfertigung, rasche und einfache Montage, sowie Aspekte der Bedienbarkeit ebenfalls wichtige weitere Entwicklungspunkte darstellen. Gebäudesimulation und Bauteilsimulation spielen bei all diesen Aspekten eine große Rolle, im gezeigten hat sich vor allem die numerische Wärmebrückensimulation als ausgezeichnetes Arbeitsvehikel zur raschen performativen Einordnung der Auswirkung von Konstruktionsentscheidungen und -varianten bewährt.

Disclaimer & Danksagung

Da das gegenständliche Paper Projekte, Methoden und Resultate zwecks fundierten Überblicks zusammenfasst, wurden Teile davon bereits in früheren Publikationen gezeigt. In Pont et al. 2023 werden darüber hinaus ein Großteil der gezeigten Inhalte detailliert diskutiert. Die beschriebenen F&E-Bemühungen wären ohne die generöse Förderung der österr. Forschungsförderungsgesellschaft nicht möglich gewesen (Projects VIG-SYS-RENO No: 845225, Motive No: 854690, FIVA No: 867352, VAMOS No: 878272). Die F&E-Bemühungen in den Projekten SLIDE/MOVISTA wurden durch die Fa. KDM/Blum gefördert. An den gezeigten F&E-Bemühungen haben folgende Institutionen neben den AutorInnen beigetragen: Fa. AGC Interpane, Fa. Blum, Fa. Gaulhofer, Fa. IEB Eisele, Fa. Katzbeck, Fa. MaCo, Fa. Prohaska, Fa. Schaden, Fa. Svoboda, Fa. Wick-Norm, Fa. Winkler und Fa. Zoller-Prantl

Literatur

EN-ISO 10077. 2018: ÖNORM 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-ISO 10077. 2020: ÖNORM EN ISO 10077-1 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 1: Allgemeines (ISO 10077-1:2017, korrigierte Fassung 2020-02).

KDM-INNO. 2024. KDM-Innovation; available via <https://www.kdm-inno.com/de> (checked in December 2023)

Pont, U., Heiduk, E., Schober, P., Romirer, H., Dolezal, F., Proskurnina, O., Schuss, M., Sustr, C., Hohenstein, H., Mahdavi, A. 2018a. Sondierung von

Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 33/2018; available via https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/berichte/schriftenreihe-2018-33-vigsysreno.pdf (checked in Dec. 2023)

Pont, U., Mahdavi, A. 2017. "A comparison of the performance of two- and three-dimensional thermal bridge assessment for typical construction joints"; in: "Building Simulation Applications Proceedings", M. Baratieri, V. Corrado, A. Gasparella, F. Patuzzi (Hrg.); bu.press (publisher of the Free University of Bozen-Bolzano), 3. (2017), ISSN: 2531-6702; Paper-Nr. 75, 8 S.

Pont, U., Schuss, M., Mahdavi, A., Schober, P., Hauer, K., Lux, C. 2018b. Modellierung, Optimierung, und technische Integration von Vakuumglas-Elementen; Berichte aus Energie- und Umweltforschung 24/2018; available via https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/berichte/schriftenreihe-2018-24-motive.pdf (checked in Dec.2023)

Pont, U., Wölzl, M., Schuss, M., Mahdavi, A., Schober, P., Haberl, J., Lux, C. 2020. Fensterprototypen mit integriertem Vakuumglas (FIVA); Berichte aus Energie- und Umweltforschung 47/2020; available via https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2020-47-fiva.pdf (checked in Dec.2023)

Pont, U., Schober, K. P., Wölzl, M., Schuß, M. W., & Haberl, J. 2023a. A Review on the FIVA-Project: Simulation-Assisted Development of Highly-Insulating Vacuum Glass Windows. In G. Pernigotto, F. Patuzzi, A. Prada, V. Corrado, & A. Gasparella (Eds.), Building Simulation Applications BSA 2022. 5th IBPSA Italy Conference, Bozen-Bolzano, 29th June - 1st July 2022. Konferenzbeiträge/Atti/Proceedings (pp. 69–76). bu, press - Bozen-Bolzano University Press. <https://doi.org/10.34726/3864>

Pont, U., Schuss, M., Wölzl, M., Schober, P., Hauer, K., Haberl, J., Lux, Ch. 2023b. Vakuumglas-Kastenfenster: Performance-Monitoring in Sanierungsprojekten; Berichte aus Energie- und Umweltforschung 29/2023; available via https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2023-29-vamos.pdf (checked in December 2023)

Pont, U., Schober, K. P., Wölzl, M., & Schuß, M. W. 2023c). Vakuumglasintegration in Bestands- und Neufenster. In Nabil. A. Fouad (Ed.), Bauphysik-Kalender 2023. Ernst & Sohn,

VGLASS. 2024. V-Glass – Vacuum Insulating Glass; available via <https://www.vg12.com/> (checked in December 2023)

Zoller, A. 1913. Hohle Glasscheibe. Patent-Nummer: No 387655