

# Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung

VIG-SYS-reno

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

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**33/2018**

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

### **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
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/>

# Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung

VIG-SYS-reno

Dipl.Ing. Dr.techn. Ulrich Pont, Dipl.Ing. Ernst Heiduk,  
Dipl.Ing. Olga Proskurnina,  
Dipl.Ing. Dipl.Ing.(FH) Dr.techn. Matthias Schuss,  
Christian Sustr Bakk.techn.,  
Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Ardeshir Mahdavi  
TU Wien / Abteilung Bauphysik und Bauökologie (E259.3)

Dipl.Ing.(HTL) Peter Schober, Hubert Romirer,  
Bakk.techn., Dr. Franz Dolezal  
Holzforschung Austria

unter Mitwirkung von  
Dr. Helmut Hohenstein (Dr. Hohenstein Consultancy), Dr.-Ing. Arch. Rainer Vallentin  
(vallentin + Reichmann Architekten Ingenieure Energiekonzepte) sowie weitere  
MitarbeiterInnen der genannten Institutionen

Wien, November 2015

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



## Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). 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 BMVIT 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 Verkehr, Innovation und Technologie



# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	14
Abstract .....	17
1 Einleitung.....	19
1.1 Aufgabenstellung.....	20
1.1.1 Arbeitspaket (2) zu Glas + Fenster / Fassade – State of the Art .....	21
1.1.2 Arbeitspaket (3) zu Untersuchung und Bearbeitung der hochbautechnisch-konstruktiven Einsatzmöglichkeiten von Vakuumgläsern in typischen (bestehenden) Fenster- und Fassadenkonstruktionen .....	22
1.1.3 Arbeitspaket (4) zur bauphysikalischen Simulation/Bewertung und zur konstruktiven Bewertung (mittels Laborversuchen) von neuen potenziellen VG-Einbausituationen für Fenster / Fassadenkonstruktionen ..	23
1.1.4 Arbeitspaket (5) zur Lebenszyklusanalyse (Ökologie und Kosten) von VG und Gesamtsystemen.....	24
1.1.5 Arbeitspaket (6) zu Upscaling / Bewertung des energetischen und volkswirtschaftlichen Potenzials von VG im städtebaulichen Maßstab.....	25
1.2 Stand der Technik.....	26
1.2.1 Präambel.....	26
1.2.2 Einleitung zum Stand der Technik / Stand des Wissens .....	27
1.2.3 Der aktuelle Stand der Technik bei Wärmeschutzgläsern.....	30
1.2.3.1 Überblick .....	30
1.2.3.1.1 Qualitäten und Tendenzen der Wärmeschutzgläser .....	30
1.2.3.1.2 Die aktuelle Marktsituation der Wärmeschutzgläser .....	34
1.2.3.2 Derzeit verfügbare (im Vergleich zu herkömmlichen) leichtere und dünnere Wärmeschutzgläser.....	34
1.2.3.2.1 Dünne(re) Floatglasscheiben – SGIC CLIMA TOP .....	34
1.2.3.2.2 Ersatz der mittleren Glasscheibe durch Folie – System Heat Mirror ®..	35
1.2.4 Neue technologische Entwicklungen bei Wärmeschutzglas.....	36
1.2.4.1 Mehrfach-Folien-Isolierglas .....	36
1.2.4.2 Mehrfach-Isolierglas mit Dünnglas.....	40
1.2.5 Umfeld, Entwicklungen, Verfügbarkeit und Anwendungspotential von Vakuumglas .....	43
1.2.5.1 Die historische Entwicklung von Vakuumglas .....	43
1.2.5.1.1 Forschung und Patente zu Vakuumglas .....	43
1.2.5.1.2 Erste Umsetzung des Vakuumglas-Konzepts in der Industrie.....	45

1.2.5.1.3	Erste Anwendungen des Vakuumglases Pilkington Spacia .....	47
1.2.5.2	Die technischen Grundlagen und Charakteristika von Vakuumglas .....	50
1.2.5.2.1	Die Komponenten und der Produktionsprozess von VG .....	50
1.2.5.2.2	Die Wärmetransportvorgänge im VG und der Einfluss der Komponenten .....	52
1.2.5.2.3	Ergebnisse thermischer Stresstests von VG .....	58
1.2.5.2.4	Die Vor- und Nachteile von VG .....	60
1.2.5.3	Die aktuellen Anbieter für Vakuumglas .....	61
1.2.5.3.1	Vakuumglas der Fa. NIPPON SHEET GLASS (NSG) – Pilkington Spacia / Japan .....	61
1.2.5.3.2	Vakuumglas der Fa. GLASS EAGON INDUSTRIAL Co. Seoul / Südkorea .....	62
1.2.5.3.3	Vakuumglas der Fa. QINGDAO HENGDA GLASS TECHNOLOGY Co. Ltd. / China .....	63
1.2.5.3.4	Vakuumglas der Fa. NEIJING SYNERGY VACUUM GLAZING TECHNOLOGY Co. Ltd. Peking / China .....	64
1.2.5.4	Das Anwendungspotential und der Markt für Vakuumglas .....	67
1.2.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik ..	71
1.3	Verwendete Methoden .....	72
2	Ergebnisse .....	74
2.1	Ergebnisse der hochbautechnischen, bauphysikalischen und auf Simulation und Modellversuchen basierenden Untersuchungen (Arbeitspakete 3 und 4) .....	74
2.1.1	Mechanische Versuche mit Vakuumglas in Kastenfenster-Rahmen .....	74
2.1.2	Thermische Simulationen & Tests. ....	81
2.1.2.1	Pillar-Einfluss .....	81
2.1.2.2	Normative Berechnungen über das Verbesserungspotential durch Vakuumglas (siehe auch Anhang 1) .....	82
2.1.2.3	Überblick über die Simulationsarbeiten mittels Window und AnTherm ....	82
2.1.2.4	Thermische Laborversuche mit Vakuumglas im Kastenfenstersystem ....	83
2.2	Ergebnisse zu Lebenszyklus-Untersuchungen (Arbeitspaket 5) .....	88
2.3	Ergebnisse zu UpScaling und Bewertung der energetischen Einwirkungen einer breiten Verwendung der Vakuumgläser (Arbeitspaket 6) .....	90
3	Schlussfolgerungen .....	93
4	Ausblick und Empfehlungen .....	94
5	Verzeichnisse .....	96
5.1	Abbildungsverzeichnis .....	96



5.2	Tabellenverzeichnis .....	102
5.3	Literaturverzeichnis.....	103
5.3.1	Verwendete Ressourcen .....	103
5.3.2	Eigene Publikationen im Rahmen dieses Projektes .....	104
6	Anhang.....	107



# Kurzfassung

## Ausgangssituation/Motivation

Ein guter Wärme- und Sonnenschutz ist für die Energieeffizienz von Gebäuden wesentlich. Moderne Wärmeschutzgläser sind bereits heute eine wichtige Komponente der Bestrebungen zur Reduktion des Energieverbrauchs von Gebäuden. Die – aktuell am Markt verfügbaren - besten Lösungen mit beschichteten Dreifach-Isolier-Gläsern sind jedoch (gewichtsmäßig und optisch) schwer und besitzen darüber hinaus eine sehr große Gesamtstärke. Das bedeutet größere Lasten für die Rahmenkonstruktionen, aber auch höhere Anforderungen an die Beschlags-Systeme und begrenzt ihre Einsatzmöglichkeit speziell bei der Sanierung des Gebäudebestands. Aus Gründen des Erhalts des baukulturellen Erbes (bis hin zum Denkmalschutz) scheiden solche Lösungen ebenfalls oftmals aus.

Seit vielen Jahren wird weltweit die Entwicklung von Vakuumgläsern (in diesem Report kurz als VG bezeichnet) als neues Produkt vorangetrieben, um eine Alternative zu den genannten Isoliergläsern zu schaffen. Dabei handelt es sich um zwei Gläser, die umlaufend dicht verbunden sind und deren Zwischenraum evakuiert wird (d.h. luftleer gepumpt wird). Damit die Scheiben nicht nach innen gewölbt werden, müssen kleine Abstandhalter (engl. Pillar) zwischen die beiden Scheiben platziert werden. Bis vor kurzem war die dauerhafte Aufrechterhaltung des Vakuums ein Problem. Seit einiger Zeit sind nun erstmals großindustriell produzierbare, sehr dünne, leichte, hochwärmedämmende und wirtschaftlich erschwingliche Vakuum(Isolier)gläser (VIG) seitens der Fa. Synergy (Peking) verfügbar (Es gibt inzwischen auch von anderen Herstellern aus dem süd-ost-asiatischem Raum Entwicklungen). Von diesen Gläsern wird angenommen, dass das Vakuum über viele Jahre aufrechterhalten werden kann. Damit wird es möglich, Fenster- und Fassadenelemente als Gesamtsysteme neu (leichter, schmaler und trotzdem hoch wärmedämmend) zu konzipieren und - vor allem für die Bestandssanierung - architektonisch adäquate Lösungen anzubieten. Es fehlt allerdings bis dato an einer entsprechenden Wissensbasis hinsichtlich der technologischen Umsetzung und Anpassung vorhandener Systeme an diese neuen Technologien.

## Inhalte und Zielsetzungen

Ziel dieser Sondierung war es die Basis für die weitere Entwicklung von dafür angepassten und einsetzbaren Fensterrahmen für neue Fenster/Verglasungssysteme aufbauend auf der Vakuumglastechnologie zu schaffen. Hierbei wurde eine Analyse aus vielen Gesichtspunkten angestrebt (thermische Performance, hochbau-technisch und konstruktive Performance, Life-Cycle Analyse und Aspekte der breiten Anwendbarkeit).

Ein dezidiertes Ziel war die Urbarmachung des Wissens um die genannten Technologien um eine weitere – konstruktiv machbare – Alternative bzw. Möglichkeit zur Erreichung von Klima- und Energie-Effizienzzielen im Bausektor anzubieten, sowie in Anbetracht der „emerging technology“ österreichischen Stakeholdern (Unternehmen, Verwaltung, Bauträgern, etc.) einen Wettbewerbsvorteil, in diesem sich rasch entwickelnden Technologiefeld, anzubieten.

## Methodische Vorgehensweise

Folgende Methoden wurden zur Erstellung einer ersten Wissens- und Erfahrungsbasis mit Vakuum(Isolier)gläsern angewandt:

- Erkundung des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik, Evaluierung der Verfügbarkeit und der Qualitäten von VG am Weltmarkt.
- Durchführung von bauphysikalischen, bzw. thermo-hygrischen Simulationen, sowie Untersuchung konstruktiver Optimierungskonzepte für Gesamtsysteme
- Studien bezüglich typischer Anwendungen und Ermittlung des Marktpotenzials
- Ermittlung erzielbarer energetischer Einsparpotenziale für Einzelgebäude und Stadtquartiere
- kleinmaßstäbliche Einsatzproben (Mock-Up) und Life-Cycle-Analysis-(LCA)-Berechnungen

Diese Vorgangsweise soll den Einsatz dieser neuen Technologie rasch möglich machen um (i) einerseits die vorgegebenen Energieeffizienz- und Klimaschutzziele deutlich schneller erreichen zu können und andererseits (ii) österreichischen Unternehmen einen internationalen Wettbewerbsvorteil in diesem rasch entwickelnden Technologiefeld zu verschaffen.

## Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Sondierung, insbesondere das gebaute Mock-Up-Fenster für Klimaversuche und Präsentationszwecke, die durchgeführten numerischen Wärmebrückensimulationen und gebäudebezogene Impact-Rechnungen, zeigen das Potential der Vakuumgläser auf. Sollten in Folgeprojekten Detaillösungen für Bestands- und Neubauten entwickelt werden, die den heiklen Übergang zwischen Rahmen und Glas entsprechend in den Griff bekommen, steht einer weit verbreiteten Anwendung dieser Gläser grundsätzlich nichts im Wege.

## Ausblick

Während die Grundsatzanwendbarkeit der Vakuumgläser im Zuge dieser Sondierung evaluiert wurde, ergeben sich folgende Forschungsfragen für die Zukunft:

- Wie sollen konstruktive Details sowohl für den Bestand wie auch für den Neubau (d.h. neue Fenster) aussehen, um die Stärke der Vakuumgläser auszuspielen, ohne gleichzeitig problematische Wärmebrücken zu genieren? An dieser Stelle sei auf das thematisch verbundene Nachfolgeprojekte MOTIVE (Stadt der Zukunft, 3rd Call, FFG-Projektnummer: 854690) verwiesen.
- Wie verhalten sich Fenster mit eingebauten Vakuumgläsern im Langzeitversuch. Hierzu sind Oberflächentemperaturen, Feuchtelevels, Kondensationsneigung und Haltbarkeit zu beobachten, bzw. Einbauvarianten in mehrlagigen Fenstern (Kastenfenstern) mit

unterschiedlichen Anordnungen der Dichtungsebenen an realen Einbausituationen zu evaluieren. Hierzu wird ein Projekt mit Fokus auf Monitoring zur Langzeitevaluierung angestrebt

- Weitere Aspekte der technischen Performance von Vakuumgläsern und deren Einsatz in Fenstern, wie beispielsweise Schallschutz, sollten mittelfristig ebenfalls angesehen und beforscht werden – selbst wenn kein direkter Bezug zur thermischen Performance besteht.

# **Abstract**

## **Starting point/Motivation**

To reach a high level of energy efficiency, heat and sun protection of the transparent parts of building envelopes is necessary. During the past decades, insulation glass technology up to triple glazing was developed and widely applied by the building industry. However, the high insulation levels of such glasses usually come with the price of a large thickness and heavy weight. This results in heavy structural loads for the frame and thus in rather complex and massive constructions. The mentioned issues cause a limited applicability of such glasses for retrofit purposes (architectural articulation and structural / building construction issues).

Other development efforts in the glazing industry included approaches to construct vacuum (insulation) glazing (VG / VIG). Recently, a China-based company released vacuum glazing products. This development seems to offer large, industrially manufactured, thin and light weight, highly insulating vacuum glass. The product has the potential for construction of new window and façade elements (lighter, smaller and thermally insulating).

## **Contents and Objectives**

The purpose of this research project is to explore the potential of application of vacuum glazing. The major objective is to generate a knowledge base for further development of window/glazing systems integrating this technology, especially in the context of existing building envelopes.

One defined objective of the project was to explore and document required knowledge to offer for future building and retrofit efforts a viable alternative / possibility to increase sustainability. Moreover, the Austrian stakeholders should benefit from “Technology leadership” efforts in this emerging technology field.

## **Methods**

The following approaches were conducted within this research project to reach a preliminary knowledge base about implementation of vacuum glazing:

- Exploration of availability and overall performance of high-performance glazing products on the global market.
- Exploration of design alternatives under consideration of aspects of structural optimization and building physics. This is done via experiments and deployment of simulations.
- Inquiries toward application of vacuum glazing on existing building and in the general retrofit efforts. Moreover, conduction of a market potential survey.
- Evaluation of the energy-saving potential of the application of vacuum glazing on both single buildings and city quarters.
- Construction of a mock-up window (for experiment and presentation purposes).

- Performing of basic LCA-assessment of vacuum glazing.

## **Results**

The results of this research, especially the built mock-up and the numeric thermal bridge simulations and related calculations of building energy demand (prior/after scenarios), indicate a high potential of the vacuum glazing. If appropriate building details can be developed within follow-up projects, a broad application of such high-performance-glazing's can be assumed as a possible alternative for the building sector.

## **Prospects / Suggestions for future research**

While the basic applicability of vacuum glazing was explored within this basic research, the following research questions should be targeted in the close future:

- How should building details, both for retrofit of existing windows and for new constructions, be designed, to avoid thermal bridge impact (pane/frame detail) and to utilize the thin construction width of the vacuum glazing?
- A detailed study about the long-term behavior of vacuum-glazing windows should be conducted. Thereby, the surface temperatures, condensate risk and humidity levels of different construction forms should be explored and evaluated via extensive monitoring on different windows.
- Different further aspects of the performance of vacuum glazing and windows with implemented vacuum glazing should be explored: This includes, for instance, acoustical and visual performance of such constructions.

# 1 Einleitung

Der vorliegende Endbericht des Projektes VIG-SYS-reno soll die Ergebnisse dieses einjährigen Forschungsvorhabens (2014 - 2015), das sich mit der Erforschung der Implikationen des Einsatzes von Vakuumgläsern in der (speziell erhaltungsfokussierten) Gebäudesanierung befasst hat, zusammenfassen.

Zu diesem Zweck wird zunächst die Aufgabenstellung des Projektes (anhand der Arbeitspakete) erläutert.

Dann wird der Stand der Technik hinsichtlich innovativer Verglasungslösungen erarbeitet, mit speziellem Fokus auf Vakuumverglasungen (VG) und diverser für das Projekt relevanter Themenbereiche.

Anschließend werden – gemäß den unterschiedlichen Arbeitsbereichen im Projekt – die Arbeitsmethoden beschrieben.

Im darauf aufbauenden Folgekapitel werden die erreichten Ergebnisse dargelegt, um daraus Schlussfolgerungen zu ziehen und Empfehlungen für die Zukunft in Form eines Entwicklungsausblicks zu geben.

Der Report schließt mit den in wissenschaftlicher Publikation üblichen Verzeichnissen (Literatur-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnisse).



## 1.1 Aufgabenstellung

Die globale Aufgabenstellung des Projektes war die erste Erkundung bzw. vorsichtige Urbarmachung des „neuen“ und relativ „unbekannten“ Terrains der Vakuumglasprodukte (die nun nach und nach vermehrt auf den Markt kommen werden, unter der Annahme, dass die Probleme des dauerhaften Bestands des Vakuums gelöst sind / werden) für Einsatzzwecke in erhaltungswerten Gebäudefassaden bzw. deren Fenstern.

Hierbei wurden beim ursprünglichen Forschungsdesign des Projektes folgenden Bereiche bzw. Arbeitspakete identifiziert:

- Erfassen des „State of the Art“ bei Verglasungstechnologien („Glas + Fenster/Fassade – State of the Art“), im speziellen bei Hochleistungsgläsern.
- Untersuchung und Bearbeitung der hochbautechnisch-konstruktiven Einsatzmöglichkeiten von Vakuumgläsern in typischen (bestehenden) Fenster- und Fassadenkonstruktionen.
- Bauphysikalische (Wärmebrücken, Kondensat-neigung, resultierender U-Wert, etc.) und statisch-strukturelle Fragestellungen (Belastungsszenarien und Bruchverhalten) von hochbautechnischen Lösungen, die mittels Laborversuchen bzw. Simulationen untersucht werden können.
- Lebenszyklusanalyse (LCA und Kosten) für Vakuumgläser und Gesamtsysteme.
- Upscaling / Bewertung des energetischen und volkswirtschaftlichen Potenzials von VG im städtebaulichen Maßstab.

Das Forschungsdesign wurde durch „Projektmanagement“ (Arbeitspaket 1) und „Disseminationsbemühungen“ (Arbeitspaket 7) als eigenen Arbeitsbereiche umrahmt. Im Folgenden sollen die einzelnen Bereiche (mit Ausnahme der Rahmenarbeitspakete Projektmanagement und Disseminationsbemühungen) etwas detaillierter erörtert werden.

### **1.1.1 Arbeitspaket (2) zu Glas + Fenster / Fassade – State of the Art**

Als Ziel dieses Arbeitspakets sollte eine umfassende Literatur-, Markt- und Hintergrundrecherche für innovative Verglasungslösungen mit Fokus auf Vakuumverglasungen (VG) und damit verbundener relevanter Themenbereiche durchgeführt werden. Im Detail wurden (i) aktueller Markt, d.h. aktuell verfügbare Produkte und deren Eigenschaften, (ii) Stand der Wissenschaft und Forschung (nationale und internationale Forschungsbemühungen), (iii) Stand der Technik und Entwicklungen (gewissermaßen fertige Produkte in der Pipeline) und (iv) der zu erwartende Markt in der Zukunft untersucht werden. Die Ergebnisse dieser, doch sehr umfangreichen Analyse – sind im Stand der Technik (weiter unten in diesem Report) dokumentiert, und nicht unter Resultate (wo die Ergebnisse der anderen Arbeitspakete, die „konkreter“ mit Vakuumgläsern zu tun haben, aufgelistet werden).

Die genannten Aspekte wurden außerdem durch „Use Case“ Definition und Untersuchung für Vakuumgläser in der Bestandssanierung ergänzt, sowie um eine Sammlung von allen relevanten Daten für die Folgearbeitspakete (bzw. vorbereitende Arbeiten dazu, solche Daten sind Herstellerinformationen, bauphysikalische Kennwerte, Einbauhinweise, etc.). Darüber hinaus beinhaltet dieses Arbeitspaket auch die Kontaktaufnahme und Mitwirkungsvorbereitungen von relevanten Stakeholdern (Hersteller, Planer, Denkmalamt, ...).

### **1.1.2 Arbeitspaket (3) zu Untersuchung und Bearbeitung der hochbautechnisch-konstruktiven Einsatzmöglichkeiten von Vakuumgläsern in typischen (bestehenden) Fenster- und Fassadenkonstruktionen**

In diesem Arbeitsbereich wurden folgende Ziele definiert: Hochbautechnische Details von typischen Verglasungen sollen hinsichtlich SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) mit der Verwendung von Vakuumglas evaluiert werden. Außerdem werden detaillierte hochbautechnische Darstellungen ausgewählter Konstruktionen (Status Quo, d.h. vor der Sanierung) erstellt und die Lösungsvorschläge bzw. Sanierungsvarianten mit Vakuumgläsern diskutiert, anhand der Recherche-Ergebnisse aus dem Vor-Arbeitspaket. Dabei wird auch die Sinnhaftigkeit von Sanierungs-Varianten evaluiert und überlegt welche Einflussgrößen kritisch sind. Zu solchen Einflussgrößen gehören beispielsweise Art und Größe der Verglasungsflächen oder auch Wiederverwendbarkeit von bestehenden Fenster- / Rahmenkonstruktionen. Es besteht aber selbstverständlich eine Verbindung zu den statisch-strukturellen und bauphysikalischen Überlegungen (Vorbereitende Arbeiten, Ableitung der Eignung aus statischen und/oder bauphysikalischen Grundprinzipien) der Folgearbeitspakete. In diesem Kontext waren auch vorbereitende Arbeiten für die Folgearbeitspakete integriert, wie beispielsweise welche Wärmebrücken (in Wandöffnungs- / Fenster- / Rahmen-Konstruktionen treten eine große Anzahl verschiedenartiger Wärmebrücken auf) in den Folgearbeitsschritten besonderem Augenmerk unterzogen werden müssen.

### **1.1.3 Arbeitspaket (4) zur bauphysikalischen Simulation/Bewertung und zur konstruktiven Bewertung (mittels Laborversuchen) von neuen potenziellen VG-Einbausituationen für Fenster / Fassadenkonstruktionen**

Zu diesem Arbeitspaket wurden folgende Planungen angestellt:

- Durchführung von bauphysikalischen (z.B. Wärmebrücken) und konstruktiven (z.B. Lastabtragung) Berechnungen/Simulationen von ausgewählten Einbausituationen und Sanierungsvarianten der ausgewählten Anwendungsmöglichkeiten.
- Laborversuche an einfachen Probekörpern zur Untersuchung von Lasteinleitung, Lastabtrag und Aussteifung von Fenstern mit Vakuum-Glas.
- Erkenntnisgewinn, wie sich die Verwendung von innovativen VG-Produkten auf Bauteile auswirkt (hinsichtlich Energieverbrauch, Lastabtragung, etc.).
- Erkennen und Vermeiden von Bauschadensrisiken, die durch den unbedachten Einsatz innovativer VG-Produkten und anderen Baumaterialien verursacht werden können (z.B. Wärmebrücken-Problematik bei den Schnittstellen zwischen alter und neuer Konstruktion, Aufbringen zu großer statischer oder dynamischer Belastungen).

Diese Planungen werden aus folgender Überlegung heraus angestellt: Um Sicherheit und Dauerhaftigkeit zu gewährleisten, ist eine exakte Kenntnis über das Verhalten von neuartigen und innovativen Konstruktionen in typischen Einbausituationen notwendig. Während in früheren Zeiten dies über „Trial und Error“ durchgeführt wurde, können heute moderne IT-gestützte Tools, sowie detaillierte Laborversuche zur detaillierten Analyse eingesetzt werden, ohne das hier die Gefahr besteht, Bauschadensfälle zu realisieren. Gerade im Bereich von evakuierten VG-Produkten ist eine weitgehende simulatorische und labortechnische Evaluierung sinnvoll, um das teilweise nicht bekannte Potential dieser Lösungen herauszufinden.

In diesem Kontext wurde auch die Auswahl von Werkzeugen und Testmethoden, wie auch Simulationstools, sowie von zu evaluierenden Szenarien und damit verbundenen Eingabedaten in diesem Arbeitspaket diskutiert.

#### **1.1.4 Arbeitspaket (5) zur Lebenszyklusanalyse (Ökologie und Kosten) von VG und Gesamtsystemen**

In diesem Arbeitspaket wurden folgende Aspekte angeschnitten:

- Grundlagenermittlung zur Erstellung von Ökobilanzen von Vakuumisolierverglasungen.
- Erfassen der Randbedingungen wie Transport- und Energiebereitstellung für die Produktion von Vakuumgläsern, so wie Vorbereitungen zum Einpflegen der produktionsspezifischen Ökodaten (die aber – aus Datenschutzgründen - von den chinesischen Herstellern nicht zur Publikation freigegeben wurden).
- Kostenabschätzungen und Rentabilitätsanalyse für VG und (gebaute) Gesamt-Systeme: (i) Hierzu wurden typische Wieder Gründerzeitbauten mit Hilfe normativer Energieverbrauchsabschätzungsverfahren (Österr. Energieausweis) herangezogen und unterschiedliche Applikationsszenarien für Vakuumgläser konzipiert und deren Einfluss via parametrischer Berechnungen erfasst. (ii) Weiters wurden detaillierte Kostenkalkulationen für unterschiedliche Einsatzszenarien durchgeführt (nämlich Glastausch in Bestandsfenstern, Einbau von Vakuumglas und Einbau von Vakuumisolierverglasung).

Hierzu ist folgendes festzuhalten: Bei neuwertigen Bauprodukten lässt sich die Performance über den gesamten Lebenszyklus nicht ohne Weiteres abschätzen, daher war in diesem Arbeitspaket der Herstellungsprozess, die Transportbedingungen, die Einbausituation, die Lebenszeit und die Demontage betrachtet, und analysiert, inwieweit diese Produkte während ihrer Nutzung neben ihren energetischen Vorteilen von Seiten der LCA-Analyse her sich in der Anwendung verhalten. Es war von vorneherein zu erwarten, dass es in diesem Arbeitspaket erforderlich sein würde, fehlende Daten zu approximieren, auch diese Approximationen anzudenken war Teil des Arbeitspakets. Weiters wird in diesem Arbeitspaket eine empirische Annäherung an die Herstellungs- und Betriebs-Kosten solcher Lösungen betrieben.

Folgende Tätigkeiten waren geplant:

1. Diskussion der Systemgrenzen, sowie Beschreibung der einzelnen Lebensphasen: der Herstellungsprozess, ggf. die Transportbedingungen, die Einbausituation, die Lebenszeit und die Demontage.
2. Analyse des vorhandenen Datenmaterials zur Identifikation von Erhebungsbedarf und Default-Werten.
3. Assessment der ökologischen Performance.
4. Empirische Annäherung an die Herstellungs- und Maintenance-Kosten (Bottom Up Approach).

### **1.1.5 Arbeitspaket (6) zu Upscaling / Bewertung des energetischen und volkswirtschaftlichen Potenzials von VG im städtebaulichen Maßstab**

In diesem Arbeitspaket wurden folgende Aspekte angeschnitten:

- Abschätzung der energetischen und volkswirtschaftlichen Implikationen, die sich durch eine Anwendung von VG-Systemen ergeben.
- Bewertung des energetischen Potentials von Vakuumverglasungen in großen Gebäudebeständen anhand (i) des Kopplungsprinzips in Kohorten-Modellen; (ii) Heranziehen und Integration der Vakuumverglasungen in die Kohorten-Modelle; (iii) Modellrechnungen zum deutschen Wohngebäudepark 2010-2016 und (iv) Modellrechnungen zum Berliner Hansaviertel 2010 – 2060 (Diese Berechnungen wurden von R. Vallentin und MitarbeiterInnen durchgeführt).
- Ermitteln welche (theoretischen) Einsparungspotentiale mit der weiten Verbreitung von hocheffizienten Vakuumgläsern erzielt werden könnten.

## 1.2 Stand der Technik

Der nachstehend beschriebene Stand der Technik beruht auf den Arbeiten von Dr. H. Hohenstein, DI. E. Heiduk und dem VIG-SYS-reno-Team (*Literatur-, Markt- und Hintergrundrecherche für innovative Verglasungslösungen mit Fokus auf Vakuumverglasungen (VG) und aller für das Projekt relevanter Themenbereich*). Teile davon entstammen aus Vorarbeiten zum Projekt, andere Teile aus den Arbeiten des Arbeitspaket 2 des Projektes (*Glas + Fenster / Fassade – State of the Art*).

### 1.2.1 Präambel

Die globale und speziell die europäische Flachglasindustrie leidet derzeit stark unter Überkapazitäten, da in den Jahren des Baubooms vor 2008 zu viele Kapazitäten aufgebaut wurden. Ein Flachglaswerk (Floatglas-Erzeugung) ist eine kostenintensive Investition. Prozessbedingt läuft ein solches Werk ab dem Start für mindestens 15 Jahre kontinuierlich ohne dass die Produktionsmenge relevant verändert werden kann. Da die seit 2008 zurückgegangene Bautätigkeit in Europa sich erst langsam erholt, kann die dynamische Entwicklung hin zu Dreifach-Wärmeschutzglas (und damit einer Glasebene mehr für herkömmliche Wärmeschutzfenster im Vergleich zu früheren Zweifachverglasungen) dies nur teilweise kompensieren.

Technische Weiterentwicklungen die die benötigten Glasmengen weiter reduzieren würden, sind daher aus wirtschaftlichen Gründen kaum von der traditionellen Glasindustrie zu erwarten, außer es lassen sich zusätzliche Märkte erschließen.

Gerade Vakuumglas, das aus zwei Scheiben vorgespanntem Flachglas besteht und trotzdem sehr dünn ist, könnte beim Austausch von Fenstern mit nur einer Glasebene völlig neue Märkte erschließen, welche für Isolierglas-Produkte in Folge ihrer Schwere nicht erreichbar sind. Das sind in Mittel- und Nordeuropa einerseits das relativ kleine Segment alter und sehr oft baukulturell wertvoller Fensterkonstruktionen, denen sich dieses Forschungsprojekt vorrangig widmet, sowie der Austausch von alten Verglasungen, welche bis Anfang der 80er Jahre im Bestand verbaut wurden. Andererseits besteht ein großes Potenzial in jenen Weltregionen in denen es sowohl Heiz- wie auch Kühlbedarf für ein komfortables Innenraumklima gibt, aus entwicklungstechnischen Gründen aber bis lange vor allem Einfachverglasungen verwendet wurden.

Es bleibt zu hoffen, dass eine dynamische Weiterentwicklung sowohl von Glas- wie auch Fensterentwicklungen stattfinden wird, die dann allen genannten Markt-Segmenten und Welt-Regionen zu Gute kommen wird.

## 1.2.2 Einleitung zum Stand der Technik / Stand des Wissens

Grundsätzlich lassen sich drei wesentliche Überziele im Bauwesen betreffend transparenter Bauteile festhalten:

- Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauch im Gebäudebereich (Investition/Bau und Operation/Betrieb).
- Integrative Zugänge zu einer lebenszyklusorientierten Wirtschaftlichkeit der gebauten Umwelt.
- Gewährleistung eines hohen Nutzerkomforts, bzw. Steigerung von nicht-optimalen Nutzerkomfort-Situationen.

Diese Zielsetzungen dienen allen Bereichen der Planung, des Bauens und der Baukomponentenentwicklung als Ansporn für eine laufende Verbesserung.

Der Staat Österreich kann hier international als einer der Vorreiter betrachtet werden, mitunter auch in Folge der stringenten Entwicklung der Bauvorschriften, welche Projekte, die früher als „ambitioniert“ beschrieben worden wären sukzessive zum Normalfall erhebt. Während diese Entwicklung zu begrüßen ist, stellt es Planende und Bauindustrie vor große Herausforderungen. Betreffend die Entwicklung von Glas, bzw. Wärmeschutzverglasungen ist hierzu festzuhalten, dass die letzten 30 Jahre eine positive und dynamische Forschungs- und Entwicklungstätigkeit stattgefunden hat. Dreifach-Verglasungen gehören in Mittel- und Nordeuropa inzwischen mit einem Marktanteil von mehr als 60% in Produktion und Applikation (im Neubau) zum Standard. Eine Darstellung der historischen Entwicklung und das mit der Weiterentwicklung verbundene Fragezeichen ist in Abbildung 1 dargestellt.

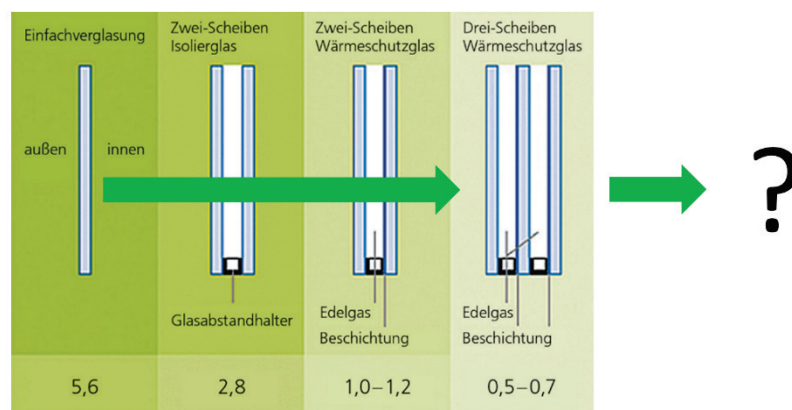


Abbildung 1: historische Entwicklung der Verglasungstechnologie in der westlichen Welt und Ihre „ungewisse“ Zukunft (Abbildung: Hohenstein).

### Wohin kann sich und wohin wird sich die technische Entwicklung prinzipiell weiterentwickeln?

Neben der gewünschten Weiterentwicklung der thermischen Kennwerte von Verglasungen, werden zwei weitere Aspekte in der nahen Zukunft große Bedeutung erlangen:

- Gewichtseinsparung: Zukünftige Verglasungen / Glasprodukte sollten nicht weiter im Gewicht zunehmen, sondern tendenziell wieder leichter werden.



- Dimensionen: Ähnlich dem Gewicht ist eine weitere Zunahme in der Dicke der Gläser/Fenster nicht wünschenswert, sondern tendenziell eine Verschlankeung anzustreben.

Bauphysikalische Aspekte, an denen in der Entwicklung nach wie vor zur Verbesserung modifiziert wird, beinhalten:

- Wärmeleitung in den verwendeten Materialien (Glas, Glasabschluss, Rahmenverbindung, Flügel/Stock, Wandanschluss)
- Modifikation von Strahlungsdurchgang
- (in Einschlüssen und an Oberflächen stattfindende) Gaskonvektion

Die Entwicklung von Low-E(missivity)–Beschichtungen hat den Anteil des Strahlungstransports im Isolierglas sehr stark reduziert. Obwohl diese Beschichtungen inzwischen zum Ausstattungsstandard von zeitgenössischen Verglasungs- und Fenstersystemen gehören, sind hier weitere Verbesserungen zu erwarten (vergleiche Abbildung 2).

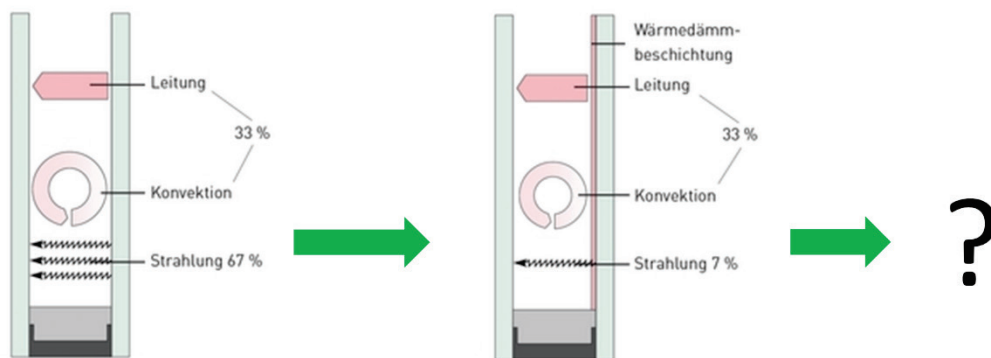


Abbildung 2: Entwicklung der Low-E-Beschichtungen und unklare zukünftige Entwicklungen (Abbildung: Hohenstein).

Nach der Entwicklung der sogenannten „Warm-edge“ Abstandhalter, die die Wärmeleitung im Randverbund deutlich reduzieren konnten, verbleibt heute die Konvektion in Isoliergläsern als stärkster Wärmetransportweg. Edelgasfüllungen mit Argon und Krypton reduzieren durch ihre Trägheit diesen Effekt im Scheibenzwischenraum, dabei ermöglicht Krypton sehr schlanke Scheibenzwischenräume. Aus ökonomischen und ökologischen Betrachtungen ist Krypton als fragwürdig zu sehen: Es ist ein relativ selten vorkommendes Element, die Gewinnung ist teuer und die Ökobilanzierung des Materials zeigt infolge der energieintensiven Gewinnung schlechte Werte.

Die organischen Komponenten gängiger Randverbundsysteme können einen Gasaustausch nicht völlig unterbinden. Dabei tritt oftmals Wasserdampf in den Zwischenraum ein, während gewollte Bestandteile langsam ausdiffundieren. Der Wasserdampf wird in der Regel durch die im Randverbund integrierten Trocknungsmittel aufgefangen. Das begrenzte Reservoir dieser Trocknungsmittel reduziert die wirksame Lebensdauer von Isoliergläsern auf (nach derzeitigem Wissensstand) etwa 25 Jahre.

Mit Zweifach-Isolierglas ist ein Wärmedurchgangskoeffizient von  $0,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  kaum unterschreitbar. Daher haben sich Dreifachverglasungen entwickelt. Die Konvektion und damit der Wärmetransport durch das Isolierglas verstärken sich bei jeder Abweichung von der Senkrechten durch kürzere Zirkulationswalzen, was durch Einteilung in unterschiedliche Kammern bis zu einem gewissen Grad reduziert werden kann (siehe Abbildung 3). Der Effekt kann durch mehrere zusätzliche Scheibenzwischenräume gemeinsam mit zusätzlichen Low-E-Schichten reduziert, aber nicht verhindert werden. Allerdings ist auch hier festzuhalten, dass kommende und im Moment in Entwicklung befindliche Innovationen (z.B. Folien in den Zwischenräumen) sicherlich noch eine Verbesserung bringen können.

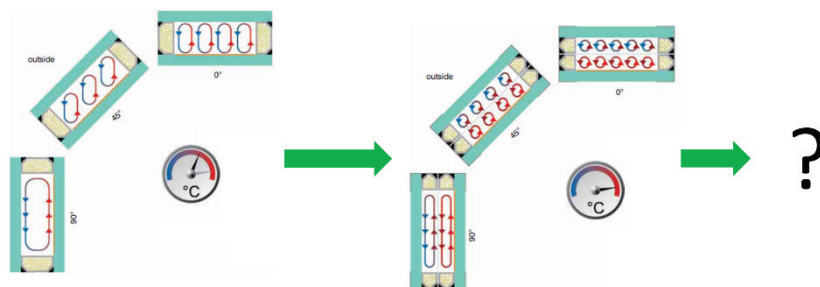


Abbildung 3: Einfluss der Glasneigung auf das Konvektionsverhalten in Isoliergläsern (Abbildung: Hohenstein).

Bei zwei oder mehr Scheibenzwischenräumen verstärken sich bei Temperaturschwankungen die auf den Randverbund einwirkenden Pumpbewegungen (siehe Abbildung 4). Jede Erwärmung oder Abkühlung des Isolierglaselements verändert den Innendruck der Scheibenzwischenräume. Bei mehreren Scheibenzwischenräumen sind die Bewegungen der Außenscheiben stärker. Das beansprucht auch die elastischen Komponenten des Randverbunds (Silikon, Butyl) stärker und limitiert deren Lebensdauer.

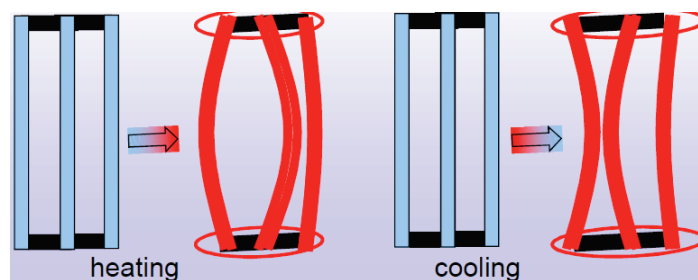


Abbildung 4: Pumpbewegungen bei mehreren Scheibenzwischenräumen (Abbildung: Hohenstein).

Für eine weitere Verbesserung des Wärmeschutzes können anhand der beschriebenen Aspekte folgende Strategien überlegt werden:

- Zusätzliche gasgefüllte Scheibenzwischenräume (mit reduziertem Gewicht).
- Entfernung der Luft / des Gases aus dem Scheibenzwischenraum (= Hoch-Vakuum).

## 1.2.3 Der aktuelle Stand der Technik bei Wärmeschutzgläsern

### 1.2.3.1 Überblick

#### 1.2.3.1.1 Qualitäten und Tendenzen der Wärmeschutzgläser

Einen sehr guten Überblick über die derzeit erhältlichen Wärmeschutzgläser, deren technische Kennwerte und die besten derzeit erreichbaren Qualitäten bietet die Komponentendatenbank des Passivhausinstituts Darmstadt (PHI Darmstadt n.d.). Diese Datenbank mit Status August 2014 51 Dreifach-Verglasungen mit einem  $U_g$ -Wert von kleiner  $0,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Abbildung 5 zeigt einen Auszug aus dieser Online-Datenbank.

Das unabhängige Institut für höchste Energieeffizienz in Gebäuden

DEUTSCH ENGLISCH

Home | Passivhaus Institut | Passivhaus-Infos | Zertifizierung | PHPP | Publikationen & Tools | Fortbildung | Awards | Netzwerke | Presse

Sie befinden sich hier: Home > Zertifizierung > Komponenten > Komponentendatenbank

Google™ Benutzerdefinierte Suche  Suchen x

Home | Komponentendatenbank | Verglasungen

Suche innerhalb der Kategorie:  go

Erweiterte Suche (z.B. filtern nach Land) ▾

Zertifiziert seit  Firmensitz/Land

Produktname	Zert.	Hersteller	Gasfüllung	Dicke	Scheibenaufbau	g-Wert	$U_g$	$T_{vis}$
<input type="checkbox"/> iplus Advanced 1.0	DE EN	AGC Glass Europe s.a.	<input type="text" value="Kr 90%"/>	36	4/12/4/12/4	0.42	0.44	0.64
<input type="checkbox"/> iplus Top 1.1	DE EN	AGC Glass Europe s.a.	<input type="text" value="Kr 90%"/>	36	4/12/4/12/4	0.51	0.49	0.72
<input type="checkbox"/> iplus Top 1.1T	DE EN	AGC Glass Europe s.a.	<input type="text" value="Kr 90%"/>	36	4/12/4/12/4	0.53	0.49	0.73
<input type="checkbox"/> ClimaGuard Premium2	DE EN	Guardian Thalheim GmbH	<input type="text" value="Kr 90%"/>	36	4/12/4/12/4	0.53	0.49	0.74
<input type="checkbox"/> iplus 3 CE	DE EN	INTERPANE GLAS INDUSTRIE AG	<input type="text" value="Kr 90%"/>	36	4/12/4/12/4	0.50	0.49	0.72
<input type="checkbox"/> iplus Advanced 1.0	DE EN	AGC Glass Europe s.a.	<input type="text" value="Kr 90%"/>	32	4/10/4/10/4	0.42	0.51	0.64
<input type="checkbox"/> iplus Top 1.1	DE EN	AGC Glass Europe s.a.	<input type="text" value="Kr 90%"/>	32	4/10/4/10/4	0.51	0.56	0.72
<input type="checkbox"/> iplus Top 1.1T	DE EN	AGC Glass Europe s.a.	<input type="text" value="Kr 90%"/>	32	4/10/4/10/4	0.53	0.56	0.73
<input type="checkbox"/> iplus 3 CE	DE EN	INTERPANE GLAS INDUSTRIE AG	<input type="text" value="Kr 90%"/>	32	4/10/4/10/4	0.50	0.56	0.72
<input type="checkbox"/> ClimaGuard nrG	DE EN	Guardian Thalheim GmbH	<input type="text" value="Kr 90%"/>	36	4/12/4/12/4	0.62	0.60	0.73

Abbildung 5: Ausschnitt Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt: Verglasungen mit Krypton-Füllung (Abbildung entnommen aus <http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE>, abgerufen Nov. 2016).

Zwölf der Einträge haben als Füllgas Krypton. In der Optimierung von möglichst hohem g-Wert (>50%) und möglichst niedrigem  $U_g$ -Wert schneiden hier die Produkte *ClimaGuard Premium2* und *iplus Top 1.1T* am besten ab. Das Produkt *iplus Top 1.1T* des Herstellers AGC Glass Europe (früher Glaverbel) mit dem Aufbau 4/12/4/12/4, also einer Gesamtstärke von 36 mm

und zwei Low-E-Beschichtungen auf Position 2 und 5, erreicht bei einem g-Wert von 53 % einen U-Wert von  $0,49 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$ . Das Produkt *ClimaGuard Premium2* des Herstellers Guardian-Thalheim erreicht mit dem gleichen Aufbau bei einem g-Wert von 53 % ebenfalls einen U-Wert von  $0,49 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$ . Lediglich bei der Lichttransmission hat es einen Prozentpunkt weniger. Durch die schlechte Ökobilanz von Krypton werden nachstehend auch die Verglasungen mit dem Füllgas Argon als relevant für die weiteren Betrachtungen diskutiert.

Die Datenbank enthält 39 zertifizierte Dreifach-Isolierglas-Systeme mit Argonfüllung. In der Optimierung von möglichst hohem g-Wert (>50%) und möglichst niedrigem  $U_g$ -Wert schneidet hier wieder das Produkt *ClimaGuard Premium2* am besten ab. Das Produkt *ClimaGuard Premium2* des Herstellers Guardian-Thalheim erreicht mit dem Aufbau 4:/16/4/16:/4, also einer Gesamtstärke von 44 mm und zwei Low-E-Beschichtungen auf Position 2 und 5, bei einem g-Wert von 53 % einen U-Wert von  $0,53 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$ . Mit dem Aufbau 4:/18/4/18:/4, also einer Gesamtstärke von 48 mm, bei einem g-Wert von 50 % erreicht das Produkt *SGG PLANITHERM ULTRA* vom Hersteller Saint-Gobain Glass ebenfalls einen U-Wert von  $0,53 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$  (siehe Abbildungen 6 - 9).

Home | Passivhaus Institut | Passivhaus-Infos | Zertifizierung | PHPP | Publikationen & Tools | Fortbildung | Awards | Netzwerke | Presse

Sie befinden sich hier: Home > Zertifizierung > Komponenten > Komponentendatenbank

Google<sup>™</sup> Benutzerdefinierte Suche  Suchen x

---

Home | Komponentendatenbank | Verglasungen

Suche innerhalb der Kategorie:  go

Erweiterte Suche (z.B. filtern nach Land) ▾

Zertifiziert seit  Firmensitz/Land

Produktname	Zert.	Hersteller	Gasfüllung	Dicke	Scheibenaufbau	g-Wert	$U_g$	$T_{vis}$
<input type="checkbox"/> iplus Advanced 1.0	DE EN	AGC Glass Europe s. a.	Ar 90%	44	4:/16/4/16:/4	0.42	0.53	0.64
<input type="checkbox"/> ClimaGuard Premium2	DE EN	Guardian Thalheim GmbH	Ar 90%	48	4:/16/4/16:/4	0.53	0.53	0.74
<input type="checkbox"/> SGG PLANITHERM ULTRA N	DE EN	Saint-Gobain Glass Deutschland	Ar 90%	40	4:/18/4/18:/4	0.50	0.53	0.71
<input type="checkbox"/> SGG PLANITHERM ULTRA N II	DE EN	Saint-Gobain Glass Deutschland	Ar 90%	40	4:/18/4/18:/4	0.50	0.53	0.71
<input type="checkbox"/> iplus Advanced 1.0	DE EN	AGC Glass Europe s. a.	Ar 90%	42	4:/15/4/15:/4	0.42	0.56	0.64
<input type="checkbox"/> iplus Top 1.1	DE EN	AGC Glass Europe s. a.	Ar 90%	44	4:/16/4/16:/4	0.51	0.58	0.72
<input type="checkbox"/> iplus Top 1.1T	DE EN	AGC Glass Europe s. a.	Ar 90%	44	4:/16/4/16:/4	0.53	0.58	0.73
<input type="checkbox"/> ClimaGuard Premium2	DE EN	Guardian Thalheim GmbH	Ar 90%	44	4:/16/4/16:/4	0.53	0.58	0.74
<input type="checkbox"/> iplus 3 E	DE EN	INTERPANE GLAS INDUSTRIE AG	Ar 90%	44	4:/16/4/16:/4	0.50	0.58	0.72
<input type="checkbox"/> SGG PLANITHERM ULTRA N	DE EN	Saint-Gobain Glass Deutschland	Ar 90%	40	4:/16/4/16:/4	0.50	0.58	0.71

Abbildung 6: Ausschnitt Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt: Verglasungen mit Argon-Füllung (Abbildung entnommen aus <http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE>, abgerufen Nov. 2016).

### iplus Advanced 1.0

Verglasungsaufbau	U <sub>g</sub> (EN 673) [W/(m <sup>2</sup> K)]	g (EN 410) [ - ]
4:/10/4/10/:4 Kr 90%	0.51	0.42
4:/12/4/12/:4 Kr 90%	0.44	0.42
4:/14/4/14/:4 Ar 90%	0.59	0.42
4:/15/4/15/:4 Ar 90%	0.56	0.42
4:/16/4/16/:4 Ar 90%	0.53	0.42

Abbildung 7: Daten von iplus Advanced 1.0 – Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt (Abbildung entnommen aus <http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE>, abgerufen Nov. 2016).

### ClimaGuard Premium2

Verglasungsaufbau	U <sub>g</sub> (EN 673) [W/(m <sup>2</sup> K)]	g (EN 410) [ - ]
4:/18/4/18/:4 Ar 90%	0.53	0.53
4:/16/4/16/:4 Ar 90%	0.58	0.53
4:/14/4/14/:4 Ar 90%	0.64	0.53
4:/12/4/12/:4 Kr 90%	0.49	0.53

Abbildung 8: Daten von ClimaGuard Premium2 – Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt (Abbildung entnommen aus <http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE>, abgerufen Nov. 2016).

### SGG PLANITHERM ULTRA N II

Verglasungsaufbau	U <sub>g</sub> (EN 673) [W/(m <sup>2</sup> K)]	g (EN 410) [ - ]
4:/12/4/12/:4 Ar 90%	0.72	0.50
4:/14/4/14/:4 Ar 90%	0.64	0.50
4:/16/4/16/:4 Ar 90%	0.58	0.50
4:/18/4/18/:4 Ar 90%	0.53	0.50

Abbildung 9: Daten von SGG Planitherm Ultra N II – Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt (Abbildung entnommen aus <http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE>, abgerufen Nov. 2016).

In Abhängigkeit vom Verglasungsaufbau variieren die technischen Kennwerte der gezeigten Verglasungen. Die Abbildungen 7 bis 9 zeigen dabei sehr deutlich wie groß der Einfluss der Breite des Scheibenzwischenraums ist. Bei Argonfüllung erscheint die Breite mit 18 mm optimal wirksam, dies hat aber auch einen Einfluss auf die Lebensdauer: Scheibenzwischenräume mit mehr als 12 mm bei Dreifachverglasungen sind bezüglich der Lebensdauer (Diffusionsdichtheit, Trockenmittel, Pumpbewegungen) als kritisch zu betrachten. Aus Dauerhaftigkeitsbetrachtungen erscheinen somit die Lösungen mit max. 12 mm (U-Werte von 0,7 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>).

[Genannte Firmen:

- Fa. AGC Glass Europe, +3224093000, <http://www.agc-glass.eu>; <http://www.yourglass.com/agc-glass-europe/gb/en/home.html>
- Fa. Guardian-Thalheim, Guardianstraße 1, 06766 Bitterfeld-Wolfen, Deutschland <https://www.guardian.com>
- Fa. Saint-Gobain Glass, 18, Avenue d'Alsace, F-92400 Courbevoie, <http://de.saint-gobain-glass.com>]

Die genannten Produkte erreichen U-Werte von  $0,53 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  bei Konstruktionsstärken von 44 bis 48 mm und einem Gewicht von drei 4mm starken Glasscheiben (per  $\text{m}^2$  Fensterfläche). Weitere Verbesserungsschritte durch beispielsweise durch eine vierte Scheibe, bzw. einen weiteren Scheibenzwischenraum erscheinen in Folge der Konstruktionsstärke und des hohen Gewichts nicht sinnvoll. Darüber hinaus ist eine solche Verglasung nur mit großen Problemen hinsichtlich des bereits beschriebenen Pumpens im Randverbund realisierbar, würde also große Probleme in der Dauerhaftigkeit aufweisen.

Sinnvolle Verbesserungen von mehrlagigen, edelgasgefüllten Isolierglaskonzepten könnten durch folgende Schritte erfolgen:

Gewichtsreduktionen:

- Folien statt Glas für die Zwischenlagen (z.B. Folien der Fa. Eastman/Southwall bis zu einer Breite von 200 cm)
- Dünnere Gläser (4/5 mm Gläser durch vorgespannte Gläser mit einer Stärke von 2 mm oder weniger)
- Leichtere Gläser durch einen Kompositaufbau (Glas und Polymerverbundaufbauten der Scheiben)

Verbesserungen des Wärmeschutzes:

- Zusätzliche Zwischenlagen und mehr Scheibenzwischenräume
- Adäquate Weiterentwicklung der Abstandhalter

### 1.2.3.1.2 Die aktuelle Marktsituation der Wärmeschutzgläser

In den Jahren vor der Wirtschaftskrise von 2008 wurden in der Flachglasindustrie global sehr große Produktionskapazitäten aufgebaut. In Folge der Krise bestehen nun gewisse Überkapazitäten. Durch die spezielle Prozessstruktur in Flachglaswerken ist ein Abbau dieser Überkapazitäten nicht einfach durchführbar. Ein Flachglaswerk ist eine kostenintensive Investition und läuft prozessbedingt ab Produktionsstart mindestens 15 Jahre kontinuierlich ohne dass die Produktionsmenge relevant verändert werden kann. Durch den Rückgang der globalen und europäischen Bautätigkeit und der sich daraus ergebenden Überkapazitäten existiert im Moment ein starker Preisdruck bei Flachglas. Auch die zunehmende Substitution von Zweifachgläsern durch Dreifachgläser mildert dies nur bedingt ab. Derzeit wird Dreifach-Wärmeschutzglas oft zum gleichen Preis wie Zweifach-Wärmeschutzglas angeboten. Im Sommer 2015 bewegte sich der Großhandelspreis für Zweifach- und Dreifach-Wärmeschutzglas zwischen 30 und 50 Euro pro Quadratmeter. Damit lagen die Preise bei etwa der Hälfte der Preise die 10 Jahre zuvor erzielt werden konnten.

Es bestehen Befürchtungen, dass die Sparnotwendigkeit, die sich aus obigem Sachverhalt ergibt zu qualitativen Problemen führen könnte. Der Markt wird zusätzlich durch neue Anbieter aus den neuen EU-Mitgliedsstaaten verändert, welche zum Teil neue Anlagen errichtet haben und sehr kostengünstig produzieren. Ein Beispiel ist die polnisch-kroatische Firma PressGlass, welche zweifach-Isolierglas sehr hoher Qualität um 18 €·m<sup>2</sup> anbietet (2015, Fa. PressGlass, ul. Kopalniana 9, 42-262 Poczesna, Polen, +48 34 327 50 69, <http://www.pressglass.eu/?lang=de>). Während für die Abnehmer und die Konkurrenzsituation ein divergenter Markt vorteilhaft sein mag, besteht unter Umständen ein gewisser negativer Einfluss auf die Innovationsbereitschaft der Branche.

### 1.2.3.2 Derzeit verfügbare (im Vergleich zu herkömmlichen) leichtere und dünnere Wärmeschutzgläser

#### 1.2.3.2.1 Dünne(re) Floatglasscheiben – SGIC CLIMA TOP

Die beiden Produkte *SGIC CLIMATOP N LIGHT* und *SGIC CLIMATOP LUX LIGHT* der Fa. Saint-Gobain Isolierglas verwenden 3 mm starke Floatglasscheiben. Dies mag für europäische Verhältnisse dünn wirken, muss aber international kontrastiert werden: In den vereinigten Staaten sind vielerorts Floatglasscheiben mit lediglich 2,8 mm Stärke in Verwendung (die dortigen Bauvorschriften erlauben solche geringen Stärken). Abbildung 10 zeigt den Systemschnitt des *SGIC CLIMATOP LUX LIGHT* (3-fach Glas). Die Reduktion der Scheibenstärke bei diesem System resultiert in (i) einer 25%igen Gewichtsreduktion (22,5 kg·m<sup>-2</sup> statt 30 kg·m<sup>-2</sup>); (ii) U<sub>g</sub>-Werten zwischen 0,8 und 0,5 W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>; (iii) einer Lichttransmission von 73% (N LIGHT) bzw 74% (LUX LIGHT). Der Gesamtenergiedurchlass von Scheiben hängt stark von deren Stärke ab, dementsprechend lassen dünnere Scheiben mehr Strahlung durch (erhöhte g-Werte und Lichttransmissionswerte).

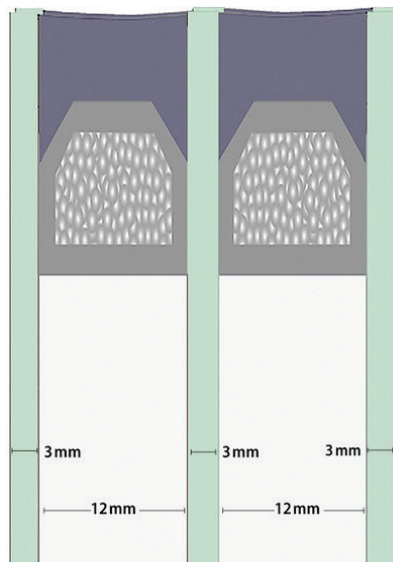


Abbildung 10: Systemschnitt des SGIC CLIMATOP LUX LIGHT Isolierglassystems (Abbildung entnommen aus [www.glaswelt.de/GLASWELT-2014-1/3-fach-aber-leichter,QUIEPTU2OTYzNyZNSUQ9MTA0ODcw.html](http://www.glaswelt.de/GLASWELT-2014-1/3-fach-aber-leichter,QUIEPTU2OTYzNyZNSUQ9MTA0ODcw.html)).

#### 1.2.3.2.2 Ersatz der mittleren Glasscheibe durch Folie – System Heat Mirror ®

Der Ersatz der mittleren Scheibe(n) durch eine Kunststofffolie resultiert in deutlich verringertem Gewicht und sehr dünnen Schichtstärken gegenüber herkömmlichen Mehrscheibengläsern. Zusätzlich hat die Folie eine viel geringere Strahlungsabsorption und zeigt demzufolge kaum Erwärmung bei Strahlungsdurchgang. Damit werden kritische Temperaturspannungen im Material verhindert. Die meisten Folien ermöglichen bereits eine Beschichtung mit dünnen Metallschichten, so dass Eigenschaften von Low-E-Beschichtungen von Gläsern ebenfalls realisiert werden können. Die mit Folien ausgestatteten Mehrschichtengläser stellen daher einen Kompromiss zwischen dem niedrigen Gewicht von Zweischeibenverglasungen und dem verringerten konvektiven Wärmetransport von Dreischeibenverglasungen dar. Abbildung 11 zeigt ein solches Glas, wie von der Fa. Minusdrei gmbh realisiert.



Abbildung 11: Folienisoliertes Glas (Abbildung von der Fa. Minusdrei gmbh).

Die Anforderungen an diese Folie sind anspruchsvoll. Sie muss metallisch beschichtbar, vollkommen transparent und langfristig vergilbungsfrei sein. Außerdem darf eine Temperaturänderung die Planität (Geradheit) nicht verändern. Bei temperaturbedingten



Längenänderungen würde sich die Folie ansonsten zu wellen beginnen und damit den Durchblick beeinträchtigen. Auch deshalb muss die Folie stark gespannt in die Verglasung eingebaut werden. Das ist fertigungstechnisch anspruchsvoll und resultiert darin, dass die Verklebung an den Abstandhaltern des Randverbunds auf Dauer einer Zugbeanspruchung unterliegt. Die Heat Mirror-Technologie wurde ursprünglich am Massachusetts Institute of Technology entwickelt. Die Folie wird von der Firma Southwall, Tochtergesellschaft der Fa. Eastman produziert. Sie erlaubt es bei einem Dreifachglas Funktionsbeschichtungen auf vier Oberflächen aufzubringen. Der gewählte Produktname zeigt, dass bei den Anwendungen in den USA vor allem Sonnenschutzbeschichtungen gewählt wurden. Die Folie wird von der Fa. Eastman Chemical Company aus Kingsport, Tennessee, USA derzeit mit einer Maximalbreite von 2 Metern erzeugt. Das Glassystem mit der Heat-Mirror-Folie und Heat-Mirror als Markenname wird in den USA von der Fa. Southwall Technologies Inc. in Palo Alto in Kalifornien gefertigt. Es werden Lizenzen an weitere Hersteller vergeben, für die deutschsprachigen Länder ist der Lizenzinhaber die Fa. minusdrei gmbh in Oberasbach in Deutschland.

#### **1.2.4 Neue technologische Entwicklungen bei Wärmeschutzglas**

Ergänzend zum etablierten Dreifachisoliertglas und den beiden bereits genannten „Leicht“-Systemen sind seit kurzem neue, dünnere und leichtere Wärmeschutzgläser verfügbar. Deren thermische Performance konnte bis auf einen  $U_g$ -Wert von  $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  verbessert werden. Dieser Entwicklungsschritt konnte mit verschiedenen technologischen Ansätzen realisiert werden.

##### **1.2.4.1 Mehrfach-Folien-Isolierglas**

Eine neue technische bei Wärmeschutzgläsern ist die konsequente Weiterentwicklung des Heat-Mirror-Systems durch mehrere Zwischenräume im Schichtaufbau des Isolierglases.

Durch die notwendige Zugspannung der Folie konnten solche mehrlagigen Aufbauten bis dato nicht einfach realisiert werden. Dies lag darin begründet, dass die innenliegenden Abstandhalter des Randverbunds von den Folien nach innen gezogen wurden (vergleiche Abbildung 12). Dieses technische Problem konnte inzwischen konstruktiv gelöst werden, dadurch ist es nun möglich mehrere Folien zur Generation mehrerer Scheibenzwischenräume in den Raum zwischen den Gläsern einzuspannen (Abbildung 13). Infolge dessen verbessert sich der Wärmeschutz der Verglasung stark. Obwohl die Konstruktionsstärke zunimmt wird das Gesamtsystem nur geringfügig schwerer. Technisch fällt eine solche Konstruktion in die Gruppe der Mehrscheiben-Isoliergläser und wird vom IFT-Rosenheim auch so genannt, nach der deutschen Bauregelliste ist es aber wieder ein Zweifach-Isolierglas. Tabelle 1 liefert einen Überblick über die technischen Kennwerte des Heat-Mirror® Isolierglas der Fa. Eastman

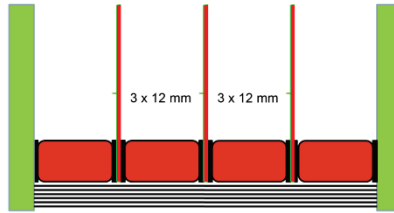


Abbildung 12: Systemschnitt des Randverbunds bei mehreren zwischengespannten Folien und den nach innen gezogenen Abstandhaltern [Abbildung entnommen aus [www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How\\_It\\_Works.aspx](http://www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx)].

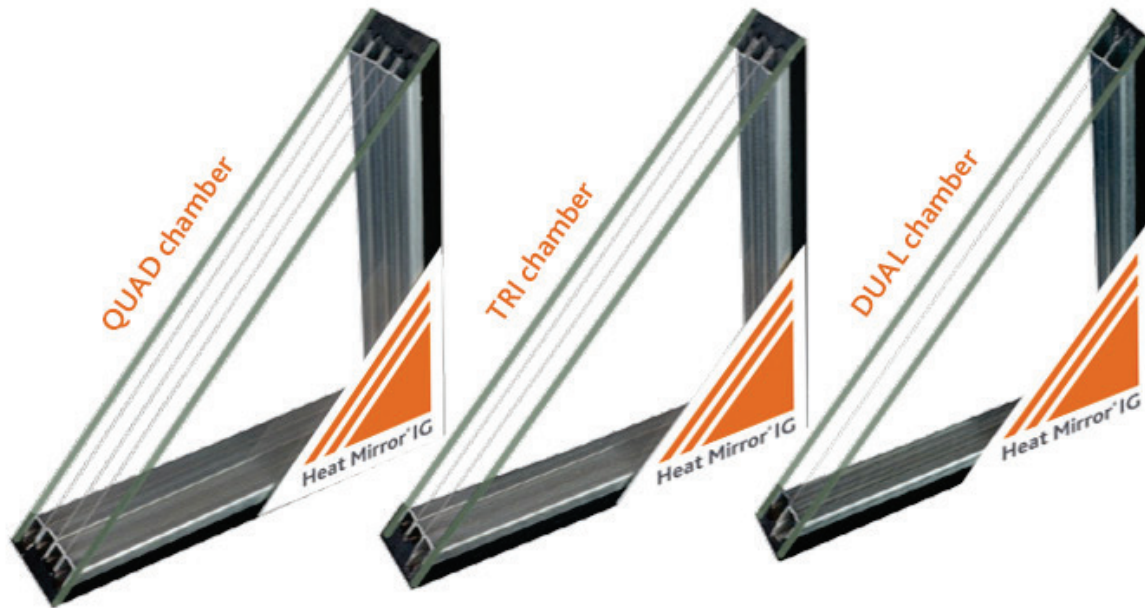


Abbildung 13: Schnittdarstellungen von Mehrkammer-Isolierglas mit Heat Mirror-Folien [Abbildung entnommen aus [www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How\\_It\\_Works.aspx](http://www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx)].

Tabelle 1: Heat-Mirror® Isolierglas: Vergleichstabelle (basierend auf [www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How\\_It\\_Works.aspx](http://www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx)).

	Airtight Chambers	Insulating Performance		Solar heat gain coefficient	Visible light transmittance, %	UV blocking
		R-Value	U-Value			
Standard dual-pane clear IG	1	R2	0,50	0,78	82	42
Standard dual-pane coated IG	1	R4	0,25	0,27	65	95
Standard triple-pane coated IG	2	R5	0,19	0,25	57	97
Heat Mirror® IG	2	R6	0,16	0,24-0,51	57-70	99,5
Heat Mirror® IG	3	R10	0,10	0,23-0,44	51-62	100
Heat Mirror® IG	4	R20	0,05	0,22-0,38	45-55	100

Anmerkung: Die Werte aus Tabelle 1, speziell die U-Werte, erscheinen sehr gut, ggf. ist zu prüfen ob hier Standardverfahren zur U-Wert-Berechnung oder Messung verwendet wurden. Der deutsche Verarbeiter minusdrei gmbh legt für seine Produkt THERMUR HM eine Reihe von Prüfzeugnisse des IFT-Rosenheim und anderer Teststellen vor (siehe Tabelle 2). Dabei soll z.B. ein Glaselement mit zwei Folien, die auch Funktionsbeschichtungen tragen, und drei 12-mm- Zwischenräumen einen  $U_g$ -Wert von  $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  erreichen. Das Glaselement hat eine Gesamtstärke von 50 mm, eine Lichttransmission von 52% und einen Gesamtenergiedurchlassgrad von 40%; Diese Werte weichen doch signifikant von den in der Tabelle gezeigten Werten ab. Das Produkt THERMUR HM wurde auch bei einer der letzten Baumessen (2015) in München ausgestellt (Abbildungen 14 und 15).



Abbildung 14: THERMUR HM auf der Baumesse 2015 in München (Bau 2015; Abbildung von E. Heiduk / H.Hohenstein ).

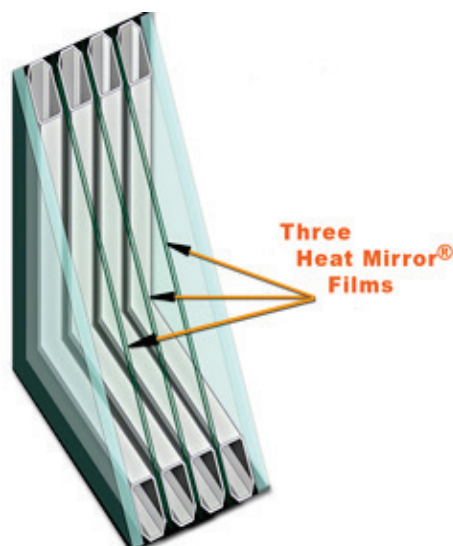


Abbildung 15: Schnittbild mit 3 Heat Mirrow Folien (Abbildung von THERMUR HM).

Tabelle 2: Daten der THERMUR HM Verglasungsprodukte (Zahlen lt. Minusdrei gmbh)

Elementdicke [mm]	Anzahl der Scheibenzwischenräume	$U_g$ [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Anmerkungen
24	2	0,5	
32	2	0,4	
50	3	0,3	Am Markt verfügbar
58	4	0,2	IFT-geprüft
58	4	0,1	Berechnet
58	4	0,05	Berechnet mit Xenongas entsprechend (www.ecoglass.ca)

Das THERMUR HM Glas soll mit drei Folien und einer Gesamtstärke von 58 mm einen  $U_g$  – Wert von  $0,2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  erreichen können. Das entspricht dem Wärmeschutz einer guten, opaken Außenwand. Allerdings sollte die Stärke der Scheibenzwischenräume nochmals kritisch hinterfragt werden, da temperaturbedingte Pumpbewegungen hier in Folge der Volumenänderungen der Füllgase zu erwarten sind. Die langfristige Gasdichtheit der Konstruktion muss daher kritisch gesehen werden.

Laut der minusdrei gmbh wird das THERMUR Glas in 11 Arbeitsschritten hergestellt:

1. Abstandshalter aus Edelstahl auf der Scheibe positionieren
2. Film auflegen (von der Rolle)
3. Film abschneiden (2 mm Öffnung einbringen)
4. zweiten Abstandshalter positionieren
5. zweite Scheibe positionieren
6. Randverbund abdichten
7. Scheiben in den Ofen
8. Scheiben auf 99° erwärmen
9. Film schrumpft und spannt sich
10. Abkühlphase (optimale Verklebung des RV)
11. mit Gas füllen + Abdichten

Der komplexe Herstellungsprozess und die relativ teure Folie verursachen hohe Kosten für das Produkt. In den USA gibt es inzwischen eine maschinelle Fertigungsstraße, allerdings ist diese Anlage im Moment (2015) hinsichtlich Ihrer Produktionskapazitäten nicht ausgelastet. In Europa (Deutschland) wird noch manuell gefertigt, was sich ebenfalls in hohen Kosten niederschlägt.

Die Vorteile des Produkts gegenüber einer konventionellen Dreifach-Verglasung hat Herr Siegmund E. Rösner von der Firma minusdrei gmbh bei der Fassadenbautagung 2015 an der TU Wien in der nachfolgenden Darstellung (Abbildung 16) gegenübergestellt.

**V.003 Leistungsvergleich:** (zu Dreifachgas) Stand: Jan. 2014 EnEV 2009 + EnEV 2014



<b>-3glas® System HEAT MIRROR™</b> (übertrifft die Anforderungen der EnEV 2016!)	<b>Dreifach-Isolierglas</b> (erfüllt auch die Anforderungen der EnEV 2016!)
☺☺ unerreichte Dämmwerte Ug = 0,5 bis 0,3 W/m²K (ab 21 mm Ug = 0,8)	☹ Dämmwerte Ug = 0,8 bis 0,5 W/m²K
☺ ab 25 mm Ug = 0,6 W/m²K ☺ ab 38 mm Ug = 0,4 W/m²K	☹ ab 36 mm Ug = 0,7 W/m²K ☹ ab 40 mm Ug = 0,6 W/m²K
☺ ab 29 mm Ug = 0,5 W/m²K ☺ ab 50 mm Ug = 0,3 W/m²K	☹ ab 44 mm Ug = 0,5 W/m²K
☺☺ Gewicht wie 2-fach Isolierglas (ab 20 kg/m²) bei „Barrierefrei“ immer wichtiger!	☹☹ <b>Mehrgewicht + 50% (ab 30 kg/m²)</b>
☺ geringe Beeinträchtigung der Dämmwirkung im Winter	☹ Nachlassen der Dämmwirkung bei großer Temperaturdifferenz
☺ ausgereiftes Produkt - im anspruchsvollen Objektbau bewährt	☺ Produkt im Passivhausbau bewährt Ug = 0,7 W/m²K (36 mm)
☺ Dachbereich – geringe Beeinträchtigung durch Konvektion	☹☹ Dachbereich: Nachlassen der Dämmwirkung + extreme Belastung des RV
☺☺ Handling und Montage wie Standardglas	☹☹ <b>erschwertes Handling und Montage</b>
☺ großformatige Öffnungsflügel ohne Gewichts-Einschränkung (Barrierefrei)	☹ bedingt großformatige Öffnungsflügel (Einschränkung durch hohes Gewicht!)
☺☺ Hebe-Schiebe-Türen mit max. Abmessungen* (geringes Gewicht)	☹ Hebe-Schiebe-Türen mit Einschränkungen, wegen Bautiefe + Gewicht!
☺ Pfosten-Riegel-Konstruktionen mit großen Querformaten ohne Einschränkung	☹ Pfosten-Riegel-Konstruktionen mit großen Querformaten nur mit Zusatzmaßnahmen zur Gewichtsabtragung (= Kosten)
☺ alle bewährten Konstruktionen können eingesetzt werden	☹ Konstruktionen prüfen und anpassen (wegen Gewicht und EnEV)
☺☺ Nachrüstung in vorhandene Konstruktionen Ug = 0,6 W/m²K ab 24 mm	☹ Nachrüstung in vorh. Konstruktionen (36 mm?) <b>nicht möglich!</b>
☹ Scheibenmaße 1.970 mm x 3200 bis 5000* mm (je nach Konfiguration)	☺☺ max. Scheibenmaße möglich (jedoch mit Formateinschränkung)
☹ Glastyp und Glasart frei wählbar	☹ Glastyp und Glasart frei wählbar
☺ Hitzeschutz optional (g = 50%, 39%, 28%, 25% bis 18% + 10%)	☹ Sonnenschutz kombinierbar (jedoch mittlere Scheibe dann ESG)
☺☺ 99,5 % UV-Schutz (Schutz vor Ausbleichen und Alterung)	☹ UV Schutz = Nein (zusätzlich möglich)
☺☺ Durchsicht wie bei 2-fach Glas	☹☹ <b>beeinträchtigte Durchsicht = erhöhte Spiegelung</b> wegen 3 Glasflächen
☹ Aussparungen im Glas (Durchreiche) nicht möglich	☺ Aussparungen im Glas (Durchreiche) möglich
☺☺ CE-Prüfung nach DIN 1279-2 mit bestem Werten bestanden! <b>Einziges Isolierglas mit keinerlei Veränderung der Dichtigkeit!</b>	☹☹ CE-Prüfung 1279-2 ( <b>Prüfzeugnis?</b> ) (wenn Prüfzeugnis dann nur mit einem Aufbau: 4-12-4-12-4)
☺☺ gleichmäßig hohe Qualität der Dichtigkeit durch Produktion vorgegeben! (Fertigung – Lagerung – Wärmeofen – Abkühlen – Edelgasfüllen)	☹ Ausreichende Dichtigkeit = Mindestanforderung! ( <b>Fertigung und Edelgasfüllen erfolgt in einem Arbeitsgang</b> )
☺ bewährter Randverbund (Edelstahl oder Stahl)	☹ Randverbund (3-fach-Aufbau + Asymmetrischen Aufbau extrem belastet)
☺☺ konsequent auf Langlebigkeit ausgerichtet (ca. 22 bis 35 Jahre DIN EN1279)	☹☹ <b>eingeschränkte Lebensdauer!</b> (siehe allgem. Publikationen 3-fach Glas)
☺☺ keine Zusatzkosten bei der Rahmenkonstruktion	☹ <b>Mehrprijs bei der Rahmenkonstruktion</b> (Bautiefe + Beschlag + Gewicht!)
☺☺ <b>geringe Verglasungskosten</b> (100% = 15,- bis 20,- €/m²)	☹☹ <b>Mehrprijs Verglasungskosten</b> (200% = 30,- bis 40,- €/m² Gewicht)
☹ <b>Anschaffungspreis</b> (wird durch Nachhaltigkeit egalisiert)	☺ <b>Anschaffungspreis</b> (günstiger mit den o.g. Nachteilen)

Abbildung 16: Gegenüberstellung Heat-Mirror-Glas und herkömmliches Dreischeibenisolierglas (Abbildung aus der Präsentation von S.E. Rösner / minusdrei gmbh / Fassadenbautagung 2015).

Zusammengefasst sind die Vorteile dieses Konzeptes sein geringes Gewicht, die sehr guten U-Werte (auch bei horizontaler Anwendung). Nachteilig ist das ungewisse Langzeitverhalten des Randverbundes und die recht hohen Kosten des Produkts.

### 1.2.4.2 Mehrfach-Isolierglas mit Dünnglas

Ein innovativer Ansatz Mehrfach-Isolierglas weiter zu verbessern wurde im EU-Forschungsprojekt (MEM4WIN, [www.mem4win.eu](http://www.mem4win.eu)) verfolgt. Die Projektleitung dieses Projekts lag bei der niederösterreichischen Firma Lisec, welche Maschinen für die Flachglasbearbeitung herstellt (Fa. LISES Group Fa. LiSEC Group, LISEC Austria GmbH, Peter-Lisec-Straße 1, 3353 Seitenstetten, Tel: +43-7477-405-0 <http://www.lisec.com>). In diesem Projekt ging es um die Verwendung von Dünngläsern, welche von anderen Wirtschaftszweigen abseits des Bauwesens in der Vergangenheit vorangetrieben wurden.

Dünnglas ist ein sehr dünn gefertigtes Glas das durch weitere Bearbeitungsschritte wie durch Glashärten verschiedene Eigenschaften erlangt. Auf der einen Seite hat es die Festigkeit von Glas, auf der andererseits Charakteristika einer Folie oder Membran.

Die enorme Festigkeit und Flexibilität dieser thermisch behandelten Dünngläser zeigen die Abbildungen 17-19. Nach einer Belastung schmiegt sich das Glas kurzfristig an die Form der Belastung, bricht aber nicht und schleudert dann elastisch zurück. Diese Eigenschaften erlauben die Fertigung von Mehrscheiben-Isolierglas mit dünnen Gläsern außen und sehr dünnen Gläsern in den mittleren Positionen (Abbildung 20).



Abbildung 17, 18 und 19: Belastungstest Dünnglas (Abbildung: Fa. Lisecc).

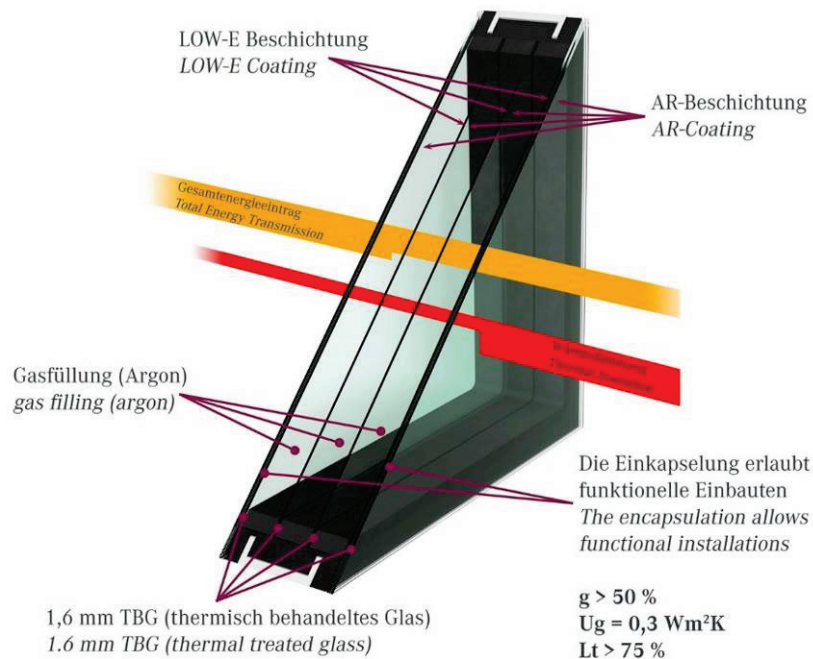


Abbildung 20: Aufbau des MEM4WIN 4-fach Isolierglas (Abbildung: Fa. Lisecc).

Dieses Produkt ist insgesamt 66mm dick. Im Schichtaufbau können die Außenscheiben in Abhängigkeit vom Scheibenformat eine Dicke von 3 bis 1,85 mm und die mittleren Scheiben von 1,6 bis 0,9 mm haben. Dadurch ist dieses Element mit vier Glasscheiben leichter als Dreifach-Wärmeschutzglas und bei kleineren Formaten sogar leichter als das Heat-Mirror-Glas.

Die relativ große Gesamtstärke des Verglasungssystems verursacht die gleichen temperatur- und windbedingten Klimabelastungen wie die anderen vorgestellten Konzepte. Die speziellen Eigenschaften von Dünn Glas ermöglichen aber die Aufnahme der temperaturbedingten Spannungen durch Durchbiegungen im Glasfeld wodurch deutlich geringere Spannungen auf den Randverbund einwirken. Das sollte die Haltbarkeit des Randverbunds und damit die Langzeitqualität positiv beeinflussen.

Derzeit gibt es keine großen Mengen an Dünn Glas am Weltmarkt, darüber hinaus ist es relativ teuer. Daher sind auch die Produkte der Weiterverarbeitung, vor allem im Vergleich zu den aktuellen Preisen von konventionellem Isolierglas, relativ teuer. Die Fa. Lisecc tritt nicht als „Produzent“ sondern als Lieferant der Maschinen zur Herstellung auf. Dünn Gläser können über nachstehende Firmen bezogen werden:

- Fa. Energy Glas GmbH, Zur Frado 1, 34466 Wolfhagen, Deutschland, Tel: 05692 / 99 74 50; [www.energy-glas.de](http://www.energy-glas.de)
- Fa. Winterglas GmbH, Betriebsstraße 14, 3652 Leiben, Österreich, Tel.: 02752-700 80, <http://www.winterglas.co.at>

## 1.2.5 Umfeld, Entwicklungen, Verfügbarkeit und Anwendungspotential von Vakuumglas

Dieses Sondierungsprojekt widmet sich zwar generell High-Tech-Gläsern, fokussiert aber auf Vakuumgläser. Daher soll im Folgenden Grundsätzliches zu Vakuumgläsern festgehalten werden.

Wird dem Scheibenzwischenraum die Luft entzogen und ein (Hoch)Vakuum erreicht, reduziert sich der konvektive und konduktive Wärmetransport im Gesamtsystem sehr stark. Der Scheibenzwischenraum kann sehr klein gehalten werden, wodurch sehr dünne Glaslösungen möglich werden.

### 1.2.5.1 Die historische Entwicklung von Vakuumglas

#### 1.2.5.1.1 Forschung und Patente zu Vakuumglas

Die Idee den Wärmetransport in Verglasungssystemen durch einen evakuierten Raum zu minimieren ist keine neue Idee. Am 29. Oktober 1913 hat DI. Alfred Zoller in Deutschland das Patent für eine „Hohle Glasscheibe“ erhalten. In nachstehender Abbildung (Abbildung 21) ist das Prinzip dargestellt, welches auch heute noch solchen Produkten zugrunde liegt. Zoeller sah bereits 2 evakuierte Bereiche vor. Die spezifischen Komponenten von Vakuumglas, nämlich Randversiegelung, Stützkörper zum Abstandhalten, sowie der Vakuumpalt sind bereits hier dokumentiert

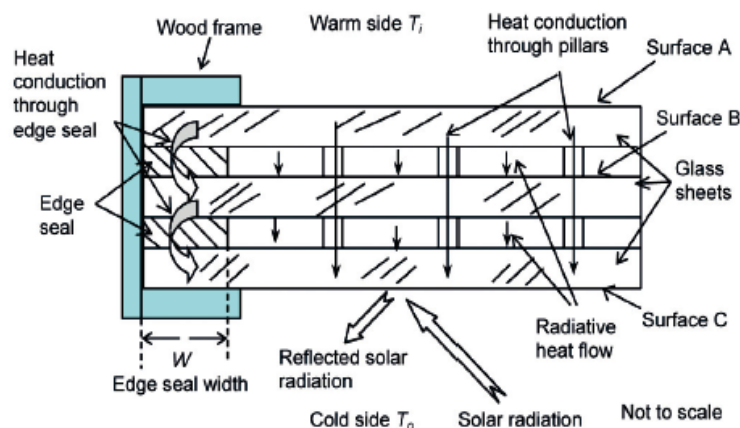


Abbildung 21: Dreifach Vakuumglas-Konzept, Patent A. Zoller, 1913 (Zoller 1913).

Obwohl bereits dieses frühe Patent Bestand hat sich viele Jahre wenig Fortschritt ergeben, vermutlich aufgrund der vermeintlichen Unlösbarkeit der Randversiegelung. Erst 1987 wurde in den USA ein Patent (US4683154) für ein laser-verschweißtes Vakuumglas für das amerikanische Energieministerium eingetragen. Die Abstandhalter waren hierbei kleine Glaskugeln, der Rand war umlaufend laserverschweißt (Abbildung 22). Die erste (nachgewiesene) Herstellung eines Vakuumglases gelang 1989 an der University of Sydney, Australien durch Richard E. Collings (Abb. 23) und Stephen J. Robins. Dabei wurde die luftdichte Randversiegelung mit Glaslot hergestellt, das eine Schmelztemperatur von 450 °C aufweist. Der Physiker Jian-Zheng Tang (Abb. 24) forschte ab 1990 gemeinsam mit Collings an einer Weiterentwicklung.



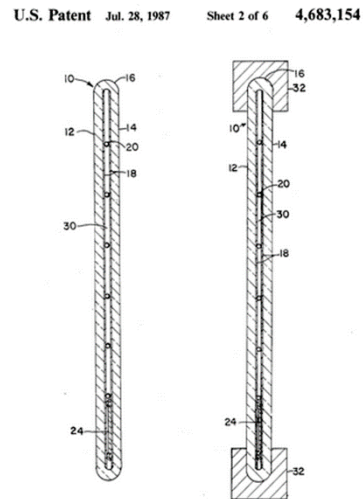
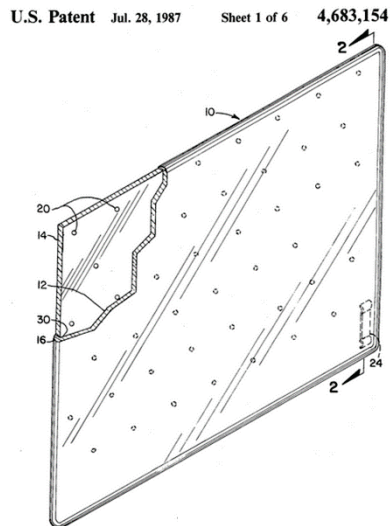


Abbildung 22: Laser-verschweißtes Vakuumglaskonzept mit Glaskugeln als Stützkörper, US Patent 4683154 (Abbildung US-Patent 4683154).



Abbildung 23 (links): Richard E. Collins, Emeritus Professor, School of Physics, University of Sydney.

Abbildung 24 (rechts): Jian-Zheng Tang, Emeritus Professor, School of Physics, University of Beijing.

Diese Zusammenarbeit resultierte in zwei Folgepatenten aus dem Jahr 2000 für Evakuierungsventile und Abstandhalter (Abbildungen 25 und 26). Anders als noch im US-Laserschweißkonzept bei dem die Scheiben in einer evakuierten Kammer verschlossen worden wären wird hier zuerst die Randversiegelungen hergestellt und dann erst mittels eines Evakuierungsventils die Luft herausgepumpt. Weitere wichtige Grundlagen wurden für die Form und Art der Abstandhalter und die Integration von Low-E-Beschichtungen erarbeitet. Interessanterweise hält die Firma US Guardian Industries Corp. ab 1999 die meisten Patente zum Vakuumglas, obwohl es sich dabei nicht um ein produzierendes Unternehmen handeln dürfte. Tabelle 3 liefert zum Abschluss dieser Sektion einen Überblick der historischen Abfolge der Entwicklung von Vakuumgläsern.

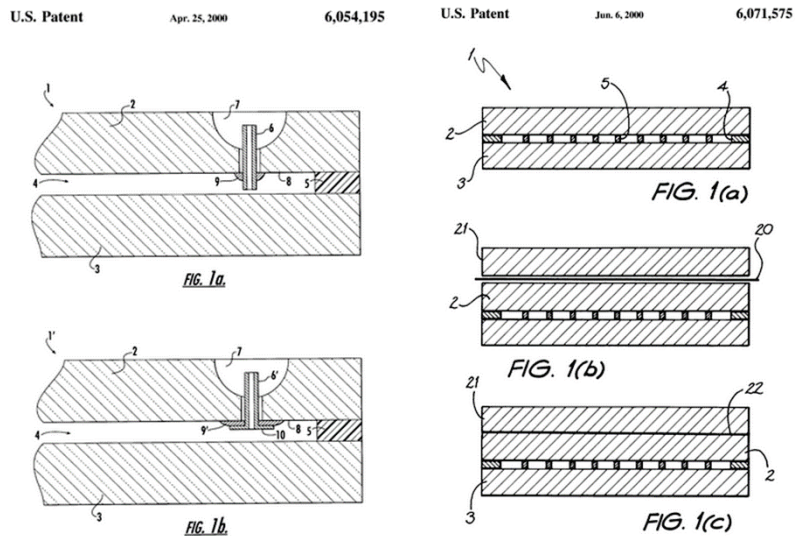


Abbildung 25 und 26: Patente für Evakuierungsventil und Abstandhalter für Richard Edward Collins und Jian-Zheng Tang [Entnommen aus <https://www.google.com/patents/US6054195> und <https://www.google.com/patents/US6071575>].

Tabelle 3: Historischer Überblick über die Entwicklung von Vakuumgläsern

Jahr	Entwicklung
1913	Dreifach-Vakuumglas-Konzept, Patent Zoller
1989	erste Herstellung von VG, Universität Sydney durch Richard E. Collins und Stephen J. Robins mit Glaslottemperatur 450°C
1990-1998	Gemeinsame Forschungsbemühungen von Collins und Tang
1996	Aufbau einer Vakuumglasproduktion bei NSG, Japan (Prof. Collins)
1998	Herstellung von VG, Universität Ulster, Philipp Griffiths and Trevor Hyden mit Glaslottemperatur 200 °C
1999	Aufbau einer Vakuumglasproduktion bei HENGDA, China mit J. Tang
2005	Aufbau einer Vakuumglasproduktion bei EAGON, Korea
2011	Aufbau einer Vakuumglasproduktion bei SYNERGY, China mit J. Tang

### 1.2.5.1.2 Erste Umsetzung des Vakuumglas-Konzepts in der Industrie

Nach seiner Emeritierung im Jahr 2000 arbeitete Richard E. Collins mit der japanischen Firma Nippon Sheet Glass (NSG) zusammen. Dabei wurde Vakuumglas zum seriell herstellbaren Industrieprodukt weiterentwickelt. Dazu sagte Richard Collings 2002 (NSG 2002):

*„Das Konzept der Vakuumverglasung wurde zum ersten Mal in der Patentliteratur im Jahr 1913 genannt. Trotz vieler beschriebener Versuche ist die erste erfolgreiche Herstellung von Vakuumverglasung erst 1989, kurz nach Beginn der Forschung zu diesem Thema an der Universität von Sydney, gelungen. Seit dieser Zeit hat diese Universität wesentliche Fortschritte in der Wissenschaft und Technologie der Vakuumverglasung gemacht.“*

Seit 1994 ist die Universität mit Nippon Sheet Glass Company Limited über die Vermarktung von Vakuumverglasung tätig. Nippon Sheet Glass gebracht hat, um diese Zusammenarbeit voran technischen Fähigkeiten, kreative Gestaltungsansätze und eine starke Entschlossenheit, eine hoch performante, rentabel Produkt zu entwickeln.

Im Jahr 1996 startete Nippon Sheet Glass sein kommerzielles Produkt Vakuumverglasung, SPACIA. SPACIA bietet Aussicht auf erhebliche Vorteile für unseren Lebensstandard durch die Reduktion des Energieverbrauchs. Ein besonderer Vorteil der SPACIA ist seine geringe Dicke die die Nachrüstung in herkömmlichen Fensterrahmen ermöglicht. Keine andere Isolierverglasungs-Technologie hat diese Fähigkeit.

Nippon Sheet Glass und der Universität von Sydney haben gemeinsam für viele Aspekte der Wissenschaft und Technologie der Vakuumverglasung, darunter innovative Designkonzepte und Produktionsmethoden, Pionierarbeit geleistet. Die Umsetzung der Ergebnisse dieser Zusammenarbeit hat zu wesentlichen Verbesserungen in der Effizienz des Herstellungsprozesses, und der Leistung von SPACIA seit der ersten kommerziellen Version ergeben.

Ich bin sehr stolz auf die Beiträge, die die Universität von Sydney zu dieser produktiven Partnerschaft mit Nippon Sheet Glass gemacht hat. Ich freue mich sehr, dass seit meinem formalen Ausscheiden aus der Universität im Dezember 2000, ich in der Lage bin, mich in der laufenden Zusammenarbeit zwischen Nippon Sheet Glass und der Universität zu beteiligen, und weiterhin für den Erfolg dieses innovativen Konzepts beitragen. December 2002, Richard E. COLLINS“

Mit Nippon Sheet Glass Co. hat Collins das weltweit erste kommerzielle Vakuumglas-Produkt, bekannt als Pilkington SPACIA, entwickelt. Die Verglasung besteht aus zweimal 3 mm dickem Glas mit 0,2 mm Vakuumabstandsspalt, also mit einer Gesamtstärke von 6,2 mm. Die Abbildung 27 zeigt die VG-Struktur dieses Produkts. Es handelt sich um eine Anordnung von Stützen (Pillars / Abstandhalter) mit 0,2 mm Dicke und 0,5 mm Durchmesser welche zwischen zwei Glasscheiben im Achsabstand von 20 mm eingelegt wurden. Der Vakuumraum wurde mit Glaslot versiegelt.

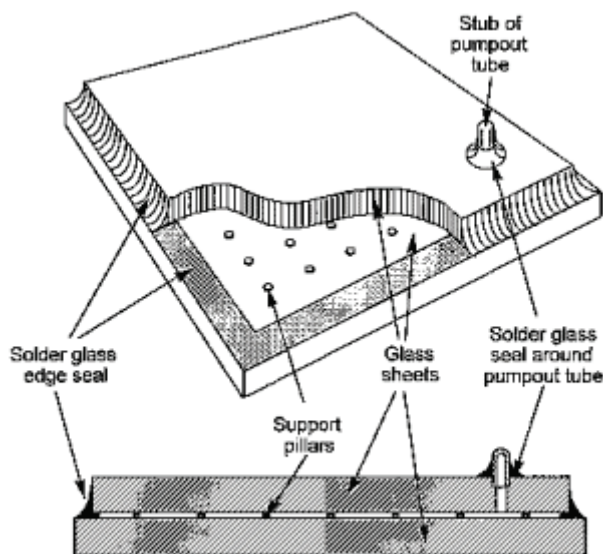


Abbildung 27: Prinzip-Darstellungen vom Vakuumglas Spacia [Abbildung aus [www.nsg-spacia.co.jp/tech/index.html](http://www.nsg-spacia.co.jp/tech/index.html)].

Diese erste Generation kam 1998 (Markenname NSG Pilkington Spacia®) in Japan auf den Markt. Dabei wurde bei einer Gesamtstärke von 6,2mm ein  $U_g$ -Wert von  $1,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  erreicht. Das erscheint für den Austausch von Einfachscheiben interessant; Aus thermischer Perspektive stellt es aber keine interessante Alternative zum vom U-Wert besseren und preiswerteren Zwei-Scheiben-Wärmeschutzglas dar.

Das Bild 28 zeigt eine Spacia-Scheibe mit den typischen Komponenten. Die Randversiegelung und das Evakuierungsventil sind gut zusehen, markiert ist zusätzlich einer der Abstandhalter.



Abbildung 28: Vakuumglasscheibe von NSG, Pilkington Spacia™ (Abbildung: NSG).

### 1.2.5.1.3 Erste Anwendungen des Vakuumglases Pilkington Spacia

Das Produkt Pilkington Spacia verfolgte als Ziel eine gut dämmende Alternative zu Einfachverglasungen anzubieten. Dabei war der Austausch im gleichen Rahmen gut möglich. Abbildungen 29 und 30 zeigen Werbesujets des Glases, welches eindrucksvoll die thermische Performance des Glases im Vergleich zu einer Einscheibenverglasung darstellt (kein Oberflächenkondensat, höhere Oberflächentemperaturen).



Abbildung 29: Werbesujet für Pilkington Spacia™ (Einfachscheibe mit Oberflächenkondensat, Vakuumglasscheibe ohne Kondensat. (Abbildung: <http://www.sun-wind.jp/dannetsu-ketsuro>).



Abbildung 30: VG ohne Kondensat / Einfachscheibe mit Kondensat [<http://lixil-reformchain.jp/shop/SC00183004/case/016478.html>].

**Einbau in Bestandsfenster in Holland (Museum Hermitage, Amsterdam):** Dieses Gebäude hat Holz-Schiebefenster mit Einfachglas. Die sehr kleinformigen VG-Scheiben wurden in die Vertikalschiebefenster eingebaut. Damit reduzierten sich die Oberflächenkondensat-Probleme im Gebäude. Visuell können die Scheiben kaum wahrgenommen werden. Ein Nachteil wurde auch festgehalten: Die erhabenen Ventilkappen des Evakuierungsventils erschweren die Fensterreinigung (Abbildungen 31, 32, 33, 34). Explizite Probleme mit Wärmebrücken im Rahmenbereich sind nicht bekannt, könnten aber durch entsprechende Anströmung der Fenster nicht wirklich wahrnehmbar sein.



Glaszetter Kees van Leek mest stoppasta af in de werkplaats van het schildersbedrijf

Abbildung 32 (links): Museum Hermitage Amsterdam (entnommen aus [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/Hermitage\\_Amsterdam\\_-\\_Ingang.JPG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/Hermitage_Amsterdam_-_Ingang.JPG)).

Abbildung 31 (rechts): Einglasen der VG-Scheiben mit Kittfasse in die Bestandsrahmen (entnommen aus [www.schildersvak.nl/download/i/09svk001z022.pdf](http://www.schildersvak.nl/download/i/09svk001z022.pdf)).



Abbildung 33 und 34: Eingebaute VG-Scheiben in Bestandsrahmen (Abbildung: NSG Pilkington Spacia).

**Einbau in Bestandsfenstern des MIT, Boston, Massachusetts.** Hier wurden Metall-Schiebefenster mit Fixteilen mit Vakuumgläsern ausgestattet (in Bestandsrahmen) (Abbildungen 35, 36, 37)

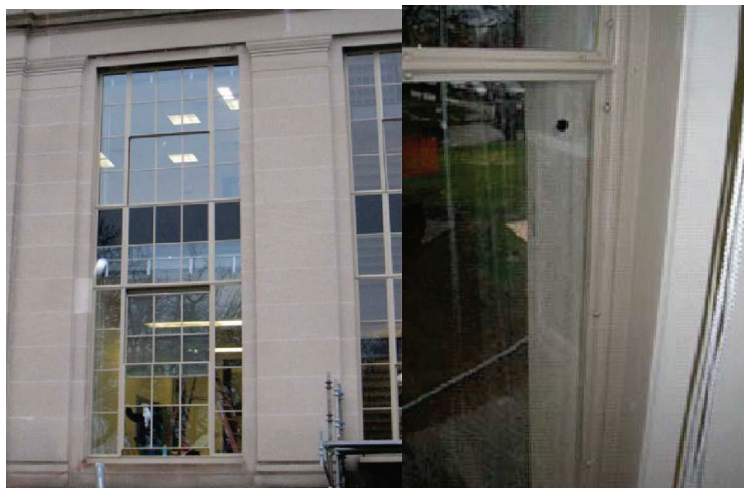


Abbildung 35, 36 und 37: Eingebaute VG-Scheiben in Bestandsrahmen (mit Ventil) (Abbildungen: [www.brikbase.org/sites/default/files/best3\\_barry.pdf](http://www.brikbase.org/sites/default/files/best3_barry.pdf) ).

## 1.2.5.2 Die technischen Grundlagen und Charakteristika von Vakuumglas

### 1.2.5.2.1 Die Komponenten und der Produktionsprozess von VG

Die spezifischen Komponenten von Vakuumgläsern sind die folgenden:

- Randverbund (bei asiatischen Produkten Glaslot; bei europäischen Projekten wird versucht mit Metallloten zu arbeiten, hier liegen bis dato keine Erfolgsmeldungen vor).
- Stützkörper als Abstandhalter (Pillars): In der Regel aus Edelstahl, Glas (oftmals nicht gleichmäßig formbar), oder Keramik.
- Vakuumpalt mit Hochvakuum ( $10^{-1}$  bis  $10^{-6}$  mbar): In der Regel 0,15 bis 0,20 mm stark und mit einem  $10^{-3}$  mbar Vakuum (entspricht einer Belastung von 10.000 kg pro  $m^2$ ).

Abbildung 38 zeigt die prinzipiellen Komponenten.

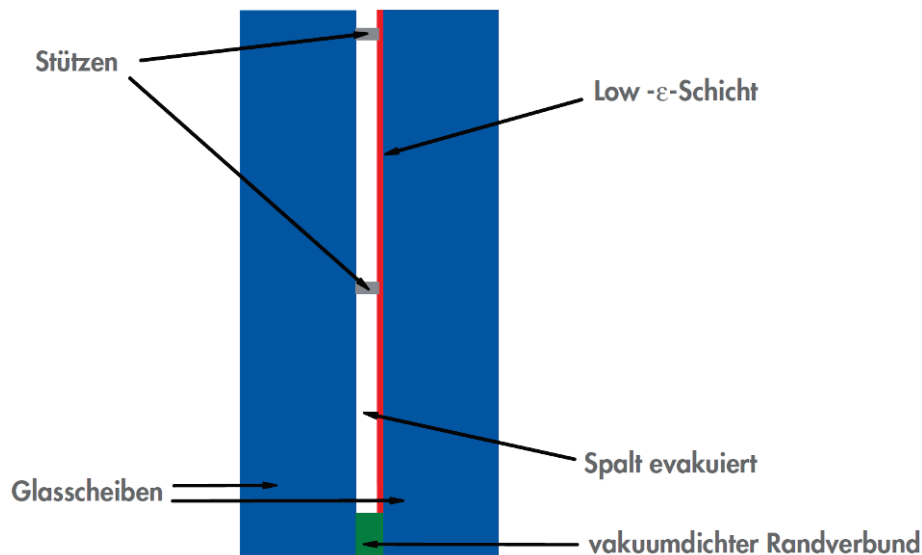


Abbildung 38: Prinzip und Komponenten von Vakuumglas (© ZAE Bayern, Würzburg).

Hinsichtlich der Randversiegelung sind bei den bekannten asiatischen Produkten Glaslote in Verwendung (4 Firmen), bei europäischen Forschungsprojekten gibt es mit der Metall-Lot Ausführung nur einzelne Prototypen, deren Funktionalität nicht zweifelsfrei belegt ist (Abbildung 39).

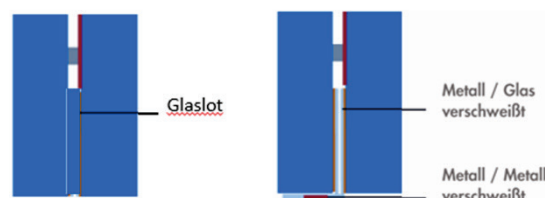


Abbildung 39: Glaslot und Metalllot – Randversiegelungen (© ZAE Bayern, Würzburg)

Bei der Herstellung von Vakuumgläsern mit Glaslot-Randverbund wird zumeist folgender prinzipieller Herstellungsprozess angewandt. Dieser ist in Abbildung 40 prinzipiell dargestellt.

#### 1. Auftragen Glaslot, Sinterprozess

2. Aufbringen Abstandhalter
3. Auflegen der oberen Scheibe
4. Erhitzen und Schmelzen des Glaslots
5. Evakuieren des Scheibenzwischenraums durch das Evakuierungsventil und Ausgasungsprozess
6. Einbringen des Getters
7. Aufsetzen und Versiegeln der Ventilschutzkappe
8. Abkühlprozess

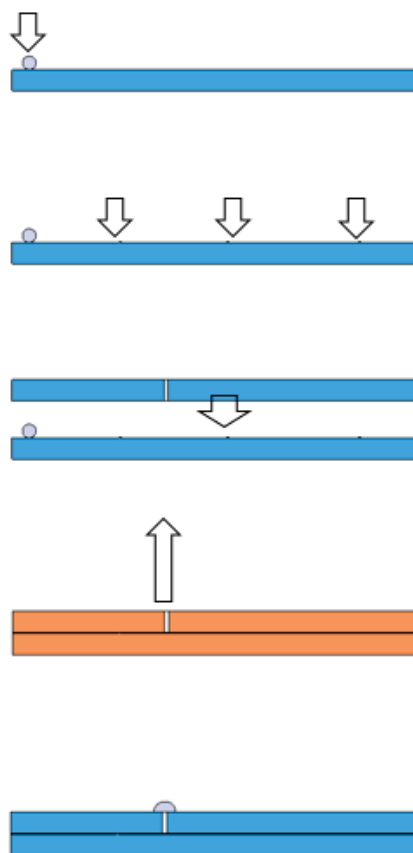


Abbildung 40: Produktionsschritte bei Vakuumglas mit Glaslot-Randversiegelung (eigene Abbildung, E. Heiduk / H. Hohenstein).

Bei der Herstellung von Vakuumgläsern mit Metall-Randversiegelung wird zumeist folgender prinzipieller Herstellungsprozess angewandt.

1. Auflöten der Metallstreifen
2. Auflegen Abstandhalter
3. Auflegen der oberen Scheibe
4. Einbringen in Vakuumkammer
5. Evakuieren der Vakuumkammer und damit des Scheibenzwischenraums



## 6. Zusammenlöten der Metallstreifen

### 1.2.5.2.2 Die Wärmetransportvorgänge im VG und der Einfluss der Komponenten

Für die thermische Qualität einer VG-Scheibe ist das Vakuum und seine Dauerhaftigkeit, die Form und der Achsabstand der Pillars und die Form und Dauerhaftigkeit der Randversiegelung sowie eine etwaige Low-E-Beschichtung wichtig. Die Wärmetransportvorgänge die dabei auftreten sind in der nachfolgenden Skizze (Abbildung 41) dargestellt.

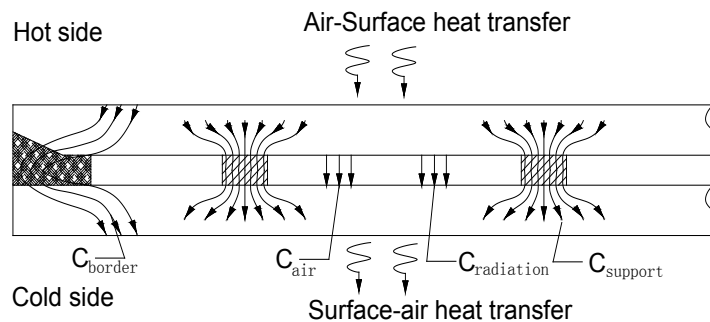


Abbildung 41: Wärmetransportvorgänge in VG (Abbildung: E. Heiduk / H. Hohenstein).

Die wesentliche Hauptkomponente des Wärmetransports findet im Vakuumpalt zwischen den beiden Glasscheiben statt. Das für Reduktion von Konvektion und Konduktion notwendige Hochvakuum von  $10^{-3}$  Pa zu erreichen, ist dabei der wichtigste Produktionsschritt. Das Evakuieren (Auspumpen) der Luft aus dem dünnen Scheibenzwischenraum über das Evakuierungsventil erfolgt in einem mehrstündigen Prozess mit bei möglichst hohen Temperaturen durch (Turbo)Molekularpumpen. Hohe Prozesstemperaturen brechen die Bindungskräfte (Adhäsion) der Luft- und Wasserdampfmoleküle an die Oberflächen und ermöglichen erst ein Hochvakuum. Dies steht allerdings im Widerspruch zur mangelnden Temperaturbeständigkeit vieler Low-E-Beschichtungen. Die Prozesstemperatur hat daher einen starken Einfluss auf die spätere Gesamtperformance des Glases.

Alle Materialoberflächen „gasen“ im Vakuum permanent aus. Dieser Vorgang muss daher bestmöglich und dauerhaft kompensiert werden; *„Ein Getter ist ein chemisch reaktives Material, das dazu dient, ein Vakuum möglichst lange zu erhalten. An der Oberfläche eines Getters gehen Gasmoleküle mit den Atomen des Gettermaterials eine direkte chemische Verbindung ein, oder die Gasmoleküle werden durch Sorption festgehalten“* (<http://de.wikipedia.org/wiki/Getter>). Auf diese Weise werden Gasmoleküle „eingefangen“. Meist ist das Material des Getters Titan oder Platin. Solch ein Getter ist Voraussetzung für die gleichbleibende Qualität des Vakuums (für die erwartete Lebensdauer von +/- 50 Jahren). Trotz des Evakuierungsprozesses verbleiben Moleküle durch Ausgasen im Hochvakuum, welches somit einen geringen Anteil von Restgas im Vakuumpalt aufweist, welches den Wärmetransport signifikant beeinflussen kann, falls kein passender Getter benutzt wird. Der Getter bestimmt somit die effektive Lebensdauer.

Zur Aufrechterhaltung des Vakuumpalts sind kleine Abstandhalter oder Stützkörper erforderlich (Pillars). Diese müssen den Druck übertragen können, stellen aber gleichzeitig kleine punktförmige Wärmebrücken dar. Neben dem Randverbund (Ein metallener

Randverbund wird generell als stärker wärmeleitend als das Glaslot angesehen) stellen die die Form, die Anzahl und der Abstand der Pillars eine Richtschnur für die thermische Qualität des Vakuumglases dar. Vorgespanntes Glas kann größere Achsabstände zwischen den Pillars erlauben. Die Pillars im Vakuumglas der Fa. SYNERGY (Abbildung 45) ist auch durch Form und Material auf geringe Wärmeübertragung und gute Kraftübertragung optimiert. Die Form und Ausgestaltung der Pillars wird auch als maßgeblich für die Schallschutz-Eigenschaften des Vakuumglases angesehen. Die Abbildungen 42 (Vakuumscheibe), 43 (Getter und Evakuierungsventil) und 44 (Pillar und Randversiegelung) zeigen verschiedene Details der Verglasung der Fa. SYNERGY

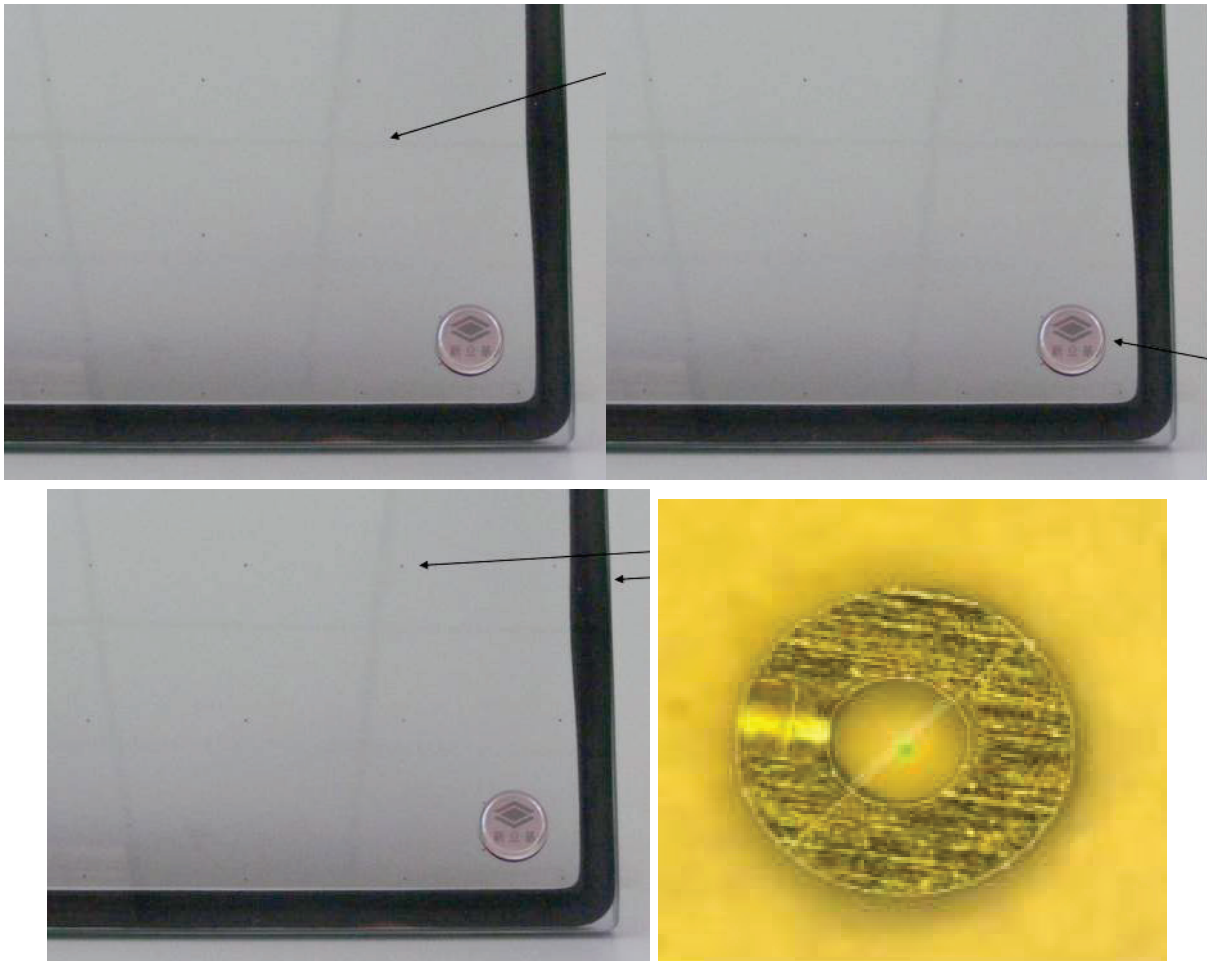


Abbildung 42, 43 und 44 (oben und unten links): Verschiedene Bestandteile einer SYNERGY Vakuumverglasung (Abbildungen: Fa. SYNERGY / E. Heiduk).

Abbildung 45(unten rechts): Der patentierte Pillar von SYNERGY-Vakuumgläsern in einer starken Vergrößerung (SYNERGY).

Die Berechnung des Wärmetransports durch Pillars kann anhand der nachstehenden Abbildungen 46 und 47 nachvollzogen werden.

An estimate of the magnitude of the heat flow through an individual spacer is obtained from the thermal resistance associated with a small circular contact between two otherwise isolated semi-infinite slabs of material

$$Q_{\text{single spacer}} = 2k_{\text{glass}} a (T_1 - T_2)$$

where  $k_{\text{glass}}$  thermal conductivity of the glass,  $a$  is the radius of contact, and  $T_1$  and  $T_2$  temperatures of the slabs at large distances from the contact.

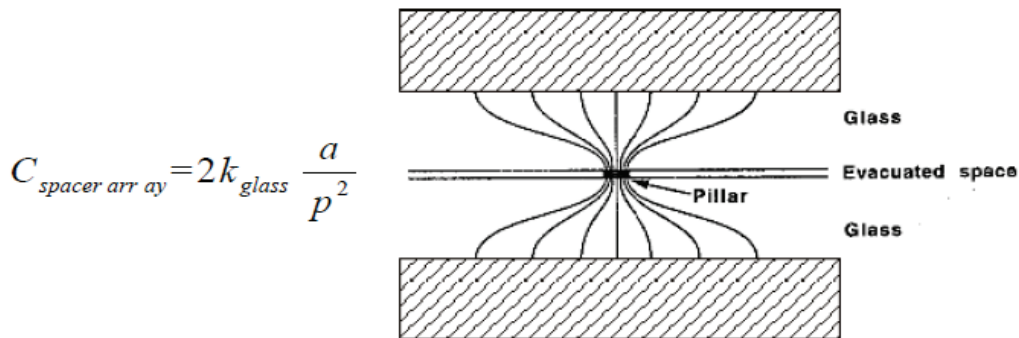


Abbildung 46: Wärmtransport durch Pillars (Abbildung: Fa. SYNERGY).

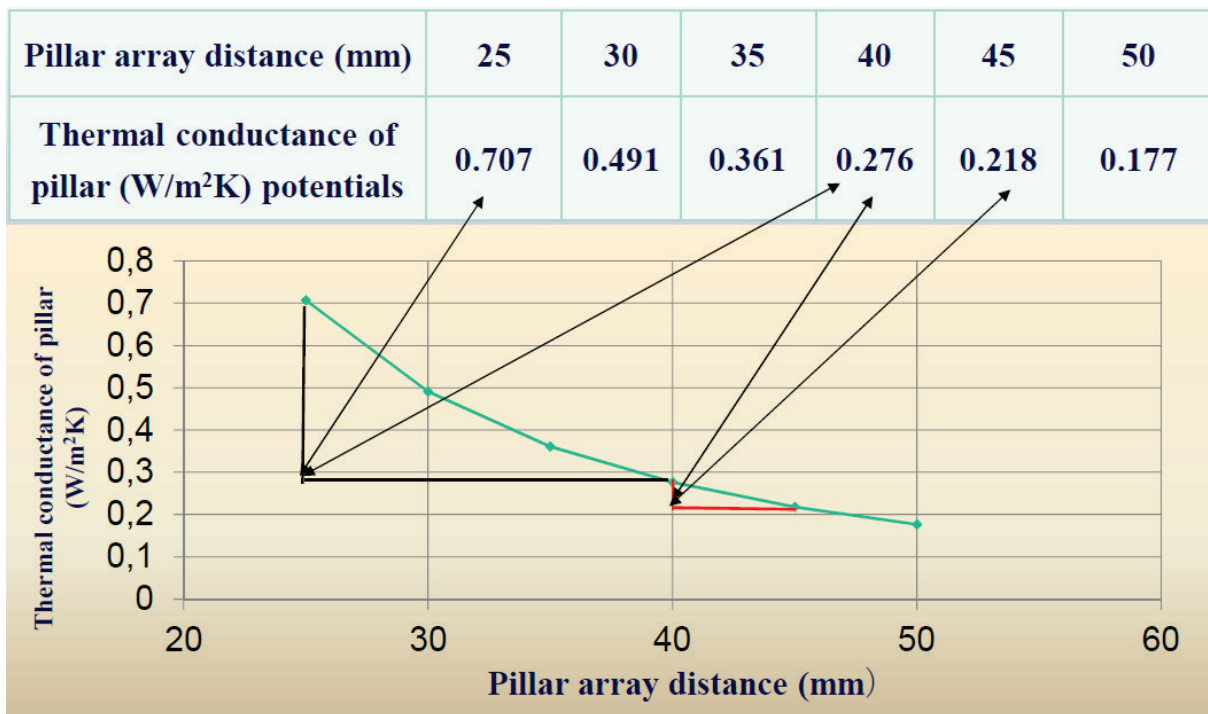


Abbildung 47: Zusammenhang zwischen Pillar-Achsabstand und Wärmtransport im SYNERGY-Vakuumglas.

Die Bestimmung des Wärmtransport im Hinblick auf die Emissivität von Low-E-Beschichtungen bei Vakuumgläsern wird wie bei herkömmlichen Isoliergläsern durchgeführt. Abbildungen 48 und 49 zeigen den Zusammenhang zwischen Low-E-Beschichtungen und der Wärmeleitfähigkeit des Vakuumglases, sowie den Zusammenhang zwischen Wärmtransport via Strahlung, die Wärmeleitung via Pillar und den U-Wert der jeweiligen, mit Low-E-Beschichtungen versehenen Vakuumverglasung.

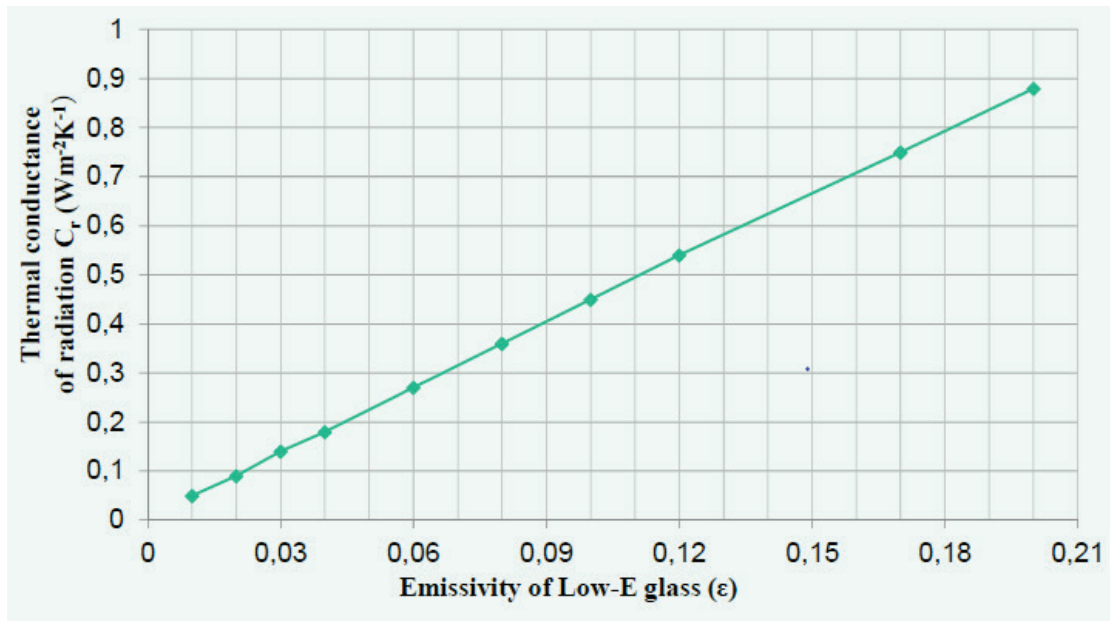


Abbildung 48: Der Zusammenhang zwischen LowE-Beschichtung und Wärmeleitfähigkeit von VG (Fa. SYNERGY).

Items	$C_{pillar}$ $W/m^2K$	$C_{radiation}$ $W/m^2K$						
		$\epsilon=0.01,$ $C_r=0.05$	$\epsilon=0.02,$ $C_r=0.09$	$\epsilon=0.03,$ $C_r=0.14$	$\epsilon=0.07,$ $C_r=0.32$	$\epsilon=0.08,$ $C_r=0.36$	$\epsilon=0.11,$ $C_r=0.49$	$\epsilon=0.17,$ $C_r=0.75$
U value $W/m^2K$	Pillar array distance=30 mm, $C_{pillar}=0.491$	0.50	0.54	0.57	0.71	0.74	0.84	1.02
	Pillar array distance=40 mm, $C_{pillar}=0.276$	0.31	0.36	0.39	0.54	0.57	0.68	0.87
	Pillar array distance=45 mm, $C_{pillar}=0.218$	0.26	0.30	0.34	0.49	0.53	0.63	0.83

Note: 1. The data are calculated by Window 7 software. Use boundary conditions according to JGJ151-2008 Standard.  
2. The pillar in vacuum glazing is ring-shaped from Synergy. The pillar array distance is 40 mm.

Abbildung 49: Der Zusammenhang der Wärmeleitung von Strahlung, Wärmeleitung von Pillar und U-Wert der jeweiligen Low-E-Vakuumverglasung (Fa. SYNERGY).

Konstruktionsbedingt ergeben sich sehr typische thermische Charakteristika von Vakuum-Glas. Die Randversiegelung stellt für Vakuumgläser in jeder Bauform eine starke Wärmebrücke dar, während im Feld die gute Wärmeisolation nur von den einzelnen Pillars unterbrochen wird. Abbildung 50 und 51 zeigen diese prinzipiellen Charakteristika anhand von schematischen Darstellungen, während Abbildung 52 eine typische Thermographie einer Vakuumglasscheibe darstellt. Gut zu sehen ist der verstärkte Wärmetransport durch die Pillars und den Randverbund.

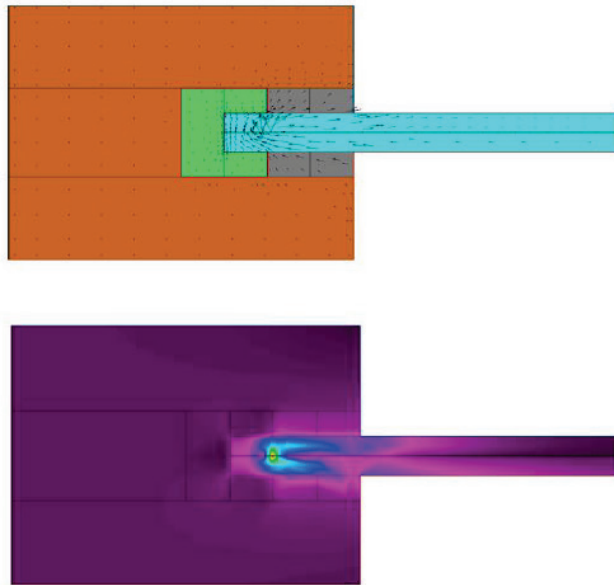


Abbildung 50: Wärmestrom in der Glaslot Randversiegelung (Eigene Abbildung E. Heiduk).

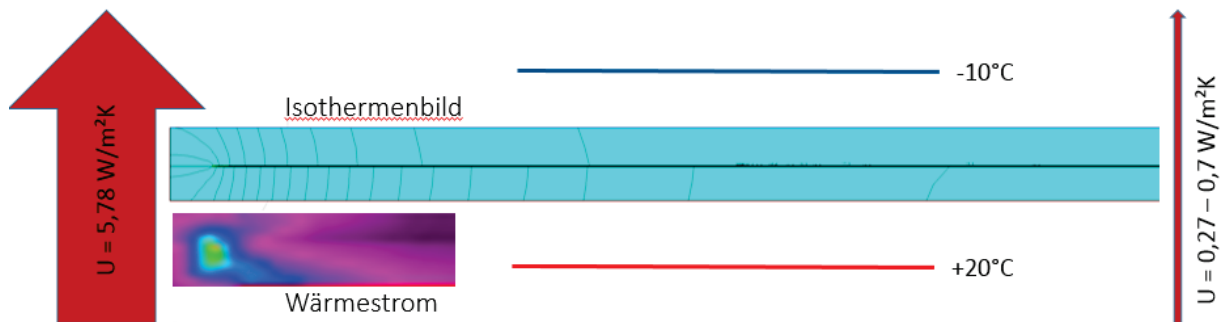


Abbildung 51: U-Werte, Isothermenbild und Wärmestrom in der Glaslot-Randversiegelung (Eigene Abbildung E. Heiduk).

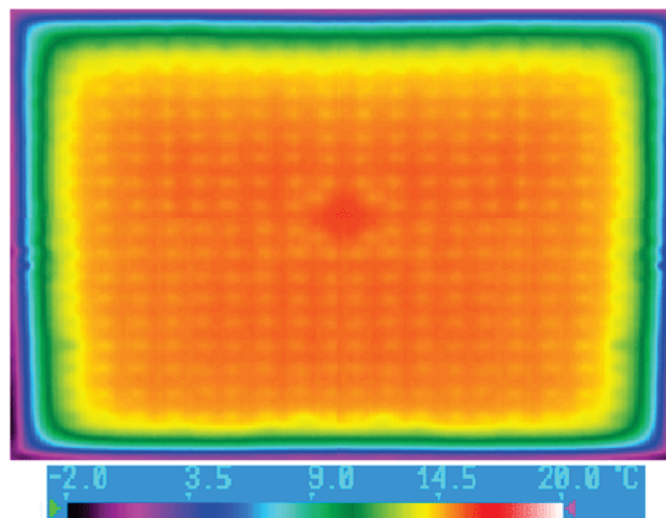


Abbildung 52: Thermografiebild einer Vakuumglas-Scheibe [Fa. Synergy].

Die Berechnung des Wärmetransports durch den Randverbund ist in nachstehender Abbildung 53 dargestellt.

$$Q_{edge} = \frac{(T_1 - T_2) k_{glass} t}{\sqrt{\frac{k_{glass} t}{h_1} + w_1 + w_2} + \sqrt{\frac{k_{glass} t}{h_2}}}$$

$$C_{air-to-air,edge} = \frac{2 \frac{(length + width)}{length \times width} k_{glass} t}{\sqrt{\frac{k_{glass} t}{h_1} + w_1 + w_2} + \sqrt{\frac{k_{glass} t}{h_2}}}$$

The conductance is valid for negligible heat transfer through the glazing. That is, the conductance of the glazing should be small compared to the external heat transfer coefficients; 8.3 and 30 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>.

Abbildung 53: Berechnungsformeln zur Berechnung des Wärmetransports durch den Glasrandverbund (Fa. Synergy).

Für den Wärmetransport durch den 0,2 mm starken Randverbund ist bestimmend wie breit der Randverbund / die sogenannte Glasfritte ist und wie tief der Glaseinstand im Fensterrahmen ist. Die Breite des Randverbunds schwankt je nach Hersteller und Ausführungsqualität. Bei den Testgläsern für dieses Sondierungsprojekt waren sie ca. 10 mm breit. Das wird als relativ schmal angesehen. Bei anderen Herstellern sind die Breitenverhältnisse oftmals zwischen 12 - 15 mm. Für die Dichtheit und die Festigkeit der Vakuumglasscheibe kann eine Breite von 5 mm wohl als ausreichend betrachtet werden, aber offenbar ist dies herstellungstechnisch problematisch. Eine solch schmale Glasfritte wäre aus thermischer Sicht optimal. Abbildung 54 zeigt den Zusammenhang zwischen Randverbundsbreite, Einstandstiefe und U-Wert, wobei der Einstand hierbei von der Oberkante des Fensterrahmens bis zur Unterkante des Vakuumglases gemessen wird.

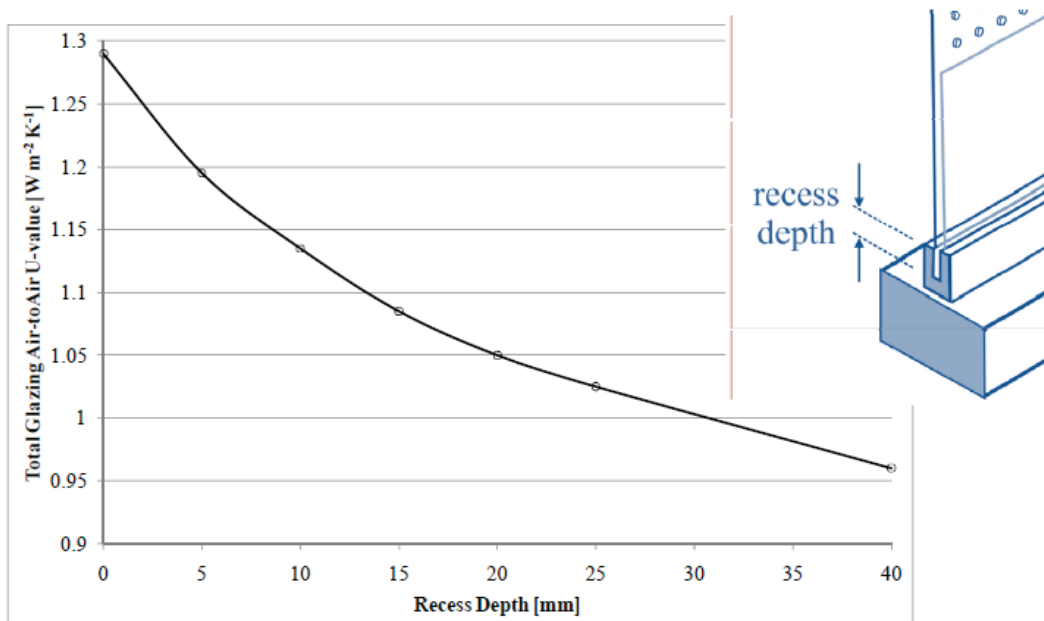


Abbildung 54: Zusammenhang zwischen Breite Randverbund, Einstandstiefe und U-Wert (Fa. Synergy).

Ein tieferer Glaseinstand resultiert in einer verbesserten Performance des Gesamtsystems. Das heißt je tiefer der transparente Teil der Verglasung in den Rahmen hineinragt um so besser ist es für die Reduktion dieser Wärmebrücke. Es gilt in Zukunft geeignete Verglasungstechniken und Rahmensysteme zu entwickeln. Erste Projekte in Deutschland wurden dazu eben gestartet. Abbildung 55 stellt diesen Zusammenhang dar. Im Zuge der Bemühungen des Forschungsprojektes VIG-SYS-reno wurde dieser Zusammenhang näher angesehen.

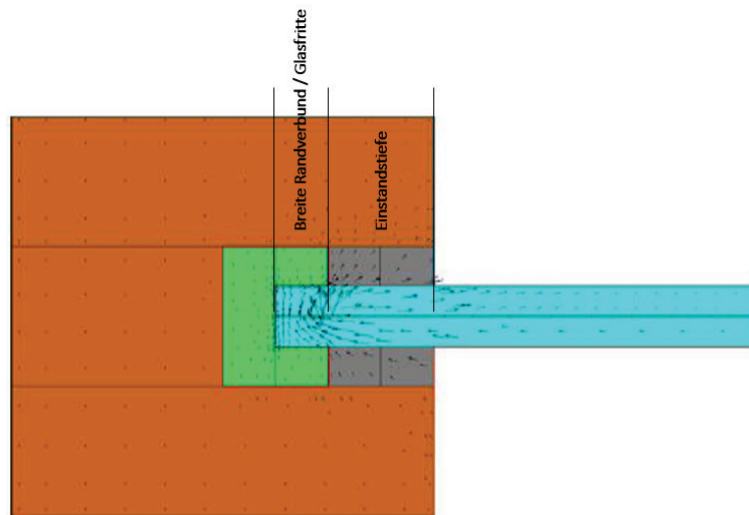


Abbildung 55: Darstellung der relevanten Einstandstiefe VG im Fensterrahmen (Eigene Abbildung E. Heiduk).

### 1.2.5.2.3 Ergebnisse thermischer Stresstests von VG

Bauteile zwischen dem konditionierten Innenraum und dem nicht konditionierten Außenraum sind unterschiedlichen Grenz-Temperaturen ausgesetzt, so auch Glasscheiben-Konstruktionen. Die unterschiedlichen Temperaturen verursachen Materialspannungen in den Scheiben und im Randverbund. Das ist besonders bei Vakuumglas ein wichtiges Thema da hier Scheiben dicht miteinander verbunden sein müssen und der Randverbund demzufolge nicht elastisch ist. Die Beständigkeit gegen diese Spannungen hat unmittelbaren Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und damit auf die Lebensdauer des Produkts. Unabhängig von den verschiedenen asiatischen Herstellern und Ihren eigenen Tests wurden im Frühjahr 2015 im Zentrum für angewandte Energietechnik an der Universität Würzburg (ZAE) entsprechende Tests durchgeführt (siehe Abbildung 56).

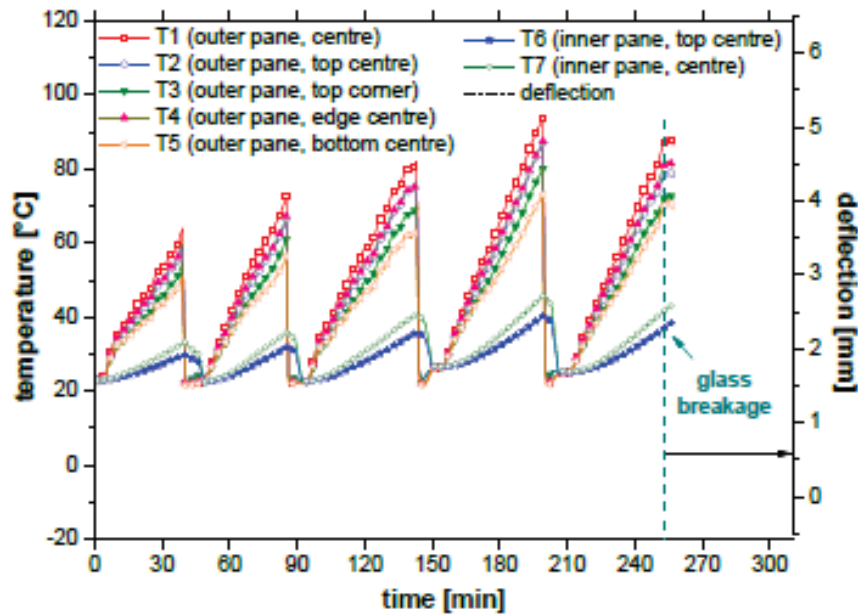


Abbildung 56: Ergebnis thermischer Stresstests für VG im Prüflabor des ZAE Würzburg (Darstellung ZAE Würzburg).

Das Ergebnis dieser thermischen Stresstests im Prüflabor des ZAE Würzburg ergab für Vakuumglas eine bessere Beständigkeit als für vergleichbare Isolierglasprodukte. Die Vakuumgläser hielten größeren Temperaturdifferenzen länger (über mehr Prüfzyklen) Stand.

### Beschreibung des ZAE – Prüfvorgangs:

"Infrarot-Lampen mit einer definierten Aufheizgeschwindigkeit im langwelligen Infrarotbereich heizen eine Glasprobe auf eine vorgegebene Temperatur auf. Die Probe wird anschließend mit kaltem Wasser (temperaturgesteuerter "treibender Regen") besprüht und abgeschreckt. Die Glasverformung und lokale Temperaturen oder Temperaturdifferenzen werden kontinuierlich in den einzelnen Heiz- und Kühlzyklen aufgezeichnet. Durch zyklisches Wiederholen der Erwärmungs- und Abschreckungsverfahren und gleichzeitig eine Erhöhung der Temperatur im gleichen Abstand auf ein Maximum kann die Probe über die Grenzen ihrer maximalen Belastungsfähigkeit gebracht werden. Der Wärmedurchlasswiderstand der Probe kann mit Hilfe von gemessenen Parametern für den Punkt an dem das Glas bricht festgelegt werden. Neben der thermischen Charakterisierung von Glas und Glassystemen kann der Prüfstand bei ZAE Bayern auch für zyklische Lebensdauer-Tests verwendet werden, um die langfristige Stabilität der Systeme zu bewerten."

Diese Tests lassen die von den Herstellern der Vakuumgläsern oftmals genannte Dauerhaftigkeit und Lebensdauer (+/- 50 Jahre) aus der Perspektive der thermischen Spannungen realistisch erscheinen.



### 1.2.5.2.4 Die Vor- und Nachteile von VG

Nachstehend (Tabelle 4) sollen die Vor- und Nachteile von Vakuumgläsern zusammengefasst werden:

Tabelle 4: Vor- und Nachteile von Vakuumgläsern

Vorteile	Nachteile
Vakuumglas ist deutlich dünner als vergleichbares Isolierglas (ab 2x3 mm + 0,20 mm Vakuumpalt = 6,2 mm Gesamtstärke)	Fehlende Akzeptanz / Skeptizismus gegenüber der Dauerhaftigkeit
Vakuumglas kann verwendet werden um Einfachgläser zu ersetzen	Fehlende Zertifikate in Mitteleuropa
Vakuumgläser sind leichter als Dreischeiben-Isoliergläser	Produzenten schweigen über die Wärmebrücke im Glasrandverbund
Der $U_g$ -Wert von Vakuumglas ist neigungsunabhängig.	Die Durchschlagfähigkeit dürfte aufgrund der Pillar gering sein.
Vakuumglas kann sich bei Wärmeeinstrahlung nicht „aufpumpen“ (Vgl. Abbildung 57)	Vakuumglas ist teuer
Der Glasrandverbund aus Glaslot ist sehr robust gegen einseitige Erwärmung	Keine Produktionsstätte in Zentraleuropa, daher lange Lieferwege und –zeiten.
Vakuumglas hat durch das eingeschlossene Vakuum per se einen sehr guten Schallschutz	
Vakuumglas ist unabhängig von Höhenlagen	
Durch das geringe Gewicht ist sogar ein Transport via Luftfracht denkbar.	
Der Randverbund aus Glaslot besitzt die gleiche Robustheit wie das Glas gegen Witterung und UV-Einfluss.	
Hohe Lebensdauern werden erwartet (+/- 50 Jahre)	
Das geringere Gewicht kann sich in der LCA gut auswirken	
Vakuumglas kann in Isolierglaskonstruktionen eingesetzt werden	
$U_g$ -Werte bis zu $0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ erreichbar	
Bei Rekombination von Vakuumgläsern sind sogar noch geringere $U_g$ -Werte denkbar.	

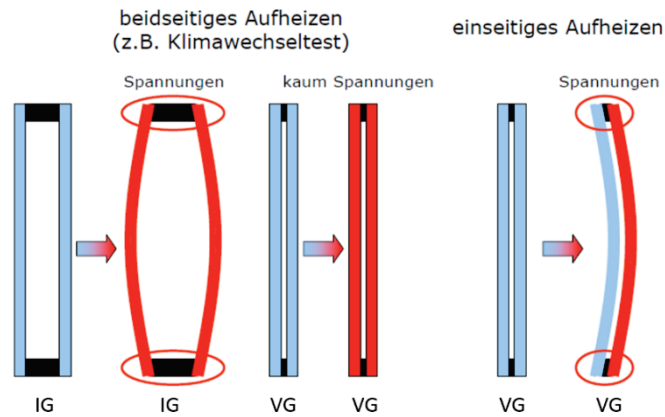


Abbildung 57: Glasbewegungen bei Isoliergläsern und Vakuümgläsern (Abbildung H. Hohenstein).

### 1.2.5.3 Die aktuellen Anbieter für Vakuümglas

#### 1.2.5.3.1 Vakuümglas der Fa. NIPPON SHEET GLASS (NSG) – Pilkington Spacia / Japan

Dieses Vakuümglas wurde ab 1996 in Zusammenarbeit mit Prof. Collins entwickelt. Die Gläser können in den Dicken 6,2 mm, 8,2 mm und 10,2 (2x 3|4|5 mm plus 0,2 mm Vakuümspalt) hergestellt werden. Ursprünglich war nur ein Vakuüm von 10<sup>-1</sup> mbar realisierbar. Pillars wurden in einem 20 mm Raster gesetzt (0,5 mm Durchmesser). Der Evakuierungsventildurchmesser beträgt 12 mm und ist 12 mm abgedeckt. Minimalgrößen von 120 auf 335 mm und Maximalgrößen von 1500 x 2400 mm sind herstellbar. Das Produkt adressierte den Ersatz von Einscheibenverglasung und wurde – zumindest nach Produkteinführung - nicht besonders gut nachgefragt. Der Preis beträgt mehr als 200 € per m<sup>2</sup> Glasfläche. Die nachstehende Tabelle 5 zeigt die Kennwerte der Gläser. Abbildungen 58 und 59 zeigen Abbildungen des Glases.

Tabelle 5: Eigenschaften der unterschiedlichen NSG Produkte

Produkt	U <sub>g</sub> -Wert [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	T <sub>i</sub> [%]	g-Wert [%]
Pilkington Spacia™	1,2	75	67
Pilkington Spacia™ ST II	1,1	78	66
Pilkington Spacia™ Cool	0,9	68	52



Abbildung 58 (links) und 59 (rechts): Vakuumglasscheibe Pilkington Spacia™ sowie Aufnahme mit Evakuierungsventil (Abbildungen: NSG).

**Kontaktinformationen der Firma NSG:**

NSG Group - Pilkington United Kingdom Limited, European Technical Centre, Hall Lane, Lathom, Nr Ormskirk, Lancashire L40 5UF, Phone 01744 692000, pilkington@respond.uk.com  
<http://www.pilkington.com/products/bp/bybenefit/thermalinsulation/spacia/default.htm>

**1.2.5.3.2 Vakuumglas der Fa. GLASS EAGON INDUSTRIAL Co. Seoul / Südkorea**

Dieses Vakuumglas besteht aus 2 x 5 mm Floatglas mit einer 0,25 mm starken Vakuumschicht. Der Achsabstand der Pillars (aus Edelstahl oder Ferro-Glas, Durchmesser 0,5 mm) beträgt 30 oder 40 mm. Das Vakuum besitzt eine hohe Qualität (Druckunterschied 10-6 mbar). Das Glas ist mit einer Low-E-Schicht (Emissivität von 0,042) ausgestattet. Der Randverbund wurde mit Blei-Glaslot in einer Breite von 8 mm konstruiert. Die Evakuierungsöffnung mit Getter besitzt einen planen Aufbau (keine Erhebung auf der Außenseite). Das Glas widersteht Winddruck von 3400 Pascal und hat einen  $U_g$ -Wert von  $0,48 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Der Verkaufspreis des Glases beträgt etwa 180 € pro  $\text{m}^2$  Glasfläche. Abbildung 60 zeigt das Prinzip des Glases und Tabelle 6 zeigt die Kennwerte des Produktes.

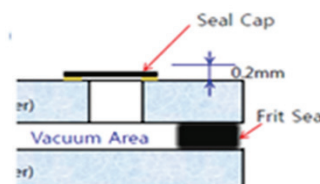


Abbildung 60: Vakuumscheibe der Fa. EAGON (EAGON).

Tabelle 6: Eigenschaften der EAGON Vakuumglasscheibe

Eigenschaft	Wert
$U_g$ -Wert	$0,48 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Vakuum-Level	10-6 torr
Maximalgröße	2400 x 2000 mm
Herstellungsprozess	In einer Vakuumkammer

Illustration



### Kontakt der Firma EAGON INDUSTRIAL:

EAGON Windows & Doors, EAGON Industrial 91, Yeomjeon-ro, Nam-gu, Incheon, Korea  
032-760-0001, [www.eagon.com/eng/index.asp](http://www.eagon.com/eng/index.asp), [www.eagon.com/eng/02/sub01\\_4.asp](http://www.eagon.com/eng/02/sub01_4.asp)

### 1.2.5.3.3 Vakuumglas der Fa. QINGDAO HENGDA GLASS TECHNOLOGY Co. Ltd. / China

Dieses Vakuumglas wurde in enger Zusammenarbeit mit Hr. Prof. Tang entwickelt. Als Gläser können 3 – 5 mm Floatgläser verwendet werden, die Vakuumschicht hat eine Stärke von 0,15 mm. Pillars bestehend aus Edelstahl oder Ferro-Glas, diese sind jedoch nicht regelmäßig angeordnet. Ursprünglich konnte nur eine geringe Vakuumqualität erreicht werden (10-1 mbar), inzwischen ist diese auf 10<sup>-4</sup> mbar angestiegen. Eine Low-E-Beschichtung ist möglich (doble silver offline Low-E glass, Produkt von Guardian). Die Randversiegelung ist mit Blei-Glaslot durchgeführt, jedoch wird aktuell nach alternativen Versiegelungsformen gesucht. Die Evakuierungsöffnung entspricht derjenigen von NSG, ist allerdings nicht immer mit Gettern ausgestattet. Das Glas widersteht einem Winddruck von bis zu 3400 Pascal. Der U<sub>g</sub>-Wert des Glases liegt bei 0,5 – 0,7 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>, bei der Variante „Doppel“ (siehe nachstehende Abbildung 61) sogar nur 0,3 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>. Etlliche Kombinationsvarianten mit Isolierglas sind möglich (Abbildung 61). Abbildung 62 zeigt ein Glasmuster dieses Herstellers.

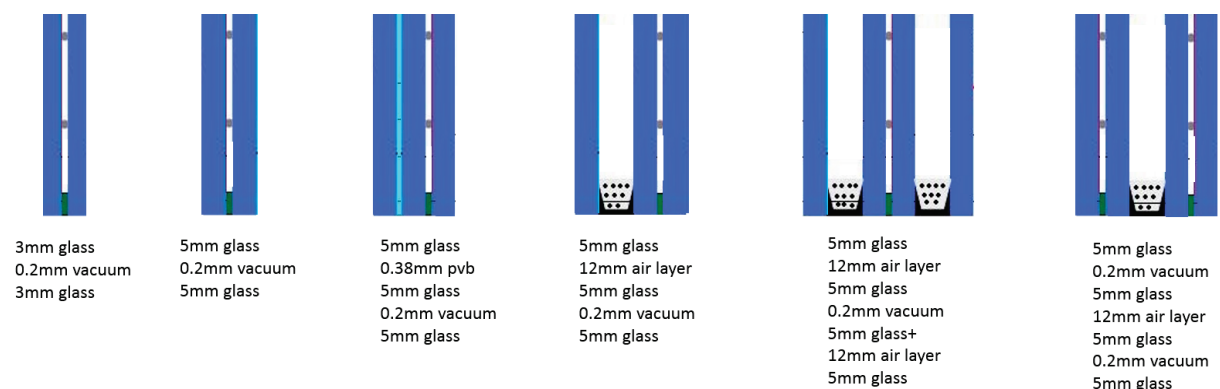


Abbildung 61: Vakuumglas (VG) in vielen Kombinationen mit Isolierglas (VIG) [[http://www.tjskl.org.cn/images/czae8e51-pz2702078-vacuum\\_insulating\\_glass.html](http://www.tjskl.org.cn/images/czae8e51-pz2702078-vacuum_insulating_glass.html)].



Abbildung 62: Ein Probestück Vakuumglas (VG) von Hengda [[http://www.tjskl.org.cn/images/czae8e51-pz2702078-vacuum\\_insulating\\_glass.html](http://www.tjskl.org.cn/images/czae8e51-pz2702078-vacuum_insulating_glass.html)].

**Kontakt Daten:** QINGDAO HENGDA GLASS TECHNOLOGY Co. Ltd, Shandong, P.R.C.  
 No.590 Hongliu River Road Economic & Technological Development Zone, Qingdao, 266426,  
 P.R.C. 0532-83160568/0333 hdglass@hd-glass.com, www.hd-glass.com/en/index.aspx

#### 1.2.5.3.4 Vakuumglas der Fa. NEIJING SYNERGY VACUUM GLAZING TECHNOLOGY Co. Ltd. Peking / China

SYNERGY wurde 2003 neu gegründet und steht unter der direkten wissenschaftlichen Leitung von Prof. Tang. 2011 – 2014 wurde eine 800 Meter lange vollautomatische Produktionsanlage errichtet (Abbildung 63). Das Herzstück hierbei ist der durchlaufende Evakuierungssofen (Abbildung 64). Tabelle 7 zeigt einen Überblick über die verfügbaren Vakuumgläser von SYNERGY. Der Verkaufspreis der Vakuumgläser beginnt bei etwa 140 € pro m<sup>2</sup> (abhängig von der Ausführung).



Abbildung 63: Impressionen der Produktionsanlage der Fa. SYNERGY (SYNERGY).



Abbildung 64: Evakuierungsöfen der Fa. Synergy (SYNERGY).

Tabelle 7: Verfügbare Vakuumgläser Fa. Synergy

Typ	Visible Light		Solar radiation		Shading coefficient SC	Total solar energy transmittance (g-Value)	Heat transfer coefficient ( $U_g$ -Value, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	Glazing selectivity coefficient S
	Transmittance $\tau_{vis}$	Reflectance $\rho_{vis}$	Transmittance $\tau_{sol}$	Reflectance $\rho_{sol}$				
T*L5(Single-Ag)+V+T*5	0,790	0,121	0,505	0,228	0,630	0,548	0,578	1,44
T*L5(tripe-Ag)+V+T*5	0,638	0,117	0,317	0,383	0,389	0,338	0,429	1,89
T*L5(tripe-Ag)+V+TL*5(tripe-Ag)	0,499	0,106	0,107	0,434	0,205	0,178	0,371	2,803

Kürzlich haben einige technische Weiterentwicklungen stattgefunden, die in der Abbildung 65 dargestellt sind.

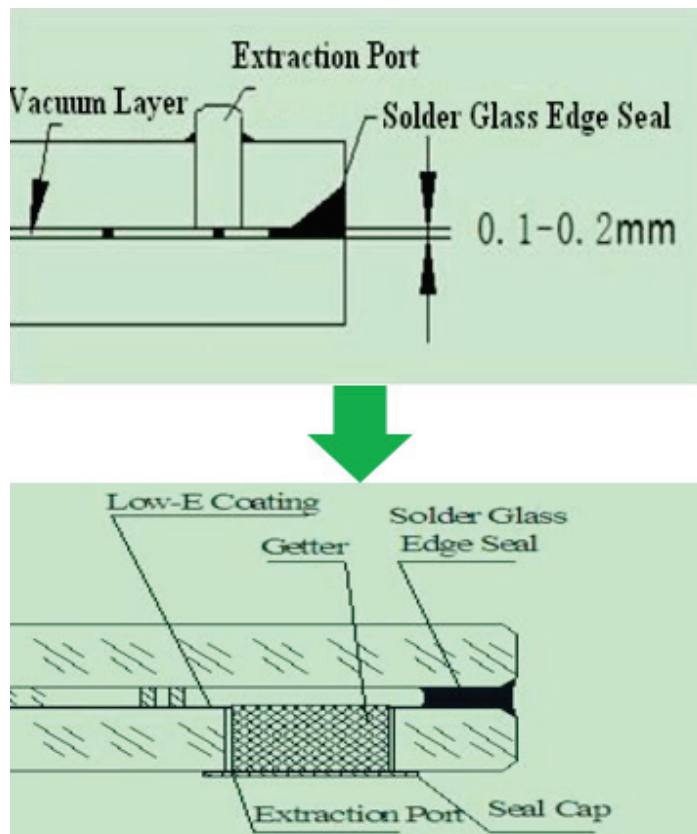


Abbildung 65: Technische Weiterentwicklungen bei der Fa. SYNERGY (SYNERGY).

Die Gläser der 1. Generation bestehen aus Floatglas, haben eine Evakuierungsöffnung mit (überstehender) Schutzkappe und haben massive Stützkörper. Der  $U_g$ -Wert dieser Gläser liegt zwischen  $0,6$  und  $0,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Die Gläser der 2. Generation bestehen aus thermisch vorgespannten Gläsern, haben nunmehr eine plane Evakuierungsöffnung, welche ebenflächig im Glas liegt, haben eine verbesserte Randversiegelung und die Stützkörper sind inzwischen ringförmig. Ihr  $U_g$ -Wert beträgt zwischen  $0,3$  und  $0,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Es muss zwischen halbautomatischer und (der neueren) vollautomatischen Ausführung unterschieden werden. Bei ersterer kann Floatglas und teilvorgespanntes Glas eingesetzt werden, der Achsabstand der Pillar liegt zwischen  $25-30$  (Floatglas) und  $40$  mm (teilvergespanntes Glas). Bei vollautomatischer Produktion können auch vollvorgespannte Gläser eingesetzt werden und es wurden experimentell bereits Gläser mit einem Achsabstand von  $45$  mm bei den Pillars erzeugt. Ein Unterschied ist die handaufgetragene Randversiegelung bzw. die automatisch aufgetragene Glasfritte. Unabhängig von der Ausführungsart beträgt der Vakuumlevel  $10^{-3}$  mbar und die Dicke der Vakuumschicht  $0,15$  mm.

**Kontakt Daten:** BEIJING SYNERGY VACUUM GLAZING TECHNOLOGY Co., Ltd2 Zhongguancun South Street, Haidian Enomic-technological Development Area, Beijing, P.R.C, 0086-52049257, market@bjsng.com, www.bjsng.com/ENIntro.aspx

#### 1.2.5.4 Das Anwendungspotential und der Markt für Vakuumglas

Das Anwendungspotenzial von Vakuumgläsern im Neubaubereich kann als groß bezeichnet werden, gesetzt den Fall, dass angepasste Fensterrahmen und Fassadenprofile dazu entwickelt werden, sowie eine Kombination mit zusätzlichen Funktionsschichten (Sonnenschutz, Lichtlenkung) implementiert wird. Hierzu sei auf das 2016/2017 laufende Forschungsprojekt MOTIVE (FFG-Projekt-Nummer 854690) hingewiesen.

Ein noch größeres Anwendungspotenzial gibt es im Gebäudebestand: Zum einen kann ein direkter Austausch von Einfachgläsern durch Vakuumglas angedacht werden. Da sowohl im Altbestand in Österreich und europaweit Einfachverglasungen, wie im Gesamtgebäudebestand weltweit vorherrschend sind, ergibt sich theoretisch ein sehr großes Marktpotential.

Nachstehend sind einige ausgeführte Objekte dargestellt (Abbildungen 66 - 73).



Abbildung 66: Ausgeführte Projekte mit Vakuumglas #1 (Abbildung: H. Hohenstein).





Abbildung 67: Ausgeführte Projekte mit Vakuumglas #2 (Abbildung: H. Hohenstein).



Abbildung 68: Ausgeführten Objekte mit Vakuumglas – Aktiv-Plus-Testhaus Stuttgart (Abbildung aus <http://derstandard.at/2000004153602/Ein-Haus-als-Gast-in-der-Siedlung>).

Die Universität Stuttgart (Prof. Werner Sobek) hat Testscheiben in der Variante VIG (T5 + 0,76P + TL5 + 9A + TL5 + V + T5,  $U_g=0,463 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) in das Aktiv-Plus Testhaus „B 10“ in Stuttgart eingebaut ([www.aktivhaus-b10.de/home/](http://www.aktivhaus-b10.de/home/)). Nachstehende Abbildung zeigt die Charakteristika dieses Vakuumglas (Abbildung 69).

Structure		Thickness (mm)	Visible light transmittance $\tau_{vis}$ (%)	Glazing selectivity coefficient $S$	Solar heat gain coefficient $g$	Emissivity of Low-E	Heat transfer coefficient $U$ ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )	Sound insulation (dB)
Outside	Inside							
Laminated+ IG+VG T5+0.76P+TL5+9A +TL5+V+T5		29	61.13	1.6	0.382	0.17 0.059	0.463	39

Abbildung 69: Kennzahlen des verwendeten Vakuumglases im Aktiv-Plus Testhaus B10 in Stuttgart (Abbildung [www.aktivhaus-b10.de/home/](http://www.aktivhaus-b10.de/home/)).

Die Hochschule Augsburg (Prof. G. Sahner) baut gerade (2015) 300 m<sup>2</sup> Testscheiben in ihr Versuchsgebäude „Vioneum Energie+“ ein (Abbildung 70). Bei der Internationalen Baumesse München im Jänner 2015 hat die Fassadenbaufirma RAICO eine Konzeptidee eines Fassadensystems mit Vakuumglas ausgestellt (Abbildungen 71 u. 72). Ein Versuch zur thermischen Modernisierung von Bestandsfenstern mit Vakuumglas wurde bei der Baumesse ebenfalls gezeigt. Dazu wurde als Modernisierungsbeispiel der Einbau von Vakuumglas in den Innenflügel eines Holz-Verbundfensters aus den Jahr 1955 demonstriert. Diese Maßnahme ist optisch kaum sichtbar, zusätzlich wurde eine neue umlaufende Selbstklebedichtung eingebaut. Diese Maßnahmen verbesserten den Wärmeschutz des Fensters von einem UW-Wert von 2,4  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  auf 1,4 (mit Vakuumglas). Durchgeführt wurde der Versuch von Prof. DI. Armin Rogall von der FH Dortmund (Abbildungen 73).



Abbildung 70: Geplante Objekte mit Vakuumglas – Testhaus VISIONEUM ENERGIE+ Königsbrunn bei Augsburg (Hochschule Augsburg).



Abbildung 71 und 72: Fassadensystem mit Vakuumglas – Fa. Raico (eigene Aufnahmen E. Heiduk).



Abbildung 73: Bau 2015 – Verbesserung eines alten Bestandsfensters mit Vakuumglas, Prof. A. Rogall / FH Dortmund (eigene Aufnahmen E. Heiduk).

### **1.2.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik**

Die Vakuumglastechnologie ist noch sehr jung, aber entwickelt sich speziell in Asien (Japan, China, Südkorea) sehr dynamisch. Wegen kontinuierlicher Verschärfungen der Gesetzeslage hinsichtlich thermischer Performance ist zuletzt eine prinzipiell hohe Nachfrage in Südkorea wie auch in China zu verzeichnen. Eine Reihe von interessanten Erprobungen und Tests in Europa zeigt das Potenzial und Anwendungsmöglichkeiten auf.

Die gezeigten Beispiele und auch die interessanten Ergebnisse dieses Projekts zeigen eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten für Vakuumglas im Neubaubereich und in der Modernisierung des Gebäudebestands.

Allerdings gilt es noch eine Reihe von technischen Fragen zu klären. In der Bestandsmodernisierung durch Einbau in Bestandsfenster sind optimierte / angepasste Einbaukonzepte zu entwickeln. Für die Nutzung im Neubaubereich sind die Rahmenkonstruktionen noch entsprechend den Spezifika von Vakuumglas anzupassen. Es könn(t)en nun dünnere und leichtere Gesamtfenster-Konstruktionen entwickelt werden.

Die Einschätzung der Wirtschaftlichkeit kann als komplex angesehen werden: Die derzeit große Preisdifferenz zum Mehrscheiben-Isolierglas zu Vakuumglas und Vakuum-Isolierglas (und auch zu Heat-Mirror-Verglasungen) scheint die Anwendung im Neubaubereich zu begrenzen. Die Bewertung, durch führende Opinion Leader in der Architektur & Baubranche, kann als positiv beschrieben werden, der Nutzen solcher Vakuumgläser wird bestätigt und deren Anwendung in der nahen Zukunft angenommen.

Reparatur- und Sanierungsmaßnahmen von bauhistorisch wertvollen Bestandsfenstern, die mit Vakuumgläsern durchgeführt werden, könnten eine bedeutsame Verbesserung der thermischen Performance dieser Fenster bedeuten. Der Austausch von Einfachglas gegen VG in wertvollen Bestandsfenstern würde sich im Innenraum-Nutzugscomfort niederschlagen. Eine etwaige Verbesserung der Energieeffizienz erscheint prinzipiell sinnvoll und könnte auch wirtschaftlich sinnvoll sein (ggf. ist eine solche Maßnahme auf Wirtschaftlichkeit zu prüfen).

Bevor allerdings eine Applikation in Zentraleuropa denkbar ist, sind die genannten technischen Fragen, wie auch baubehördliche/produktspezifische Bewilligungen, zu adressieren.

### 1.3 Verwendete Methoden

Nachstehend soll erläutert werden, mit welchen Methoden in den jeweiligen Arbeitspaketen des Sondierungsprojektes (laut Sektion 1.1. dieses Berichts gearbeitet) wurde:

In **Arbeitspaket 2** (*State of the Art Glas + Fenster/Fassade*) wurden Daten zum aktuellen Stand der Technik, des Wissens und der Industrie erhoben. Die Ergebnisse dieses Arbeitspaket, welche mittels wissenschaftlicher Recherche bei Herstellern und in Fachpublikationen, in Gesprächen mit Opinion Leadern und via Messebesuchen ergründet wurden, können in den Vorsektionen (Kapitel 1.2. Stand der Technik) eingesehen werden.

**Arbeitspaket 3** (*Untersuchung und Bearbeitung der hochbautechnisch-konstruktiven Einsatzmöglichkeiten von Vakuumgläsern in typischen (bestehenden) Fenster- und Fassadenkonstruktionen*) untersuchte mögliche Anwendungsszenarien in typischen historischen Fensterkonstruktionen. Die Arbeiten hier standen in enger Konjunktion zu **Arbeitspaket 4** (*bauphysikalischen Simulation/Bewertung und zur konstruktiven Bewertung (mittels Laborversuchen) von neuen potenziellen VG-Einbausituationen für Fenster / Fassadenkonstruktionen*) welche diese Anwendungsszenarien mitunter auch gleich untersuchten. Hierzu wurden sowohl Berechnungen (Energieausweise, Grobabschätzungen), wie auch detaillierte Simulationen (numerische Wärmebrückensimulation). Ein weiterer wesentlicher Punkt war das Werkstätten-basierte Errichten und laborbasierte Testen von einigen Untersuchungsmodellen, welche basierend auf Gläsern, die von der Fa. Synergy / China bezogen wurden, aufgebaut wurden. Mit Hilfe dieser Untersuchungs- und Anschauungsmodelle wurden, unter anderem, statische Versuche (Verwindung, Stoßbelastung, Aussteifung, Lastabtragung, alle nach einschlägigen Normen) durchgeführt, wie auch mit einem Anschauungsmodell Klimakammer-Tests gefahren. Dies ist insofern spannend, als dass Vergleiche mit den thermischen Simulationen angestellt werden konnten.

In **Arbeitspaket 5** (*Lebenszyklusanalyse (Ökologie und Kosten) von VG und Gesamtsystemen*) wurden gründliche Untersuchungen verschiedener Teilindikatoren der ökologischen Performance von Vakuumglas angesehen, soweit entsprechende Daten verfügbar waren. Hierbei wurden einschlägige Datenbanken (ecoinvent), sowie einschlägige Bewertungsmethoden angewandt und Vergleiche zu herkömmlichem Isolierglas gezogen.

**Arbeitspaket 6** (*Upscaling / Bewertung des energetischen und volkswirtschaftlichen Potenzials von VG im städtebaulichen Maßstab*), welches sich mit Upscaling / Bewertung des energetischen und Volkswirtschaftlichen Potentials befasste, wurde folgendermaßen bearbeitet:

- Heranziehen der Ergebnisse des TABULA-Projektes, mit deren Hilfe eine Reihe von Energieausweisen rudimentär auf die Einwirkung des Einsatzes von Vakuumglas untersucht wurde.
- Anwendung der Methdoik von R. Vallentin zur Skalierung der Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 2 – 5 (für Deutschland bzw. Adaptierung auf Österreich).

- Genaue Untersuchung von drei typischen Wiener Gründerzeithäusern auf deren Verglasungsflächen und die Anwendbarkeit von Vakuumglas in deren Kastenfenstern (in denen verschiedenen Szenarien der Anwendung zum Einsatz kamen).

Die Ergebnissection dieses Berichts wird einen Überblick über die relevantesten Ergebnisse dieses Projektes gemäß der obenstehenden Struktur liefern.

## **2 Ergebnisse**

### **2.1 Ergebnisse der hochbautechnischen, bauphysikalischen und auf Simulation und Modellversuchen basierenden Untersuchungen (Arbeitspakete 3 und 4)**

#### **2.1.1 Mechanische Versuche mit Vakuumglas in Kastenfenster-Rahmen**

Hier galt es zu untersuchen, ob auftretende mechanische Lasten, wie zum Beispiel das Abstützen einer Reinigungskraft am Fensterflügel oder eine Stoßbelastung gegen die Glasscheibe, schadensfrei vom Fensterflügel inklusive Glasscheibe aufgenommen und abgetragen werden können. Weiters galt es zu klären, welche Auswirkungen bzw. Einflüsse die Einbausituation, die Glasbefestigung und der Glasanschluss auf die Lastaufnahme und Lastabgabe bzw. auf die Glasscheibe und dessen Randverbund haben. Dazu wurden Untersuchungen zur Lasteinleitung, Lastabtragung und Aussteifung in Anlehnung an die ÖNORM EN 14608 (Racking), ÖNORM EN 14609 (statische Verwindung) und ÖNORM EN 13049 (Stoßbelastung) durchgeführt.

Die Versuchsaufbauten bzw. -varianten der mechanischen Untersuchungen sind in Abbildung 74 und 75 (Racking), Abbildung 76 und 77 (Statische Verwindung – Belastung jeweils nach links und rechts) und Abbildung 78 und 79 (Stoßbelastung – gegen Anschlag geprüft) ersichtlich.

Zusätzlich zur gezeigten stehenden Formatvariante (50 x 100 cm) der Kastenfensterflügel wurden die Flügel beim Untersuchungsaufbau Racking und Statische Verwindung auch in der liegenden Formatvariante (100 x 50 cm) untersucht.

Bei der Belastung mit einem weichen, schweren Stoßkörper (ÖNORM EN 13049) wurde aufgrund der geringen Probenanzahl nur die stehende Formatvariante geprüft. Außerdem wurde hier immer gegen den Glasfalzanschlag geprüft, da die Proben bereits durch Racking und statische Verwindung vorbelastet wurden. Somit konnte sichergestellt werden, dass die Belastung durch den Stoßkörper durch die Vakuumglasscheiben bzw. Floatglas-Scheiben aufgenommen wurde.

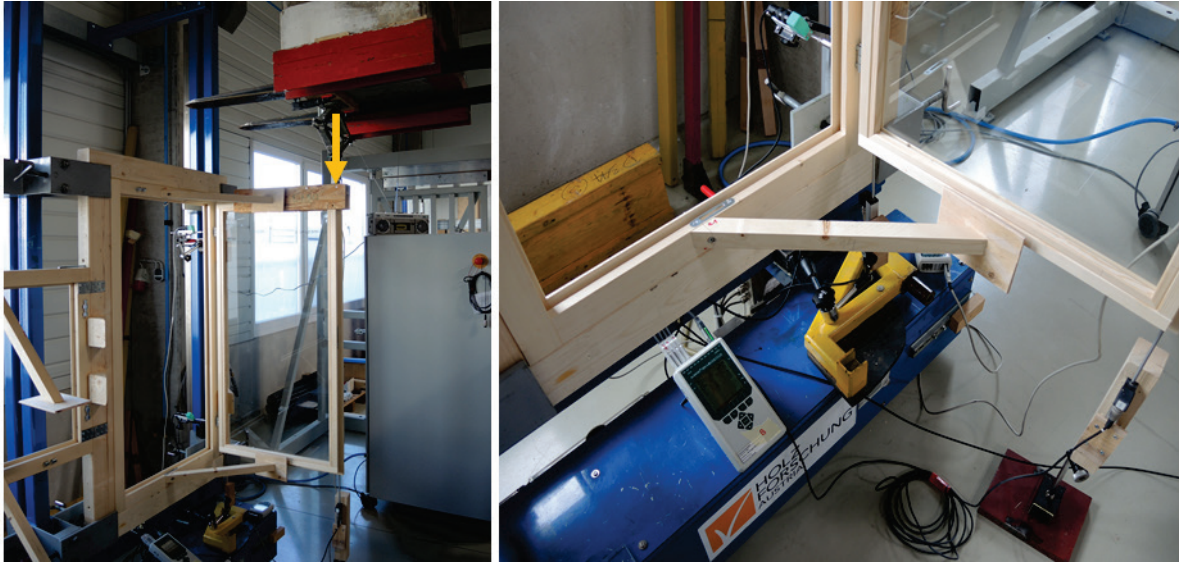


Abbildung 74 und 75: Vertikale Belastung eines „stehenden“ Testflügels (Racking gemäß ÖNORM EN 14608) (Aufnahmen: Holzforschung Austria).

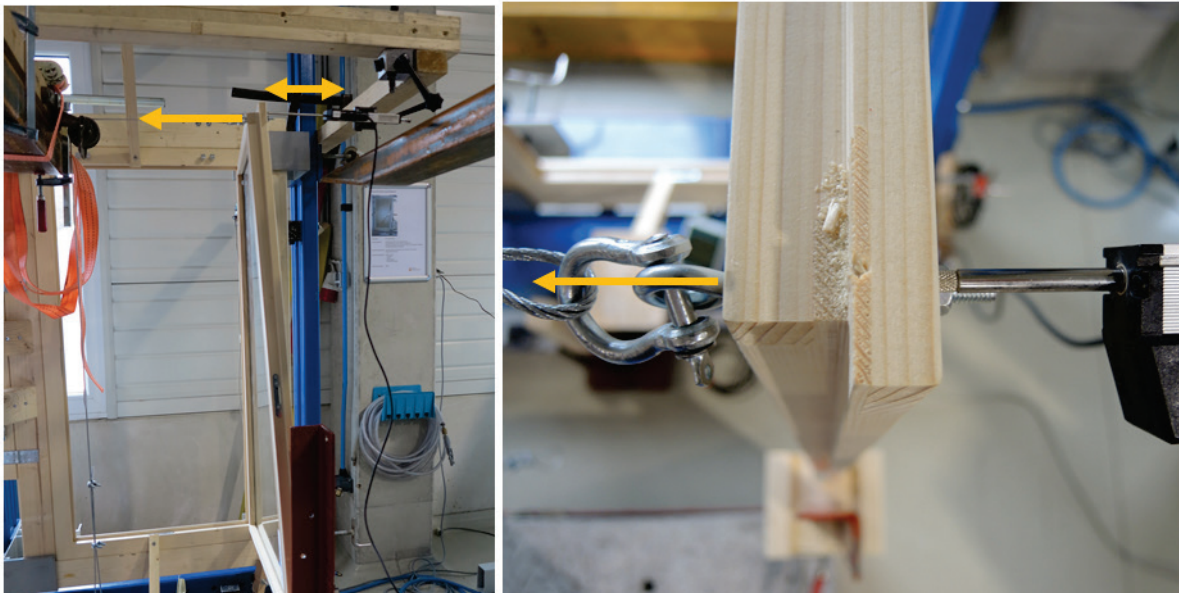


Abbildung 76 und 77: Horizontale Verwindung eines Testflügels (statische Verwindung gemäß ÖNORM EN 14609) (Aufnahmen: Holzforschung Austria).



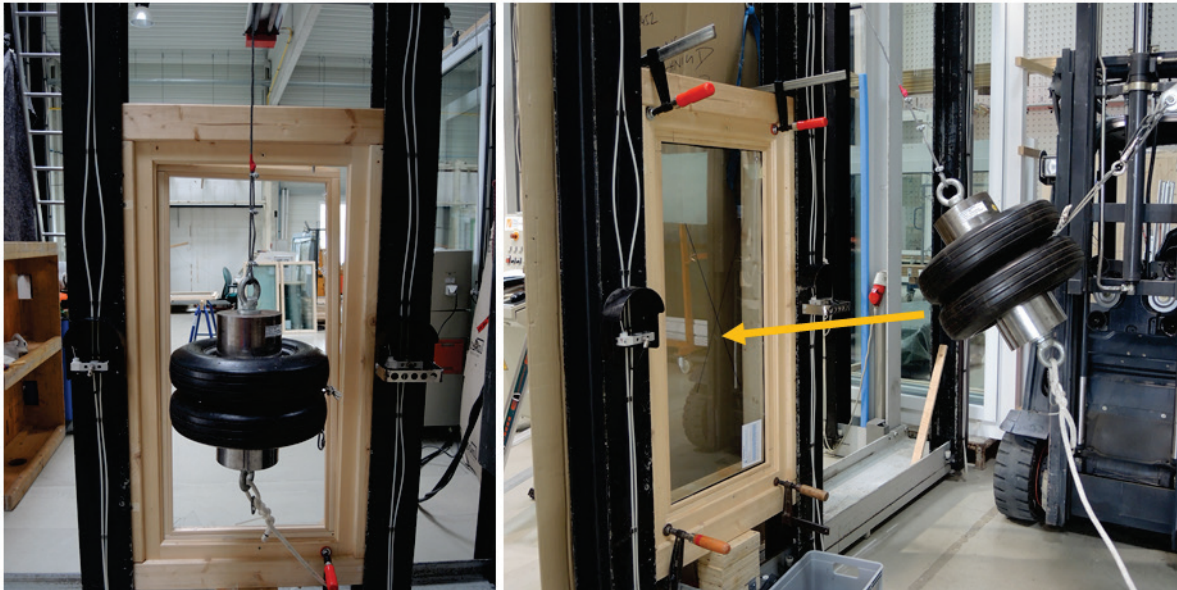


Abbildung 78 und 79: Stoßbelastung von Vakuumglas und Floatglas (gemäß ÖNORM EN 13049) (Aufnahmen: Holzforschung Austria).

Für die mechanischen Untersuchungen wurden verschiedene Vakuumglas- und Floatglas-Varianten in Kastenfensterflügelrahmen (41 x 41 mm), mit Hilfe drei unterschiedlicher Glaslagerungs- bzw. Befestigungsarten montiert:

- Glaskleben mit 2K Silikon auf Ebene 4 des Vakuumglases
- Glasleiste Klotzung ohne Abdichtung der Glasleiste mit Dichtstoff
- Kittfuge Leinölkitt mit Dreiecksnägel (Kitt auch im Glasfalzgrund)

Die Aufteilung der verschiedenen Glasvarianten und Lagerungsarten ist in Tabelle 6 ersichtlich.

Die Ergebnisse der mechanischen Untersuchung Belastung in Flügelebene (Racking) für die drei unterschiedlichen Lagerungsarten (Glaskleben, Glasleiste, Kittfuge) der unterschiedlichen Glasvarianten zeigen, dass bei beiden Belastungsklassen (Klasse 2 = 400 N und Klasse 3 = 600 N) die Lagerungsart Glaskleben die geringste Verformung während der maximalen Belastung aufweist (Abbildung 18 und 19). Auch nach Entfernen der Last zeigt die Lagerungsart Glaskleben bei sämtlichen Glasvarianten die geringste bleibende Verformung. Das ist darauf zurückzuführen, dass bei dieser Variante die Lasteinleitung und Lastabtragung über den gesamten Umfang des Fensterflügelrahmens und der Glasscheibe erfolgt.

Die Lagerungsart Glasleiste zeigt hingegen die größte Verformung während der maximalen Belastung, da die Lasteinleitung auf die Glasscheibe punktuell (diagonal in zwei Eckbereichen) erfolgt und ein extrem schlanker und damit biegeweicher Fensterrahmen (41 x 41 mm) verwendet wurde (Abbildung 80 und 81). Außerdem wurde bei dieser Lagerungsart die Glasscheibe nur durch die Glasleiste im Fensterflügel gehalten (keine Abdichtung der Glasleiste).

Tabelle 8: Probenübersicht mechanische Untersuchung

Vakuumglas - Proben für mechanische Festigkeitsuntersuchungen							
Probe	LS Nummer	Glasbz.	Glasart	Aufbau (mm)	U-Wert (W/m²K)	Randverbund	Pilleraabstand (mm)
Lagerung - Glaskleben							
Float	158/2014/35	F4	Floatglas	4	ca. 5,8	/	/
Float	158/2014/36	F4	Floatglas	4	ca. 5,8	/	/
N 25	158/2014/23	N3/V/N3	Floatglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Grün	25
N 30	158/2014/25	N3/V/N2	Floatglas	3/0,15-0,2/2	2,176*	Schwarzgrau	30
N 30	158/2014/28	N3/V/N3	Floatglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Schwarzgrau	30
T 30	158/2014/29	T3/V/T3	Temperglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Grün	30
T 35	158/2014/19	T3/V/T3	Temperglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Grün	35
T 35	158/2014/21	T3/V/T3	Temperglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Grün	35
Lagerung - Glasleiste							
Float	158/2014/34	F4	Floatglas	4	ca. 5,8	/	/
Float	158/2014/33	F4	Floatglas	4	ca. 5,8	/	/
N 25	158/2014/20	N3/V/N3	Floatglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Grün	25
N 30	158/2014/18	N3/V/N3	Floatglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Grün	30
N 30	158/2014/24	N3/V/N3	Floatglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Schwarzgrau	30
T 30	158/2014/8	T3/V/T3	Temperglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Schwarzgrau	30
T 35	158/2014/17	T3/V/T3	Temperglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Grün	35
Lagerung - Kittfase							
Float	158/2014/31	F4	Floatglas	4	ca. 5,8	/	/
Float	158/2014/32	F4	Floatglas	4	ca. 5,8	/	/
N 25	158/2014/15	N3/V/N3	Floatglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Grün	25
N 30	158/2014/13	N3/V/N3	Floatglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Schwarzgrau	30
N 30	158/2014/14	N3/V/N3	Floatglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Grün	30
T 30	158/2014/7	T3/V/T3	Temperglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Schwarzgrau	30
T 35	158/2014/11	T3/V/T3	Temperglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Schwarzgrau	35
T 35	158/2014/16	T3/V/T3	Temperglas	3/0,15-0,2/3	2,176*	Grün	35
* aufgrund von anlagentechnischen Schwierigkeiten konnten die 2 x 3 mm Vakuumscheiben zum Zeitpunkt der Herstellung für die Holzforschung Austria nicht mit Beschichtung hergestellt werden, was jedoch keine Auswirkung auf die mechanischen Untersuchungen hat;							

Die Lagerungsart Kittfase zeigt im Durchschnitt eine mittlere Verformung während der maximalen Belastung (Abbildung 80 und 81) und die größte bleibende Verformung. Dies ist

darauf zurückzuführen, dass die Verformungen sehr vom Aushärtegrad des Leinölkittes abhängen und somit auch vom Zeitpunkt der Durchführung der jeweiligen Versuche, und die bleibenden Verformungen durch die Charakteristik des Leinölkittes sehr groß sind.

Wie in den Abbildungen 80 und 81 ersichtlich, konnte aufgrund der geringen Probenanzahl nicht jede Glaslagerungsart mit jeder Glasvariante untersucht werden.

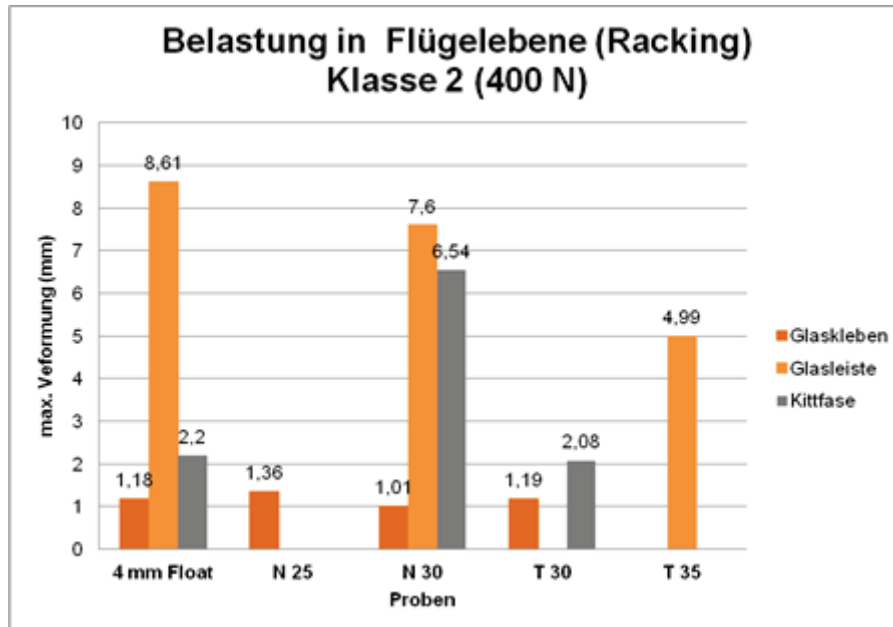


Abbildung 80: Maximale Verformung während Belastung von 400 N (Flügel stehend).

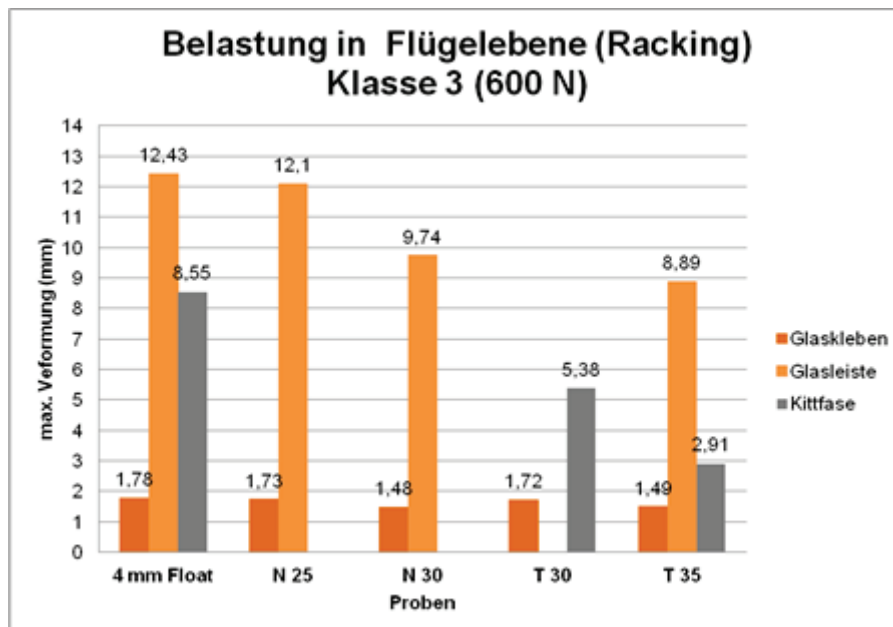


Abbildung 81: Maximale Verformung während Belastung von 600 N (Flügel stehend).

Die Ergebnisse der mechanischen Untersuchung der statischen Verwindung nach links und rechts zeigen Großteils ein ähnliches Verhalten wie bei der Belastung in Flügelebene (Racking), und ist auf die gleichen Ursachen zurückzuführen (Abbildung 82 und 83).

Bei der Lagerungsart Kittfase weicht der Kitt in Belastungsrichtung aus, was zur Folge hat, dass die Dreiecksnägel, welche die Glasscheibe im Fensterflügel positionieren, die Belastung nicht mehr vollständig übernehmen können, es zu Lastumlagerungen kommt und die Glasscheibe bricht. Daher sind in Abbildung 82 und 83 nur wenige Ergebnisse zur Lagerungsart Kittfase zu finden.

Zusätzlich zu Klasse 2 (= 250 N) wurde auch Klasse 3 (= 300 N) bei der statischen Verwindung untersucht. Dies wurde allerdings nur punktuell ausgeführt und hat den Belastungen nur teilweise widerstanden. Bei der gewählten Versuchskonfiguration und dem eingesetzten Vakuumglas dürfte die Belastungsgrenze zwischen Klasse 2 und 3 erreicht werden.

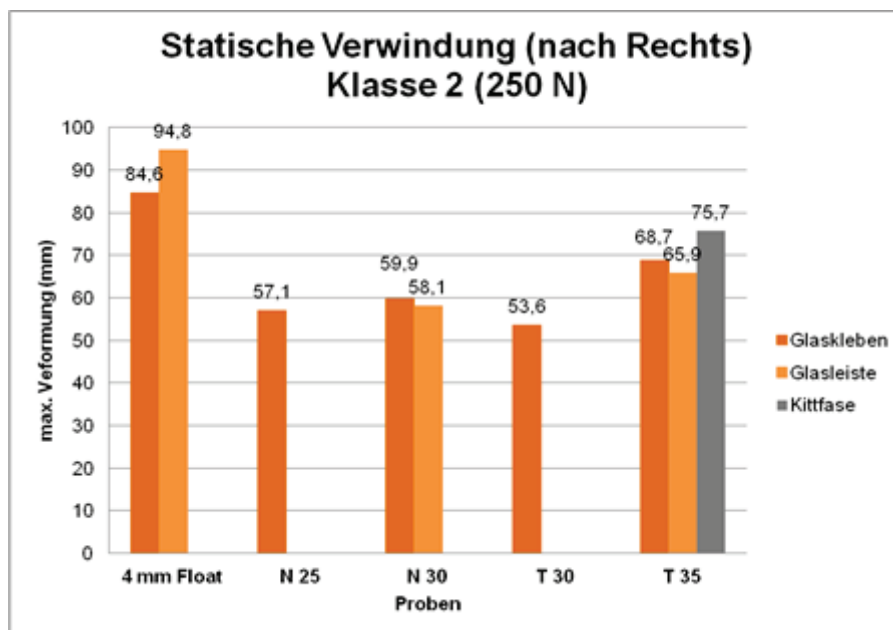


Abbildung 82: Maximale Verformung während Belastung von 250 N - RECHTS (Flügel stehend).

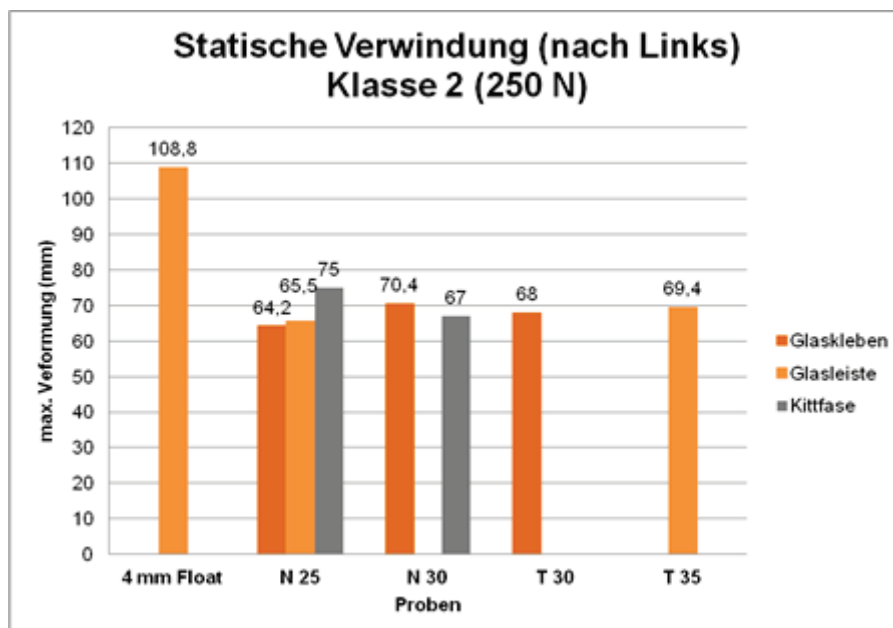


Abbildung 83: Maximale Verformung während Belastung von 250 N - LINKS (Flügel stehend).

Die Ergebnisse der Stoßbelastung zeigen, dass alle Vakuumgläser nur einer sehr geringen Fallhöhe widerstehen konnten, während die 4 mm Floatglas-Scheibe eine deutliche höhere Stoßbelastung aufweist. Die sehr geringe Stoßbelastung der Vakuumglasscheiben ist darauf zurückzuführen, dass durch die zwischen den zwei Scheiben positionierten Abstandhalter (Pillars) eine punktuelle bruchinduzierende Belastung auf die Scheiben entsteht, der diese nicht standhalten und daher brechen.

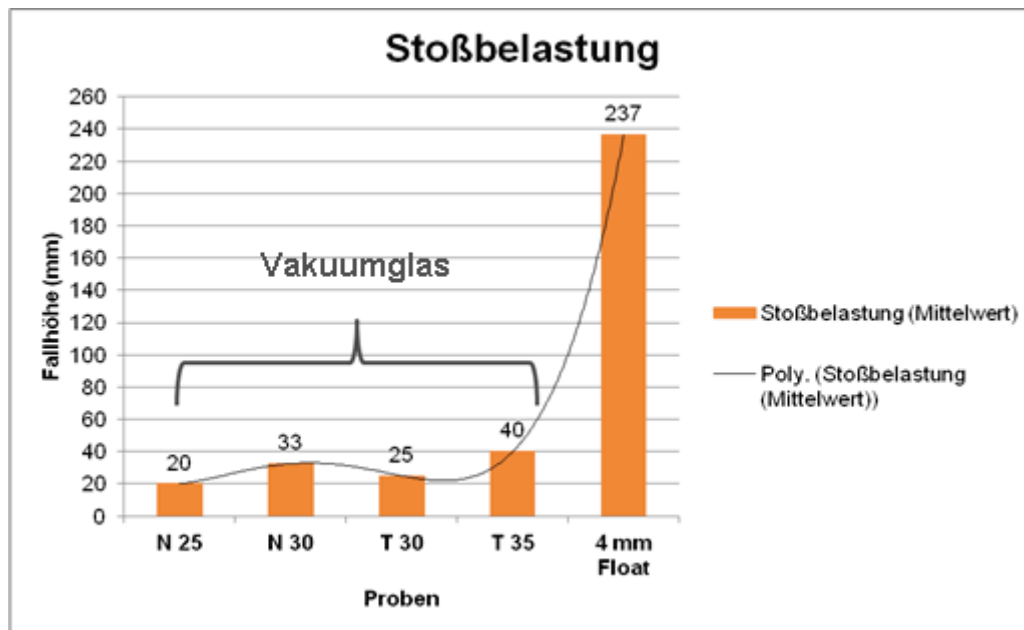


Abbildung 84: Maximale Fallhöhe des Bendels ohne Bruch des Vakuumglases (gegen Glasfalzanschlag geprüft).

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass das Lasteinleitungspotential in Vakuumglas mit jenem von Floatglas bei den verwendeten Glasformaten und Glasanschlussvarianten vergleichbar ist. Ein geklebter Glasanschluss ist bei einem Flügelquerschnitt von nur 41 x 41 mm aus mechanischer Sicht jedenfalls zu bevorzugen.

Im Hinblick auf Stoßbelastungen zeigen sich die eingesetzten Vakuumgläser als sehr empfindlich. Hier ist jedenfalls noch Verbesserungsbedarf gegeben.

Es wird auch notwendig sein zukünftig spezifische Prüfverfahren für VG zu finden.

## 2.1.2 Thermische Simulationen & Tests.

Bei den thermischen Simulationen wurden folgende Teilschritte durchgeführt: (i) Zunächst wurde der Einfluss der Pillar auf die Gesamtperformance der Fenster im Rahmen von Simulationen untersucht (siehe nachfolgende Sektion). (ii) Parallel dazu wurden mit einfachen normativen Berechnungen (U-Wert-Berechnungen nach DIN EN ISO 6946 und anderen) das grundsätzliche Verbesserungspotential von Vakuumgläsern gegenüber dem Altfenster-Bestand überprüft (siehe Anhang 1). (iii) Weiters wurden zwei Simulationswerkzeuge und eine ganze Anzahl an Fensterkonstruktionen mit den Simulationswerkzeugen AnTherm und Window evaluiert (jeweils Status Quo und Verbesserungspotential durch Anwendung von Vakuumgläsern (siehe Anhänge 2 und 3). (iv) Zusätzlich wurden mit dem gebauten-Mock-Up thermische Testläufe bei der Holzforschung im Labor Stätten durchgeführt.

### 2.1.2.1 Pillar-Einfluss

Als Vorbereitungsarbeit für weiterführende Simulationen musste zunächst überprüft werden, in welcher Form die Pillar bei der Simulation eine Rolle spielen. Dies ist insofern bedeutsam, als dass jeder Pillar eine kleine dreidimensionale Wärmebrücke darstellt. Wäre der Einfluss der Pillars auf die Ergebnisse groß, müssten grundsätzlich alle Simulationen dreidimensional durchgeführt werden. Dies wurde auch in Form eines Teils eines wissenschaftlichen Papers untersucht und bei der Building Simulation Application Konferenz 2017 (Feb 2017) in Bozen vorgestellt (Pont und Mahdavi 2017): Es wurden zunächst 2D-Simulationen angestellt, welche durch den Pillarfreien-Raum und durch die Pillars schnitten. Dann wurden die Ergebnisse dieses Schrittes mit einer Vakuumglasscheibe verglichen, welche vollständig dreidimensional simuliert wurde (Abbildung 85).

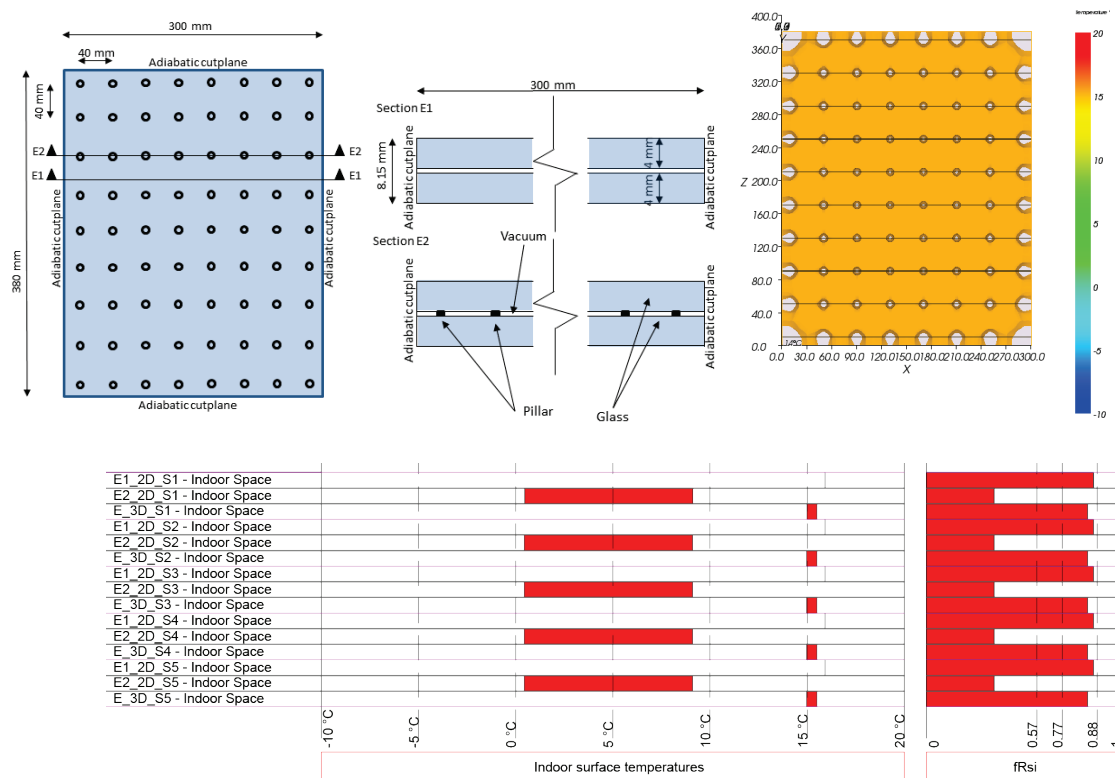


Abbildung 85: Untersuchung des Einflusses der Pillar auf Simulationsergebnisse.

Es zeigt sich, dass sowohl die kleinsten Oberflächentemperaturen, wie auch die  $f_{Rsi}$ -Werte (Gemäß EN ISO 10211) des 2D-Schnittes durch das Vakuum nur geringfügig von der 3D-Simulation abweichen, während der Schnitt durch den Pillar enorm abwich. Da die Pillars aber flächenmäßig sehr klein sind, ist eine Approximation mit zweidimensionalen Annahmen ohne Pillar-Berücksichtigung im Glasfeld akzeptabel. Im Rahmenbereich ist dies jeweils zu prüfen.

### **2.1.2.2 Normative Berechnungen über das Verbesserungspotential durch Vakuumglas (siehe auch Anhang 1)**

Wenig überraschend kann man durch Vakuumverglasungen – bei einer schlichten normativen Betrachtung – beträchtliche Verbesserungen in der thermischen Performance erzielen:

Im Anhang 1 ist dies im Detail dargestellt: Die Beispiele und die Zusammenfassung der Ermittlung des thermischen Verbesserungspotenzials für die Bauteilenergiebilanz durch den Einsatz von neuem Isolierglas und alternativ von Vakuumglas und Vakuumisolierglas für die Fenstermodernisierung zeigen, dass durch den Glasaustausch deutliche Verbesserungen erreicht werden können.

Der Austausch der Verglasung kann eine interessante Alternative zum Fenstertausch sein. Vakuumglas eröffnet dafür neue Optionen für Fenstertypen für die das bislang nicht möglich war.

Vakuumisolierglas würde es im Austausch gegen altes Isolierglas erlauben nicht nur den Wärmeschutz, sondern auch den Schallschutz zu verbessern und so nicht nur den thermischen, sondern auch den akustischen Innenraumkomfort zu steigern.

In jedem Falle gilt jedoch, dass diese möglichen Maßnahmen immer nur Teil eines gut geplanten Gesamtmodernisierungskonzepts eines Gebäudes sein sollten und jeweils nur objektspezifisch beurteilt werden können.

### **2.1.2.3 Überblick über die Simulationsarbeiten mittels Window und AnTherm**

Da die normativen Berechnungen nur auf die thermisch-energetische Performance eingehen, jedoch nicht wichtige bauphysikalische Parameter wie Kondensatbildungs-Risiko und kälteste Oberflächentemperaturen berücksichtigten, war der Einsatz von numerischer thermischer Simulation (sowie von Tests eines Mock-Ups → siehe Folgesektion) von Bedeutung.

Hier ergibt sich eine Diskrepanz zwischen den Möglichkeiten der Simulation und der physikalischen Realität, nämlich die Behandlung von eingeschlossenen ruhenden, bzw. schwach-belüfteten Luftschichten in historischen Fensterkonstruktionen (z.B. zwei-schichtigen Industrieverglasungen oder traditionellen Kastenfenstern). Eine Betrachtung mittels Computational Fluid Dynamics im Zwischenraum erfordert eine Vielzahl von Parametern, welche kaum wirtschaftlich zu erheben sind (und für jede Simulation messtechnische Ausführung eine Mock-Ups benötigen würden). Daher wurde von diesem Ansatz – trotz der sicherlich besten physikalischen Annäherung – Abstand genommen. Die verwendeten Wärmebrückentools (beides Finite-Elemente-Werkzeuge) können eingeschlossene Lufträume auf zweierlei Arten nachemulieren: Auf der einen Seite als „Material“ mit einem errechneten

Lambda-Wert (abhängig von Stärke und grad der Abgekapseltheit). Dieser Ansatz ist modellierungstechnisch einfach hat aber die fundamentale Schwäche, die Zwischenraumtemperaturen nicht errechnen zu können und daher nur eine grobe Annäherung zu liefern. Auf der anderen Seite können Lufteinschlüsse als eigene „Lufträume“ simuliert werden. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die Temperaturverteilung bzw. die Bedingungen nahe an Oberflächen des Innenraums besser angenähert werden können als im „Material“-Ansatz. Allerdings ist es erforderlich, Randbedingungen für den Innenraum zu setzen, so dass man diese mittels einer Annäherung des durch die beiden Schalen fließenden Wärmestroms approximieren muss.

Da die beiden genannten Ansätze beide Ihre Vor- und Nachteile besitzen und für verschiedene Beispiele unterschiedlich gut geeignet waren, wurden beide verwendet.

Anhang 2 zeigt die Resultate für typische (generische) Kastenfenster, für eine Industrieverglasung (Tabakfabrik Linz) und für Fenster des Parlaments in Wien, welche mit dem „Material“-Ansatz evaluiert wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass ohne – signifikante – optische Einschränkung eine bemerkenswerte thermische Verbesserung stattfindet.

Anhang 3 (eine bei der BauSim2016 / Dresden präsentierte Konferenzpapier) zeigt die Methode und Resultate des anderen „Luftraum“-Ansatzes. Hier ist bemerkenswert, dass die Ergebnisse, welche für eine typische Kastenfensterkonstruktion durchgeführt wurden, anzeigen, dass die Frage, ob Vakuumglas tendenziell eher im Innenflügel oder Außenflügel einer Konstruktion einzusetzen sind, das gängige Paradigma der Sanierung des Innenflügels in Frage stellt. Die Ergebnisse zeigen Probleme bei Innenflügelsanierung, wie Kondensat im Zwischenraum und Vereisung auf.

#### **2.1.2.4 Thermische Laborversuche mit Vakuumglas im Kastenfenstersystem**

Hier galt es zu untersuchen, wie sich Vakuumglasscheiben in Kombination mit Floatglasscheiben in einem Kastenfenstersystem auf den Wärmedurchgang und die Kondensatbildung auswirken.

Bei dieser Untersuchung wurden mehrere Varianten der Vakuumglasordnung untersucht, um die Unterschiede des Wärmedurchganges und der Kondensatbildung zu ermitteln.

Dazu wurden Vakuumglasscheiben mit der Dicke von 4/0,15/4 mm inklusive Low-E Beschichtung mit einem U-Wert von  $U_g = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$  für die Klimauntersuchungen verwendet (siehe Tabelle 9). Es wurden zwei Kastenfenster hergestellt, welche jeweils auf der einen Seite Vakuumglas und auf der anderen Seite 4 mm Floatglas aufweisen. Zusätzlich ist anzumerken, dass bei dem Vakuumglasfensterflügel eine Stock-Lippendichtung vorhanden ist, diese aber im Stulpbereich fehlte. Dadurch sind größere Undichten im Stulpbereich vorhanden und damit auch ein größerer Feuchteintrag in den Kastenfensterzwischenraum gegeben. Die Fensterflügel mit Floatglas haben keine Dichtung. Die beiden Kastenfenstervarianten unterscheiden sich lediglich durch den Glaseinstand von 10 mm und 16 mm beim Fensterflügel. In den hier vorgestellten Ergebnissen wurde nur die Kastenfenstervariante mit 16 mm Glaseinstand angegeben.



Tabelle 9: Probenübersicht Klimauntersuchung

Vakuumglas-Proben für Klimauntersuchungen							
Probe	LS Nummer	Glasbz.	Glasart	Aufbau (mm)	U-Wert (W/m <sup>2</sup> K)	Randverbund	Pillerabstand (mm)
<b>Lagerung - Kittfase</b>							
TL 40	158/2014/1	TL4/V/T4	Temperglas	4B/0,15/4	0,58	Schwarz-grau	40
TL 40	158/2014/2	TL4/V/T4	Temperglas	4B/0,15/4	0,58	Schwarz-grau	40
TL 40	158/2014/3	TL4/V/T4	Temperglas	4B/0,15/4	0,58	Schwarz-grau	40
TL 40	158/2014/4	TL4/V/T4	Temperglas	4B/0,15/4	0,58	Schwarz-grau	40
TL4= diese Scheibe weist eine Beschichtung B auf;							

Der Untersuchungsaufbau ist in Abbildung 86 und 87 ersichtlich und wurde so gewählt, dass auf der einen Seite der Kastenfenster ein winterliches Außenklima (ca. - 3,5 C bis -15 C) und auf der einen Seite ein Innenklima (ca. 20 °C bei unterschiedliche Luftfeuchten von 50 % bis 80 %) simuliert wurde.

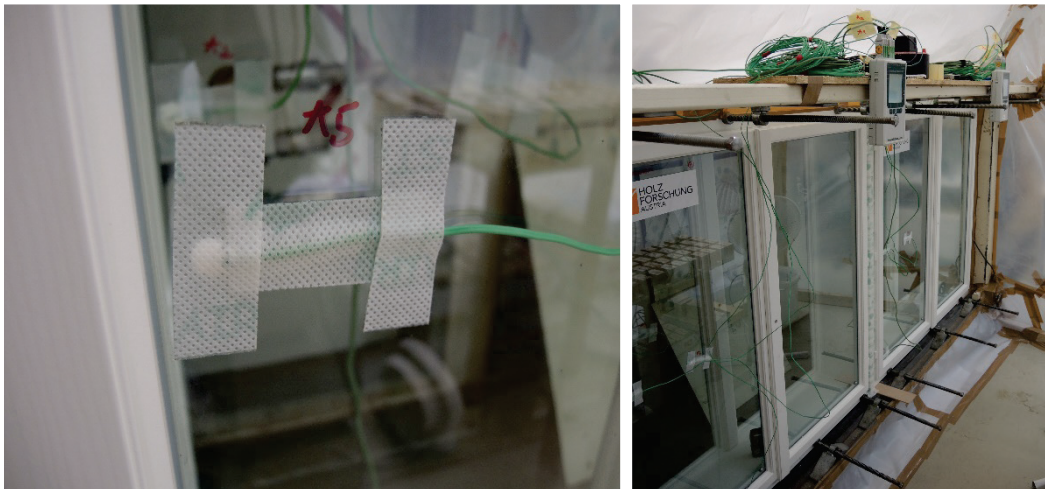


Abbildung 86 und 87: Aufbau und Durchführung Klimauntersuchung mit Messfühler direkt auf Glasoberfläche.

Es wurden mehrere Varianten der Glasanordnung untersucht (Vakuumglas außen, Floatglas innen und umgekehrt). Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 10 ersichtlich.

Die Messstellenanordnung der Glasoberflächentemperaturen ist in Abb. 88 dargestellt.

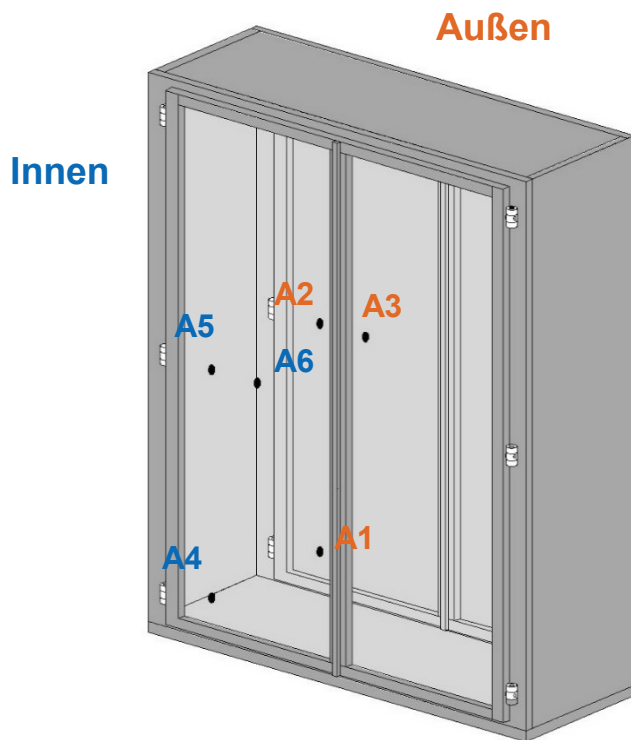


Abbildung 88: Mock-Up-Schema mit Positionen der Messfühleranordnung.

In der ersten Versuchsserie wurde die „klassische“ Variante, Floatglas außen und Vakuumglas inkl. Dichtung innen, untersucht. Diese Ergebnisse haben gezeigt, dass der Energieeintrag in den Kastenfensterzwischenraum durch das innenliegende Vakuumglas so gering ist, 89). Hingegen weisen die Vakuumglasscheiben auf der Rauminnenseite auch bei höheren relativen Luftfeuchtigkeiten von über 60 % nur im Bereich des Randverbundes leichte Kondensatbildung auf (Abbildung 90).



Abbildung 89 und 90: Kondensat im Randbereich des Vakuumglases an der Rauminnenseite und Eisbildung am Floatglas des äußeren Fensterflügels.

Tabelle 10: Ergebnisse verschiedener Varianten der Klimauntersuchung

FENSTER A							
Untersuchungs- aufbau	Innen- klima	Konden- sat	innere Glas – Oberflächentemp. der Innenscheibe °C	Zwischen- raum-klima	Konden- sat	innere Glas – Oberflächentemp. der Außenscheibe °C	Außentemp. °C
			A4 - A5 - A6			A1 - A2 - A3	
VG 8mm / ZR / Float 4mm	20,8 °C 49,5 %	/	8,7 / 13,5 / 17,5	-4,9 °C 67,2 %	KE	-10,8 / -11,4 / -9,7	-14,9
	20,8 °C 62,2 %	KK	9,9 / 14,0 / 17,5	-5 °C 66 %	EE	-10,5 / -11,4 / -9,6	-14,5
	20,8 °C 71,4 %	KK	9,8 / 13,7 / 17,2	-5,2 °C 65,8 %	EEE	-10,6 / -11,5 / -9,8	-14,6
	20,8 °C 80,7 %	KKKK	9,8 / 13,5 / 16,9	-5,3 °C 67,8 %	EEEE	-10,6 / -11,5 / -9,6	-14,6
Float 4mm / ZR / VG 8mm	20,0 °C 55,6 %	/	16,2 / 16,9 / 17,0	14,4 °C 55,6 %	K	4,4 / 10,7 / 13,1	-15,6
	20,1 °C 59,6 %	/	16,5 / 16,6 / 16,7	14,2 °C 57,3 %	KK	4,5 / 10,0 / 12,7	-15,6
	19,5 °C 69,3 %	/	16,0 / 16,1 / 16,3	13,5 °C 63,7 %	KK	4,4 / 9,6 / 12,3	-15,5
	18,9 °C 76,5 %	/	15,6 / 15,6 / 15,8	13,1 °C 66,5 %	KKKE	4,1 / 9,3 / 11,9	-15,0
nur VG 8mm	19,9 °C 51,4 %	KK	4,6 / 11,7 / 17,5	/	/	/	-14,8
	19,2 °C 70,0 %	KKK	4,9 / 11,4 / 17,0	/	/	/	-14,9
	20,2 °C 78,0 %	KKK	6,6 / 12,5 / 17,6	/	/	/	-14,0
Float 4mm / ZW / VG 8mm	19,7 °C 61,5 %	/	17,4 / 17,3 / 17,4	13,8 °C 68,9 %	K	8,8 / 12,7 / 14,7	-4,1
nur VG 8mm	20,1 °C 54,2 %	/	/	/	/	15,0 / 17,2 / 18,3	-3,3

K= Kondensat; E= Eis  
Anzahl der Buchstaben ist ein Hinweis auf die Menge von Kondensat und Eis (z.B. E = wenig, EEEE = viel Eis)

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde eine zweite Versuchsreihe durchgeführt, in der das Verglasungssystem „umgedreht“ wurde. So wurde die Floatglasscheibe auf der Innenseite und die Vakuumglasscheibe inkl. Dichtung auf der Außenseite positioniert. Durch diese „verkehrte“ Anordnung gelang es den Kastenfensterzwischenraum so warm zu halten, dass Temperaturen von über 13 C bei -15 C Außentemperaturen gemessen wurden. Auch wurde bei 20 C und 55 % r. L. kaum Kondensat (nur im Eckbereich der VG-Scheibe) festgestellt. Bei höheren Luftfeuchtigkeiten nahm auch die Kondensatbildung zu und führte bei 76 % r. L. zu leichter Eisbildung im Eckbereich der VG-Verglasung.

Darüber hinaus zeigten die Untersuchungen, dass die Vakuumglasscheiben in verschiedenen Bereichen auf der Scheibe unterschiedliche Oberflächentemperaturen aufweisen (siehe Abb.91 Thermographie). Die Messfühler wurden an drei unterschiedlichen Positionen auf der Scheibe angebracht, welche in Abbildung 25 ersichtlich sind. Dabei wurde, wie zu erwarten, festgestellt, dass in der unteren linken Ecke immer die geringste Temperatur gemessen wurde. Desto weiter weg die Messfühlerposition vom Randverbund ist, desto höher ist die Oberflächentemperatur der Vakuumglasscheibe. Dies ist auf die Art und Zusammensetzung des Randverbundes (Glas-Metall-Schmelze) zurückzuführen.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass beim Einsatz von hochwärmedämmenden Verglasungen wie den eingesetzten Vakumgläsern, diese, im Gegensatz zur derzeitigen Lehrmeinung, am Außenflügel anzuordnen sind. Diese Erkenntnis eröffnet vielen neu konstruktive Möglichkeiten, ist aber noch durch weitere Untersuchungen, insbesondere auf Auswirkungen im Bauanschlussbereich, zu verifizieren.

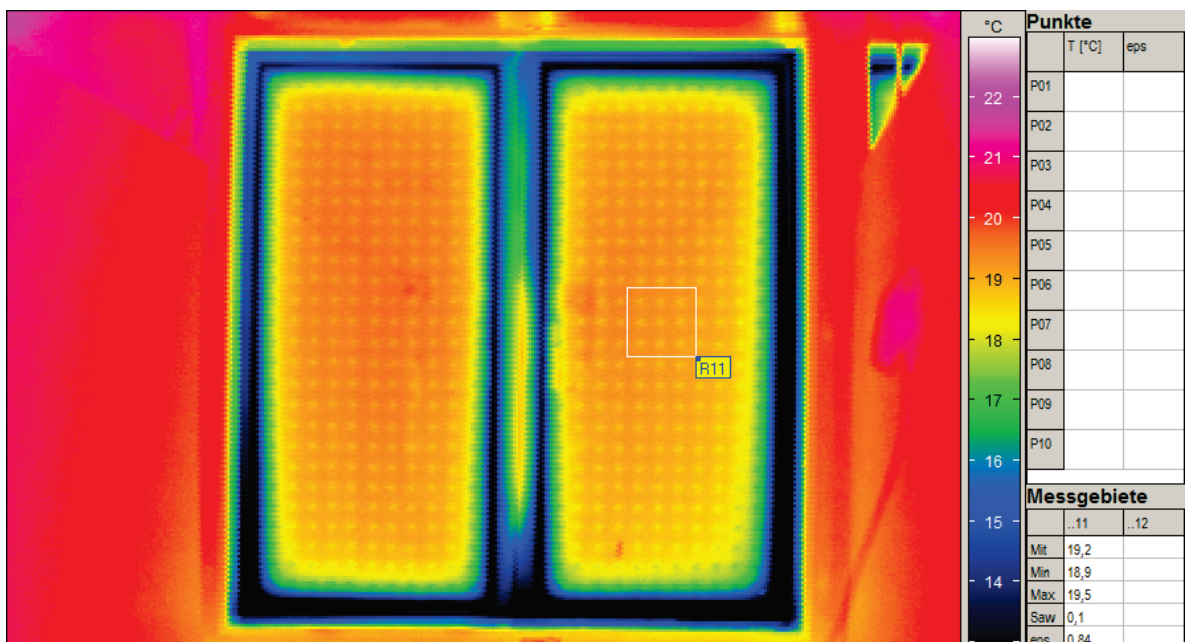


Abbildung 91: Thermographie eines klassischen Kastenfensters mit Vakuumglas.

## 2.2 Ergebnisse zu Lebenszyklus-Untersuchungen (Arbeitspaket 5)

Im Rahmen des gegenständlichen Projektes VIGSYS reno wurden die Rahmenbedingungen und Grundlagen zur Erstellung von Ökobilanzen von Vakuumisolierverglasungen untersucht. Hierzu wurden in einem ersten Schritt Ökobilanzen von Verglasungen und Fenstern generell analysiert und die Besonderheiten festgehalten. Weitere Schritte stellte die Untersuchung der unterschiedlichen europäischen Initiativen zur ökologischen Analyse von Bauprodukten und Fenster dar, in welche die von uns angewandte Methodik eingebettet sein muss, um eine Konsistenz der Berechnungsverfahren zu erreichen. Nach Klärung der Rahmenbedingungen werden bereits durchgeführte Lebenszyklusanalysen (u.a. im Rahmen von Forschungsprojekten der Autoren) untersucht und Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Eine wesentliche Aufgabe war die gründliche Analyse der Produktion von Vakuumisolierverglasung (VIG), was die Erarbeitung eines spezifisch auf die Herstellung von VIG zugeschnittenen Erhebungsbogens ermöglichte. Dieser Erhebungsbogen wurde dem chinesischen Partner Synergy sowohl elektronisch übermittelt, als auch persönlich vom Projektpartner Dr. Hohenstein vor Ort überreicht. Trotz umfangreichen Bemühungen wurden aus China jedoch keine Daten übermittelt. Daher wurde der Forschungsschwerpunkt auf die Analyse der Randbedingungen wie Transport bzw. Energiebereitstellung gelegt und damit die Voraussetzung für rasche Ökobilanzierungen der Produktion geschaffen, sollten Daten zur Verfügung gestellt werden. Auf Basis von Fachliteratur, eigenen Berechnungen zu Energie sowie umfangreichen Analysen wurden qualitative Abschätzungen des Bilanzergebnisses der Produktion von VIGs in Relation zu Wärmeschutzglas (WSG), beispielhaft an der Wirkungskategorie „Globale Erwärmung – Treibhauspotential“, dargestellt in Abbildung 92, vorgenommen.

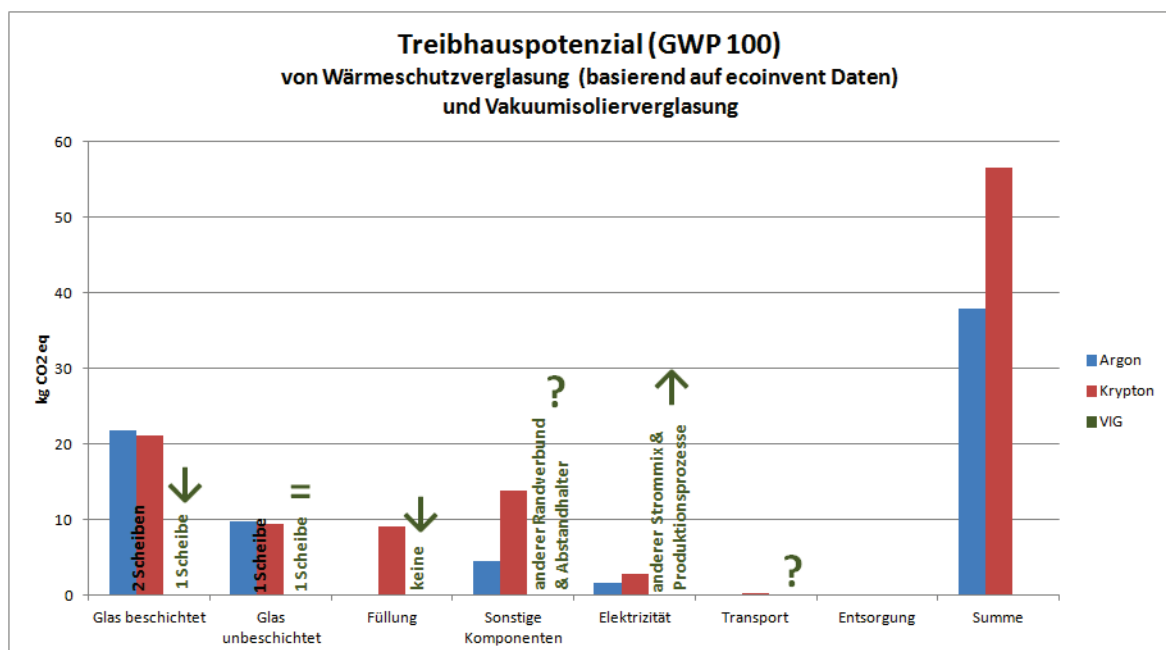


Abbildung 92: Treibhauspotential in kg CO<sub>2</sub>eq. durch die Herstellung (Phase A1-A3) von WSG nach Komponenten. Die Abschätzung des Treibhauspotentials der Herstellung des VG ist in grün eingetragen (eigene Darstellung).

## **Strommix und Strombedarf für die Produktion**

Die Zusammensetzung des österreichischen, europäischen und chinesischen Strommix unterscheidet sich stark, wodurch sich, je nachdem wo die Produktion der Verglasung erfolgt, unterschiedliche ökologische Auswirkungen des Herstellungsprozesses ergeben. Ein Vergleich der gängigsten Wirkungskategorien zeigt, dass der chinesische Strommix ein deutlich höheres Treibhauspotenzial und Versauerungspotenzial besitzt als der österreichische und europäische Strommix.

## **Umweltwirkungen von Transportprozessen**

Ein eigener Abschnitt ist dem Transport der Gläser gewidmet, da die Erfahrung zeigt, dass hier wesentliche Unterschiede auftreten können, die nicht vernachlässigt werden dürfen. In Abhängigkeit von der generellen Bearbeitungsintensität eines Produktes haben Transporte unterschiedlichen Effekt auf die Umweltwirkungen. Transportdistanzen, vor allem mit dem LKW, zählen zu den Hauptkontributoren bei den Umweltwirkungen, die sich mit der Wahl des richtigen Transportmediums deutlich reduzieren ließen. Wesentlich ist v.a. auch der Einfluss des Transportmittels auf die Umweltwirkungen. So liegen etwa die Umweltwirkungen von Ozeanfrachter und LKW etwa in der gleichen Größenordnung, obwohl der Seeweg ein Vielfaches der Entfernung beim Transport von VIG aus China ausmacht.

## **Schlussfolgerungen**

Obwohl die Herstellung von Vakuumisolierverglasung mit großer Wahrscheinlichkeit mit geringerem Materialaufwand verbunden ist, ist davon auszugehen, dass die energieintensiven Produktionsprozesse und ein stark auf Kohle basierender chinesischer Strommix die Umweltauswirkungen gegenüber der Herstellung von WSG erhöhen.

Der Transport der chinesischen Verglasung zu österreichischen Fensterherstellern ist unumstritten mit höheren Umweltwirkungen verbunden als der Transport eines österreichischen oder deutschen WSG. Bis zur Ankunft der VIG der Firma Synergy bei österreichischen Fensterherstellern wurden durch dieses Produkt also größere Umweltwirkungen verursacht als bei vergleichbaren WSG-Produkten.

Zahlreiche Studien und auch eigene durchgeführte Analysen über den Lebenszyklus von Fenstern und ganzen Gebäuden zeigen, dass der Mehraufwand bei der Herstellung eines Produktes durch einen geringeren Energieaufwand zur Gebäudekonditionierung während seiner Lebensdauer jedenfalls ausgeglichen wird – vorausgesetzt die Nutzungsdauer entspricht jener der Konkurrenzprodukte. Wenn durch den Einsatz von VIG geringere Fenster-U-Werte erreichbar werden oder VIG bei Sanierungen von Gebäuden und Fenstern eingesetzt werden kann, wo die Verwendung gleichwertiger 3-fach Wärmeschutzverglasung aus konstruktiven oder Denkmalschutz-Gründen nicht möglich ist, so würde die während der Nutzungsdauer entstehende Energieeinsparung den höheren Aufwand, der durch Produktion und Transport entsteht sehr wahrscheinlich ausgleichen.

Es ist auch anzunehmen, dass in den nächsten Jahren weltweit Produktionswerke entstehen und deshalb die aktuellen Betrachtungen zum Transport so nicht mehr zutreffen.

## 2.3 Ergebnisse zu UpScaling und Bewertung der energetischen Einwirkungen einer breiten Verwendung der Vakuumläser (Arbeitspaket 6)

Zur Bearbeitung von Arbeitspaket 6 wurden zwei Bearbeitungsbemühungen vorgenommen:

- (i) Zunächst wurde das „Upsacling“ anhand von drei Wiener Gründerzeithäusern vorgenommen um die Effekte einer Applikation studieren zu können. Dies ist im nachstehenden Text beschrieben (und wurde im Rahmen der Fenster-Türen-Tagung 2016 vorgestellt.
- (ii) Zusätzlich wurde eine größere Studie zu den energetischen / volkswirtschaftlichen Effekten durch R. Vallentin und E. Heiduk vorgenommen. Diese ist im Anhang 4 beschrieben.

Ausgehend von den durchgeführten Simulationen und den zugehörigen Berechnungen wurde für drei typische, gründerzeitliche Wiener Bauten der Einfluss auf die Heizwärmebedarfsberechnung (nach dem Verfahren des österreichischen Energieausweises) evaluiert.

In den Abbildungen 93-98 werden die drei Objekte (die anonymisiert als Case 1, Case 2 und Case 3 bezeichnet werden) charakterisiert. Tabelle 11 listet einige Schlüsseldaten der drei Objekte auf.



Abbildung 93: Fassade Case 1



Abbildung 94: Fassade Case 2



Abbildung 95: Fassade Case 3

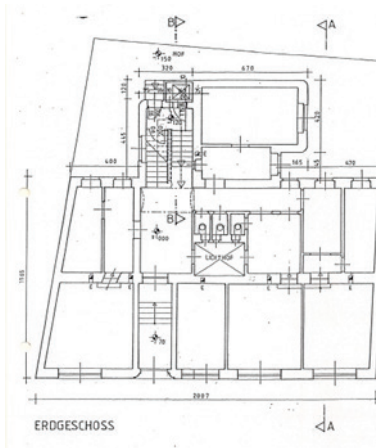


Abbildung 96: Grundrissplan Case 1

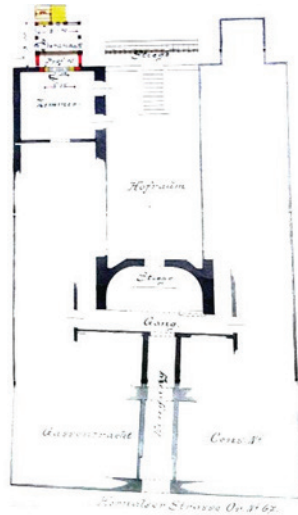


Abbildung 97: Grundrissplan Case 2

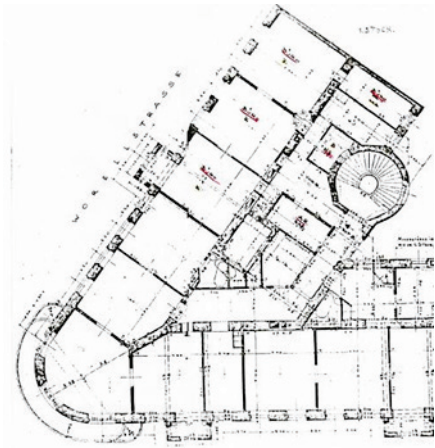


Abbildung 98: Grundrissplan Case 3

Tabelle 11: Fensteranteil Fassade, Fensterfläche, Bruttogeschossfläche und Bruttovolumen von Case 1, Case 2, Case 3.

	Case 1	Case 2	Case 3
Fensteranteil Fassade [%]	13,4 %	12,7 %	20,6%
Fensterfläche [m <sup>2</sup> ]	184,19	264,45	287,77
Bruttogeschossfläche [m <sup>2</sup> ]	1404,24	1730,52	1776,53
Bruttovolumen [m <sup>3</sup> ]	5153,56	6359,95	7127,88

Die Berechnungen wurden mit der Software Archiphysik (Version12) durchgeführt. Eine Reihe von Eingabedaten waren hierfür erforderlich: Neben den üblichen Daten über Gebäudegeometrie (Größe, Ausrichtung, Lage von Bauteilen) kommt für die Sanierungsszenarien die Qualität der Vakuumgläser, bzw. der Wärmebrücken mit der jeweiligen Rahmenkonstruktion hinzu. Es wurden in Summe für die drei Case-Gebäude jeweils 6 Szenarien gerechnet, von denen die ersten 5 („Original“, „VIG-EXT“, „VIG-INT“, „VIG-EXT\_impr“ und „VIG-INT\_IMPR“) mit den Ausführungen in den AnTherm-Simulationen aus der vorherigen Sektion korrespondieren. Als zusätzliche Variante wurde eine Variante INS-INT aufgenommen, die eine Schale mit Isoliergläsern ersetzt (diese Variante muss aber für Gebäude mit erhaltenswerter Fassade als kaum realisierbar bei gleichzeitiger Beibehaltung der Erscheinungsform betrachtet werden). Der  $U_{\text{Window}}$ -Wert dieser Konstruktion wurde mit  $1,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  angenommen, der g-Wert mit 0,53.

Die Eingabedaten für die Fenster wurden gemäß den Berechnungen der Vorsektion (Tabelle 8) für die Heizwärmebedarfsberechnungen (HWB) eingesetzt. Ausgehend von den Originalkistenfenster-U-Werten ( $U_{\text{Window}} = 2,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) ist eine Reduktion bis auf einen  $U_{\text{Window}}$ -Wert von unter  $1,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  möglich. Das mag nicht außerordentlich spektakulär wirken, allerdings dürfen diese sehr zarten modifizierten Kistenfenster auch nicht mit modernen 2- oder 3-Scheibenverglasung-Fenstern verglichen werden (andere Konstruktionsstärke, stärkere Rahmenprofile, optische Erhaltung der Originalerscheinung).



Tabelle 12 zeigt die erzielten Resultate für die drei Bauwerke für die verschiedenen Szenarien: Abhängig vom Verglasungsgrad und dem jeweiligen Szenario lassen sich bis zu 14% Reduktionen des Heizwärmebedarfs erzielen, was für eine singuläre Maßnahme (Fenstertausch) bereits sehr bemerkenswert ist.

Tabelle 12: Heizwärmebedarf (HWB) und prozentuelle Verbesserung (Reduktion) durch Applikation von Vakuumgläsern mit unterschiedlichen Rahmenkonstruktionsausführungen für die Gebäude Case 1, Case 2 und Case 3.

		Original	VIG-EXT	VIG-INT	VIG-EXT_impr	VIG-INT_impr	INS-INT
Case 1	HWB [kWh.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	162	148	148	147	148	149
Case 2		218	200	200	198	199	200
Case 3		142	123	123	122	122	124
Reduktion Case 1	%	-	8,3	8,3	8,9	8,6	8,0
Reduktion Case 2		-	8,5	8,5	9,0	8,8	8,2
Reduktion Case 3		-	13,1	13,2	14,0	13,7	12,8

### 3 Schlussfolgerungen

Die in diesem Bericht gezeigten Ergebnisse zeigen auf der einen Seite ein großes Potential des Vakuumglases, auf der anderen Seite werfen Sie zahlreiche weitere Fragen auf. Eine Sanierung des Gebäudebestands mit hocheffizienten Komponenten, welche (auf den ersten Blick) die Erscheinung des historischen Gebäudebestandes nicht (negativ) beeinflussen, erscheint natürlich sehr vielversprechend.

Bis zu einer breiteren Applikation, sind aber noch eine ganze Reihe von Fragen zu klären:

- Die Wärmebrückenproblematik im Fenster/Glas-Detailbereich ist eine kontrovers diskutierte Problematik unter ArchitektInnen, PlanerInnen und der Industrie. Es sind weitere Untersuchungen notwendig, die sich explizit dieser Materie annehmen. Hierzu ist es zu empfehlen long-term-monitoring bei typischen historischen Fensterkonstruktionen anzuwenden um den Effekt der Vakuumgläser (und eine unter Umständen stattfindende zerstörerische Einwirkung von auftretendem Kondensat) zu studieren. Es gibt durchaus Meinungen bei den interessierten Stakeholdern, die dieser Problematik kein Gewicht beimessen.
- Die Dichtungsproblematik und die Problematik, wo welcher Flügel wie zu sanieren ist, spielt durchaus eine große Rolle. Wie gezeigt ist eine Applikation außen von Vorteil, was im Kontrast zu gängigen Ansichten der Ausführenden Industrie steht. Hier wird sowohl Überzeugungsarbeit wie auch detailliertes Fortuntersuchen erforderlich sein.
- Die Life-Cycle-Beurteilung wird durch das Fehlen von Schlüsseldaten aus der Produktion auf der einen Seite, und durch die langen Transportwege auf der anderen Seite geprägt. Hier ist darüber nachzudenken, wie eine bessere LC-Performance zu erzielen wäre.
- Die mechanischen Untersuchungen haben in einigen Fällen dem Vakuumglas eine gute Performance bescheinigt, in anderen jedoch nicht. Hier ist sowohl von der Industrie, wie auch von Normen- und Richtlinien eine Anpassung und Berücksichtigung anzudenken.
- Schlussendlich muss gesagt werden, dass alle Performance-Aspekte wie in diesem Bericht gezeigt, darauf fußen, dass angenommen wird, dass das Vakuumglas über einen langen Zeitraum in der Lage ist, das Vakuum aufrecht zu erhalten. Dauerhaftigkeitsversuche sind entsprechend nachzuziehen um dies zu verifizieren bzw. zu falsifizieren (vor allem in Anbetracht der sehr langen Entwicklungsperiode von Vakuumglas, welche von zahlreichen Rückschlägen gekennzeichnet war).

## 4 Ausblick und Empfehlungen

Der vorliegende Report hat sich der Ergebnis-Dokumentation eines Projektes mit Fokus auf verschiedene Aspekte der Verwendung von Vakuumgläsern bzw. High-Performance-Gläsern für den (Alt-)Gebäudebestand gewidmet.

Das Projekt war eine Sondierung, die gewissermaßen die Tür für solche Verglasungstechnologien für Europa bzw. den deutschsprachigen Raum öffnen sollte. Die Ergebnisse zeigen das grundsätzlich hohe Potential der Vakuumgläser auf.

Nichts desto trotz gibt es zahlreiche Aspekte, denen in zukünftiger Forschung – und Entwicklung Augenmerk zu schenken ist:

- Gerade in der Sanierung ist es gewissermaßen eine wesentliche Verpflichtung sich der Vermeidung von Wärmebrücken zu widmen. Dazu ist eine weitere und konsequente Entwicklung von Verglasungsdetails erforderlich. Dies ist schwierig, da neben den bautechnisch-bauphysikalisch-hochbaukonstruktiven Belangen auch Aspekte der baukulturellen Erhaltung und Denkmalpflege zu berücksichtigen sind. Zu dieser Thematik hinzu kommen die von der Praxis unterschiedlich vertretenen Meinungen hinsichtlich Kondensat im Rahmenbereich: Es gibt Stimmen, die eine totale Vermeidung von Oberflächenkondensat als verpflichtend betrachten, während andere Stimmen meinen, dass eine entsprechende Anströmung, bzw. eine gewisse Toleranz von alten Fensterbeschlägen gegen Kondensatbildung vorherrscht. Hier ist auch der Einfluss von Dichtungssystemen kritisch zu sehen, welche – zur Erreichung von energetischen Einsparzielen mit Vakuumverglasungen – in der Sanierung kaum ausgespart werden können bzw. werden sollten. Hier wären dauerhafte Einbauten und ein exaktes Monitoring eine Option. Ein entsprechendes Projekt von den beiden Partnern des vorliegenden Projektes (Abteilung Bauphysik und Bauökologie, TU Wien, sowie Holzforschung Austria) mit einem Industriepartner ist in Vorbereitung.
- Die Entwicklung von neuen bzw. zeitgenössischen Fensterkonstruktionen die Vakuumglas verwenden. Hierzu wurde von der Abteilung Bauphysik und Bauökologie der TU Wien, sowie der Holzforschung Austria das Projekt MOTIVE (*Modellierung, Optimierung, und technische Integration von neuen Vakuumglas-Elementen*) gestartet. Hierbei geht es nicht bloß um die Integration von Vakuumglas-Elementen in bestehende / existierende technologische Rahmenkonzepte, sondern ein ganz neues Denken von transparenten Bauteilen für fortschrittliche und zeitgemäße Belichtung, Belüftung und offenbare Gebäudeteile.
- Dauerhaftigkeitstests und Alterungstests von Vakuumverglasungen. Es liegen relative wenige zuverlässige Informationen über die Dauerhaftigkeit der Vakuumglasprodukte vor. Darüber hinaus bestehen viele bautechnische Zulassungen und gesetzlich-normative Einpassungen in die Landschaft der zentraleuropäischen Produktrichtlinien und Bauvorschriften noch nicht. Hier werden weniger Bauphysiker und Hochbautechniker, als vielmehr Sachverständige und Juristen gefragt sein.



# 5 Verzeichnisse

## 5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: historische Entwicklung der Verglasungstechnologie in der westlichen Welt und Ihre „ungewisse“ Zukunft (Abbildung: Hohenstein). .....	27
Abbildung 2: Entwicklung der Low-E-Beschichtungen und unklare zukünftige Entwicklungen (Abbildung: Hohenstein). .....	28
Abbildung 3: Einfluss der Glasneigung auf das Konvektionsverhalten in Isoliergläsern (Abbildung: Hohenstein). .....	29
Abbildung 4: Pumpbewegungen bei mehreren Scheibenzwischenräumen (Abbildung: Hohenstein). .....	29
Abbildung 5: Ausschnitt Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt: Verglasungen mit Krypton-Füllung (Abbildung entnommen aus <a href="http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE">http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE</a> , abgerufen Nov. 2016). .....	30
Abbildung 6: Ausschnitt Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt: Verglasungen mit Argon-Füllung (Abbildung entnommen aus <a href="http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE">http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE</a> , abgerufen Nov. 2016). .....	31
Abbildung 7: Daten von iplus Advanced 1.0 – Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt (Abbildung entnommen aus <a href="http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE">http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE</a> , abgerufen Nov. 2016). .....	32
Abbildung 8: Daten von KlimaGuard Premium2 – Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt (Abbildung entnommen aus <a href="http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE">http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE</a> , abgerufen Nov. 2016). .....	32
Abbildung 9: Daten von SGG Planitherm Ultra N II – Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt (Abbildung entnommen aus <a href="http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE">http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE</a> , abgerufen Nov. 2016). .....	32
Abbildung 10: Systemschnitt des SGIC CLIMATOP LUX LIGHT Isolierglassystems (Abbildung entnommen aus <a href="http://www.glaswelt.de/GLASWELT-2014-1/3-fach-aber-leichter,QUIEPTU2OTYzNyZNSUQ9MTA0ODcw.html">www.glaswelt.de/GLASWELT-2014-1/3-fach-aber-leichter,QUIEPTU2OTYzNyZNSUQ9MTA0ODcw.html</a> ). .....	35
Abbildung 11: Folienisolierglas (Abbildung von der Fa. Minusdrei gmbh). .....	35
Abbildung 12: Systemschnitt des Randverbunds bei mehreren zwischengespannten Folien und den nach innen gezogenen Abstandhaltern [Abbildung entnommen aus <a href="http://www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx">www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx</a> ]. .....	37
Abbildung 13: Schnittdarstellungen von Mehrkammer-Isolierglas mit Heat Mirror-Folien [Abbildung entnommen aus <a href="http://www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx">www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx</a> ]. .....	37
Abbildung 14: THERMUR HM auf der Baumesse 2015 in München (Bau 2015; Abbildung von E. Heiduk / H.Hohenstein ). .....	38
Abbildung 15: Schnittbild mit 3 Heat Mirrow Folien (Abbildung von THERMUR HM). .....	38
Abbildung 16: Gegenüberstellung Heat-Mirrow-Glas und herkömmliches Dreischeibenisolierglas (Abbildung aus der Präsentation von S.E. Rösner / minusdrei gmbh / Fassadenbautagung 2015). .....	40
Abbildung 17, 18 und 19: Belastungstest Dünnglas (Abbildung: Fa. Lisecc). .....	41
Abbildung 20: Aufbau des MEM4WIN 4-fach Isolierglas (Abbildung: Fa. Lisecc). .....	42
Abbildung 21: Dreifach Vakuumglas-Konzept, Patent A. Zoller, 1913 (Zoller 1913). .....	43
Abbildung 22: Laser-verschweißtes Vakuumglaskonzept mit Glaskugeln als Stützkörper , US Patent 4683154 (Abbildung US-Patent 4683154). .....	44
Abbildung 23 (links): Richard E. Collins, Emeritus Professor, School of Physics, University of Sydney. ....	44
Abbildung 24 (rechts): Jian-Zheng Tang, Emeritus Professor, School of Physics, University of Beijing. ....	44
Abbildung 25 und 26: Patente für Evakuierungsventil und Abstandhalter für Richard Edward Collins und Jian-Zheng Tang [Entnommen aus <a href="https://www.google.com/patents/US6054195">https://www.google.com/patents/US6054195</a> und <a href="https://www.google.com/patents/US6071575">https://www.google.com/patents/US6071575</a> ]. .....	45
Abbildung 27: Prinzip-Darstellungen vom Vakuumglas Spacia [Abbildung aus <a href="http://www.nsg-spacia.co.jp/tech/index.html">www.nsg-spacia.co.jp/tech/index.html</a> ]. .....	46
Abbildung 28: Vakuumglasscheibe von NSG, Pilkington Spacia™ (Abbildung: NSG). .....	47

Abbildung 29: Werbesujet für Pilkington Spacia™ (Einfachscheibe mit Oberflächenkondensat, Vakuumglasscheibe ohne Kondensat. (Abbildung: <a href="http://www.sun-wind.jp/dannetsu-ketsuro">http://www.sun-wind.jp/dannetsu-ketsuro</a> ). ....	47
Abbildung 30: VG ohne Kondensat / Einfachscheibe mit Kondensat [ <a href="http://lixil-reformchain.jp/shop/SC00183004/case/016478.html">http://lixil-reformchain.jp/shop/SC00183004/case/016478.html</a> ]. ....	48
Abbildung 32 (links): Museum Hermitage Amsterdam (entnommen aus <a href="http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/Hermitage_Amsterdam_-_Ingang.JPG">http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/Hermitage_Amsterdam_-_Ingang.JPG</a> ). ....	48
Abbildung 31 (rechts): Einglasen der VG-Scheiben mit Kittfuge in die Bestandsrahmen (entnommen aus <a href="http://www.schildersvak.nl/download/i/09svk001z022.pdf">www.schildersvak.nl/download/i/09svk001z022.pdf</a> ). ....	48
Abbildung 33 und 34: Eingebaute VG-Scheiben in Bestandsrahmen (Abbildung: NSG Pilkington Spacia). ....	49
Abbildung 35, 36 und 37: Eingebaute VG-Scheiben in Bestandsrahmen (mit Ventil) (Abbildungen: <a href="http://www.brikbase.org/sites/default/files/best3_barry.pdf">www.brikbase.org/sites/default/files/best3_barry.pdf</a> ). ....	49
Abbildung 38: Prinzip und Komponenten von Vakuumglas (© ZAE Bayern, Würzburg). ....	50
Abbildung 39: Glaslot und Metallot – Randversiegelungen (© ZAE Bayern, Würzburg). ....	50
Abbildung 40: Produktionsschritte bei Vakuumglas mit Glaslot-Randversiegelung (eigene Abbildung, E. Heiduk / H. Hohenstein). ....	51
Abbildung 41: Wärmetransportvorgänge in VG (Abbildung: E. Heiduk / H. Hohenstein). ....	52
Abbildung 42, 43 und 44 (oben und unten links): Verschiedene Bestandteile einer SYNERGY Vakuumverglasung (Abbildungen: Fa. SYNERGY / E. Heiduk). ....	53
Abbildung 45 (unten rechts): Der patentierte Pillar von SYNERGY-Vakuumgläsern in einer starken Vergrößerung (SYNERGY). ....	53
Abbildung 46: Wärmetransport durch Pillars (Abbildung: Fa. SYNERGY). ....	54
Abbildung 47: Zusammenhang zwischen Pillar-Achsenabstand und Wärmetransport im SYNERGY-Vakuumglas. ....	54
Abbildung 48: Der Zusammenhang zwischen LowE-Beschichtung und Wärmeleitfähigkeit von VG (Fa. SYNERGY). ....	55
Abbildung 49: Der Zusammenhang der Wärmeleitung von Strahlung, Wärmeleitung von Pillar und U-Wert der jeweiligen Low-E-Vakuumverglasung (Fa. SYNERGY). ....	55
Abbildung 50: Wärmestrom in der Glaslot Randversiegelung (Eigene Abbildung E. Heiduk). ....	56
Abbildung 51: U-Werte, Isothermenbild und Wärmestrom in der Glaslot-Randversiegelung (Eigene Abbildung E. Heiduk). ....	56
Abbildung 52: Thermografiebild einer Vakuumglas-Scheibe [Fa. Synergy]. ....	56
Abbildung 53: Berechnungsformeln zur Berechnung des Wärmetransports durch den Glasrandverbund (Fa. Synergy). ....	57
Abbildung 54: Zusammenhang zwischen Breite Randverbund, Einstandstiefe und U-Wert (Fa. Synergy). ....	57
Abbildung 55: Darstellung der relevanten Einstandstiefe VG im Fensterrahmen (Eigene Abbildung E. Heiduk). ....	58
Abbildung 56: Ergebnis thermischer Stresstests für VG im Prüflabor des ZAE Würzburg (Darstellung ZAE Würzburg). ....	59
Abbildung 57: Glasbewegungen bei Isoliergläsern und Vakuumgläsern (Abbildung H. Hohenstein). ....	61
Abbildung 58 (links) und 59 (rechts): Vakuumglasscheibe Pilkington Spacia™ sowie Aufnahme mit Evakuierungsventil (Abbildungen: NSG). ....	62
Abbildung 60: Vakuumscheibe der Fa. EAGON (EAGON). ....	62
Abbildung 61: Vakuumglas (VG) in vielen Kombinationen mit Isolierglas (VIG) [ <a href="http://www.tjskl.org.cn/images/czae8e51-pz2702078-vacuum_insulating_glass.html">http://www.tjskl.org.cn/images/czae8e51-pz2702078-vacuum_insulating_glass.html</a> ]. ....	63
Abbildung 62: Ein Probestück Vakuumglas (VG) von Hengda [ <a href="http://www.tjskl.org.cn/images/czae8e51-pz2702078-vacuum_insulating_glass.html">http://www.tjskl.org.cn/images/czae8e51-pz2702078-vacuum_insulating_glass.html</a> ]. ....	64
Abbildung 63: Impressionen der Produktionsanlage der Fa. SYNERGY (SYNERGY). ....	64
Abbildung 64: Evakuierungsöfen der Fa. Synergy (SYNERGY). ....	65
Abbildung 65: Technische Weiterentwicklungen bei der Fa. SYNERGY (SYNERGY). ....	66
Abbildung 66: Ausgeführte Projekte mit Vakuumglas #1 (Abbildung: H. Hohenstein). ....	67
Abbildung 67: Ausgeführte Projekte mit Vakuumglas #2 (Abbildung: H. Hohenstein). ....	68
Abbildung 68: Ausgeführten Objekte mit Vakuumglas – Aktiv-Plus-Testhaus Stuttgart (Abbildung aus <a href="http://derstandard.at/2000004153602/Ein-Haus-als-Gast-in-der-Siedlung">http://derstandard.at/2000004153602/Ein-Haus-als-Gast-in-der-Siedlung</a> ). ....	68
Abbildung 69: Kennzahlen des verwendeten Vakuumglases im Aktiv-Plus Testhaus B10 in Stuttgart (Abbildung <a href="http://www.aktivhaus-b10.de/home/">www.aktivhaus-b10.de/home/</a> ). ....	69

Abbildung 70: Geplante Objekte mit Vakuumglas – Testhaus VISIONEUM ENERGIE+ Königsbrunn bei Augsburg (Hochschule Augsburg).....	69
Abbildung 71 und 72: Fassadensystem mit Vakuumglas – Fa. Raico (eigene Aufnahmen E. Heiduk).....	70
Abbildung 73: Bau 2015 – Verbesserung eines alten Bestandsfensters mit Vakuumglas, Prof. A. Rogall / FH Dortmund (eigene Aufnahmen E. Heiduk).....	70
Abbildung 74 und 75: Vertikale Belastung eines „stehenden“ Testflügels (Racking gemäß ÖNORM EN 14608) (Aufnahmen: Holzforschung Austria).....	75
Abbildung 76 und 77: Horizontale Verwindung eines Testflügels (statische Verwindung gemäß ÖNORM EN 14609) (Aufnahmen: Holzforschung Austria).....	75
Abbildung 78 und 79: Stoßbelastung von Vakuumglas und Floatglas (gemäß ÖNORM EN 13049) (Aufnahmen: Holzforschung Austria).....	76
Abbildung 80: Maximale Verformung während Belastung von 400 N (Flügel stehend).....	78
Abbildung 81: Maximale Verformung während Belastung von 600 N (Flügel stehend).....	78
Abbildung 82: Maximale Verformung während Belastung von 250 N - RECHTS (Flügel stehend).....	79
Abbildung 83: Maximale Verformung während Belastung von 250 N - LINKS (Flügel stehend).....	79
Abbildung 84: Maximale Fallhöhe des Bendels ohne Bruch des Vakuumglases (gegen Glasfalzanschlag geprüft).....	80
Abbildung 85: Untersuchung des Einflusses der Pillar auf Simulationsergebnisse.....	81
Abbildung 86 und 87: Aufbau und Durchführung Klimauntersuchung mit Messfühler direkt auf Glasoberfläche.....	84
Abbildung 88: Mock-Up-Schema mit Positionen der Messfühleranordnung.....	85
Abbildung 89 und 90: Kondensat im Randbereich des Vakuumglases an der Rauminnenseite und Eisbildung am Floatglas des äußeren Fensterflügels.....	85
Abbildung 91: Thermographie eines klassischen Kastenfensters mit Vakuumglas.....	87
Abbildung 92: Treibhauspotential in kg CO <sub>2</sub> eq. durch die Herstellung (Phase A1-A3) von WSG nach Komponenten. Die Abschätzung des Treibhauspotentials der Herstellung des VG ist in grün eingetragen (eigene Darstellung).....	88
Abbildung 93: Fassade Case 1.....	90
Abbildung 94: Fassade Case 2.....	90
Abbildung 95: Fassade Case 3.....	90
Abbildung 96: Grundrissplan Case 1.....	91
Abbildung 97: Grundrissplan Case 2.....	91
Abbildung 98: Grundrissplan Case 3.....	91

In folgender Tabelle 13 finden sich alle in diesem Report verwendeten Abbildungen inklusive Capture-Text und Bildquelle wieder.

Tabelle 13: Abbildungen inklusive Quellen

Nr.	Capture Text	Bildquelle
1	historische Entwicklung der Verglasungstechnologie in der westlichen Welt und Ihre „ungewisse“ Zukunft (Abbildung: Hohenstein)	H. Hohenstein / E.Heiduk
2	Entwicklung der Low-E-Beschichtungen und unklare zukünftige Entwicklungen	H.Hohenstein / E.Heiduk
3	Einfluss der Glasneigung auf das Konvektionsverhalten in Isoliergläsern.	H.Hohenstein / E. Heiduk
4	Pumpbewegungen bei mehreren Scheibenzwischenräumen	H. Hohenstein / E.Heiduk
5	Ausschnitt Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt: Verglasungen mit Krypton-Füllung	Abbildung entnommen aus <a href="http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE">http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE</a> , abgerufen Nov. 2016
6	Ausschnitt Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt: Verglasungen mit Argon-Füllung	Abbildung entnommen aus <a href="http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE">http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE</a> , abgerufen Nov. 2016

Nr.	Capture Text	Bildquelle
7	Daten von iplus Advanced 1.0 – Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt	Abbildung entnommen aus <a href="http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE">http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE</a> , abgerufen Nov. 2016
8	Daten von ClimaGuard Premium2 – Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt	Abbildung entnommen aus <a href="http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE">http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE</a> , abgerufen Nov. 2016
9	Daten von SGG Planitherm Ultra N II – Komponentendatenbank, Passivhausinstitut Darmstadt	Abbildung entnommen aus <a href="http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE">http://passiv.de/komponentendatenbank/de-DE</a> , abgerufen Nov. 2016
10	Systemschnitt des SGIC CLIMATOP LUX LIGHT Isolierglassystems	Abbildung entnommen aus <a href="http://www.glaswelt.de/GLASWELT-2014-1/3-fach-aber-leichter,QUIEPTU2OTYzNyZNSUQ9MTA00Dcw.html">www.glaswelt.de/GLASWELT-2014-1/3-fach-aber-leichter,QUIEPTU2OTYzNyZNSUQ9MTA00Dcw.html</a> ; letztmalig abgerufen Nov. 2016
11	Folienisolierglas	Abbildung von der Fa. Minusdrei gmbh
12	Systemschnitt des Randverbunds bei mehreren zwischengespannten Folien und den nach innen gezogenen Abstandhaltern	Abbildung entnommen aus <a href="http://www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx">www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx</a>
13	Schnittdarstellungen von Mehrkammer-Isolierglas mit Heat Mirror-Folien	Abbildung entnommen aus <a href="http://www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx">www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx</a>
14	THERMUR HM auf der Baumesse 2015 in München	(Bau 2015; Abbildung von E. Heiduk / H.Hohenstein )
15	Schnittbild mit 3 Heat Mirrow Folien	Abbildung von THERMUR HM
16	Gegenüberstellung Heat-Mirror-Glas und herkömmliches Dreischeibenisolierglas	(Abbildung aus der Präsentation von S.E. Rösner / minusdrei gmbh / Fassadenbautagung 2015).
17	Belastungstest Dünnglas	Fa. Lisec
18	Belastungstest Dünnglas	Fa. Lisec
19	Belastungstest Dünnglas	Fa. Lisec
20	Aufbau des MEM4WIN 4-fach Isolierglas	Fa. Lisec
21	Dreifach Vakuumglas-Konzept, Patent A. Zoller, 1913	Zoller 1913
22	Laser-verschweißtes Vakuumglaskonzept mit Glaskugeln als Stützkörper , US Patent 4683154	(Abbildung US-Patent 4683154)
23	Richard E. Collins, Emeritus Professor, School of Physics, University of Sydney	<a href="http://www.nsg-spacia.co.jp/spacia/">http://www.nsg-spacia.co.jp/spacia/</a>
24	Jian-Zheng Tang, Emeritus Professor, School of Physics, University of Beijing	<a href="http://www.nsg-spacia.co.jp/spacia/">http://www.nsg-spacia.co.jp/spacia/</a>
25	Patente für Evakuierungsventil und Abstandhalter für Richard Edward Collins und Jian-Zheng Tang	<a href="https://www.google.com/patents/US6054195">https://www.google.com/patents/US6054195</a>
26	Patente für Evakuierungsventil und Abstandhalter für Richard Edward Collins und Jian-Zheng Tang	<a href="https://www.google.com/patents/US6071575">https://www.google.com/patents/US6071575</a>
27	Prinzip-Darstellungen vom Vakuumglas Spacia	Abbildung aus <a href="http://www.nsg-spacia.co.jp/tech/index.html">www.nsg-spacia.co.jp/tech/index.html</a>
28	Vakuumglasscheibe von NSG, Pilkington Spacia™	Abbildung: NSG
29	Werbesujet für Pilkington Spacia™ (Einfachscheibe mit Oberflächenkondensat, Vakuumglasscheibe ohne Kondensat.	Abbildung: <a href="http://www.sun-wind.jp/dannetsu-ketsuro">http://www.sun-wind.jp/dannetsu-ketsuro</a>
30	VG ohne Kondensat / Einfachscheibe mit Kondensat	<a href="http://lilixil-reformchain.jp/shop/SC00183004/case/016478.html">http://lilixil-reformchain.jp/shop/SC00183004/case/016478.html</a>
31	Museum Hermitage Amsterdam	entnommen aus <a href="http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/Hermitage_Amsterdam_-_Ingang.JPG">http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/Hermitage_Amsterdam_-_Ingang.JPG</a>
32	Einglasen der VG-Scheiben mit Kittfuge in die Bestandsrahmen	entnommen aus <a href="http://www.schildersvak.nl/download/i/09svk001z022.pdf">www.schildersvak.nl/download/i/09svk001z022.pdf</a>
33	Eingebaute VG-Scheiben in Bestandsrahmen	Abbildung: NSG Pilkington Spacia
34	Eingebaute VG-Scheiben in Bestandsrahmen	Abbildung: NSG Pilkington Spacia
35	Eingebaute VG-Scheiben in Bestandsrahmen (mit Ventil)	<a href="http://www.brikbase.org/sites/default/files/best3_barry.pdf">www.brikbase.org/sites/default/files/best3_barry.pdf</a>
36	Eingebaute VG-Scheiben in Bestandsrahmen (mit Ventil)	<a href="http://www.brikbase.org/sites/default/files/best3_barry.pdf">www.brikbase.org/sites/default/files/best3_barry.pdf</a>
37	Eingebaute VG-Scheiben in Bestandsrahmen (mit Ventil)	<a href="http://www.brikbase.org/sites/default/files/best3_barry.pdf">www.brikbase.org/sites/default/files/best3_barry.pdf</a>
38	Prinzip und Komponenten von Vakuumglas	(© ZAE Bayern, Würzburg)
39	Glaslot und Metalllot – Randversiegelungen	(© ZAE Bayern, Würzburg)
40	Produktionsschritte bei Vakuumglas mit Glaslot-Randversiegelung	(eigene Abbildung, E. Heiduk / H. Hohenstein)
41	Wärmetransportvorgänge in VG	(Abbildung: E. Heiduk / H. Hohenstein)
42	Verschiedene Bestandteile einer SYNERGY Vakuumverglasung	Abbildungen: Fa. SYNERGY / E. Heiduk
43	Verschiedene Bestandteile einer SYNERGY Vakuumverglasung	Abbildungen: Fa. SYNERGY / E. Heiduk



Nr.	Capture Text	Bildquelle
44	Verschiedene Bestandteile einer SYNERGY Vakuumverglasung	Abbildungen: Fa. SYNERGY / E. Heiduk
45	Der patentierte Pillar von SYNERGY-Vakuumgläsern in einer starken Vergrößerung	SYNERGY
46	Wärmetransport durch Pillars	Abbildung: Fa. SYNERGY
47	Zusammenhang zwischen Pillar-Achsabstand und Wärmetransport im SYNERGY-Vakuumglas.	Fa. SYNERGY
48	Der Zusammenhang zwischen LowE-Beschichtung und Wärmeleitfähigkeit von	Fa. SYNERGY
49	Der Zusammenhang der Wärmeleitung von Strahlung, Wärmeleitung von Pillar und U-Wert der jeweiligen Low-E-Vakuumverglasung	Fa. SYNERGY
50	Wärmestrom in der Glaslot Randversiegelung	Eigene Abbildung E. Heiduk
51	U-Werte, Isothermenbild und Wärmestrom in der Glaslot-Randversiegelung	Eigene Abbildung E. Heiduk
52	Thermografiebild einer Vakuumglas-Scheibe	Fa. Synergy
53	Berechnungsformeln zur Berechnung des Wärmetransports durch den Glasrandverbund	Fa. Synergy
54	Zusammenhang zwischen Breite Randverbund, Einstandstiefe und U-Wert	Fa. Synergy
55	Darstellung der relevanten Einstandstiefe VG im Fensterrahmen	Eigene Abbildung E. Heiduk
56	Ergebnis thermischer Stresstests für VG im Prüflabor des ZAE Würzburg	Darstellung ZAE Würzburg
57	Glasbewegungen bei Isoliergläsern und Vakuumgläsern	(Abbildung H. Hohenstein)
58	Vakuumglasscheibe Pilkington Spacia™ sowie Aufnahme mit Evakuierungsventil	(Abbildungen: NSG)
59	Vakuumglasscheibe Pilkington Spacia™ sowie Aufnahme mit Evakuierungsventil	(Abbildungen: NSG)
60	Vakuumscheibe der Fa. EAGON	(EAGON)
61	Vakuumglas (VG) in vielen Kombinationen mit Isolierglas (VIG)	<a href="http://www.tjskl.org.cn/images/czae8e51-pz2702078-vacuum_insulating_glass.html">http://www.tjskl.org.cn/images/czae8e51-pz2702078-vacuum_insulating_glass.html</a>
62	Ein Probestück Vakuumglas (VG) von Hengda	Hengda [ <a href="http://www.tjskl.org.cn/images/czae8e51-pz2702078-vacuum_insulating_glass.html">http://www.tjskl.org.cn/images/czae8e51-pz2702078-vacuum_insulating_glass.html</a> ]
63	Impressionen der Produktionsanlage der Fa. SYNERGY	(SYNERGY)
64	Evakuierungsöfen der Fa. Synergy	(SYNERGY)
65	Technische Weiterentwicklungen bei der Fa. SYNERGY	(SYNERGY)
66	Ausgeführte Projekte mit Vakuumglas #1	(Abbildung: H. Hohenstein)
67	Ausgeführte Projekte mit Vakuumglas #2	(Abbildung: H. Hohenstein)
68	Ausgeführten Objekte mit Vakuumglas – Aktiv-Plus-Testhaus Stuttgart	<a href="http://derstandard.at/2000004153602/Ein-Haus-als-Gast-in-der-Siedlung">http://derstandard.at/2000004153602/Ein-Haus-als-Gast-in-der-Siedlung</a>
69	Kennzahlen des verwendeten Vakuumglases im Aktiv-Plus Testhaus B10 in Stuttgart	(Abbildung <a href="http://www.aktivhaus-b10.de/home/">www.aktivhaus-b10.de/home/</a> )
70	Geplante Objekte mit Vakuumglas – Testhaus VISIONEUM ENERGIE+ Königsbrunn bei Augsburg	Hochschule Augsburg
71	Fassadensystem mit Vakuumglas – Fa. Raico	(eigene Aufnahmen E. Heiduk)
72	Fassadensystem mit Vakuumglas – Fa. Raico	(eigene Aufnahmen E. Heiduk)
73	Bau 2015 – Verbesserung eines alten Bestandsfensters mit Vakuumglas, Prof. A. Rogall / FH Dortmund	(eigene Aufnahmen E. Heiduk)
74	Vertikale Belastung eines „stehenden“ Testflügels (Racking gemäß ÖNORM EN 14608)	HFA / eigene Darstellung
75	Vertikale Belastung eines „stehenden“ Testflügels (Racking gemäß ÖNORM EN 14608)	HFA / eigene Darstellung
76	Horizontale Verwindung eines Testflügels (statische Verwindung gemäß ÖNORM EN 14609) (Aufnahmen: Holzforschung Austria)	HFA / eigene Darstellung
77	Horizontale Verwindung eines Testflügels (statische Verwindung gemäß ÖNORM EN 14609) (Aufnahmen: Holzforschung Austria)	HFA / eigene Darstellung
78	Stoßbelastung von Vakuumglas und Floatglas (gemäß ÖNORM EN 13049) (Aufnahmen: Holzforschung Austria)	HFA / eigene Darstellung
79	Stoßbelastung von Vakuumglas und Floatglas (gemäß ÖNORM EN 13049) (Aufnahmen: Holzforschung Austria)	HFA / eigene Darstellung

Nr.	Capture Text	Bildquelle
80	Maximale Verformung während Belastung von 400 N (Flügel stehend)	HFA / eigene Darstellung
81	Maximale Verformung während Belastung von 600 N (Flügel stehend)	HFA / eigene Darstellung
82	Maximale Verformung während Belastung von 250 N - RECHTS (Flügel stehend)	HFA / eigene Darstellung
83	Maximale Verformung während Belastung von 250 N - LINKS (Flügel stehend)	HFA / eigene Darstellung
84	Maximale Fallhöhe des Bendels ohne Bruch des Vakuumglases (gegen Glasfalzanschlag geprüft)	HFA / eigene Darstellung
85	Untersuchung des Einflusses der Pillar auf Simulationsergebnisse.	Eigene Abbildung / eigene Darstellung
86	Aufbau und Durchführung Klimauntersuchung mit Messfühler direkt auf Glasoberfläche	Eigene Abbildung / Eigenes Photo
87	Aufbau und Durchführung Klimauntersuchung mit Messfühler direkt auf Glasoberfläche	Eigene Abbildung / Eigenes Photo
88	Mock-Up-Schema mit Positionen der Messfühleranordnung	Eigene Darstellung
89	Kondensat im Randbereich des Vakuumglas an der Rauminnenseite und Eisbildung am Floatglas des äußeren Fensterflügels	Eigene Abbildung / Eigenes Photo
90	Kondensat im Randbereich des Vakuumglas an der Rauminnenseite und Eisbildung am Floatglas des äußeren Fensterflügels	Eigene Abbildung / Eigenes Photo
91	Thermographie eines klassischen Kastenfensters mit Vakuumglas	Eigene Darstellung
92	Treibhauspotential in kg CO <sub>2</sub> eq. durch die Herstellung (Phase A1-A3) von WSG nach Komponenten. Die Abschätzung des Treibhauspotentials der Herstellung des VG ist in grün eingetragen	Eigene Darstellung
93	Fassade Case 1	Eigene Abbildung / Eigenes Photo
94	Fassade Case 2	Eigene Abbildung / Eigenes Photo
95	Fassade Case 3	Eigene Abbildung / Eigenes Photo
96	Grundrissplan Case 1	Plandokument (Wiener Baupolizei/ Einsichtnahme)
97	Grundrissplan Case 2	Plandokument (Wiener Baupolizei/ Einsichtnahme)
98	Grundrissplan Case 3	Plandokument (Wiener Baupolizei/ Einsichtnahme)

## 5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Heat-Mirror® Isolierglas: Vergleichstabelle (basierend auf www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx).....	37
Tabelle 2: Daten der THERMUR HM Verglasungsprodukte (Zahlen lt. Minusdrei gmbh) .....	39
Tabelle 3: Historischer Überblick über die Entwicklung von Vakuumgläsern .....	45
Tabelle 4: Vor- und Nachteile von Vakuumgläsern.....	60
Tabelle 5: Eigenschaften der unterschiedlichen NSG Produkte .....	61
Tabelle 6: Eigenschaften der EAGON Vakuumglasscheibe .....	62
Tabelle 7: Verfügbare Vakuumgläser Fa. Synergy .....	65
Tabelle 8: Probenübersicht mechanische Untersuchung .....	77
Tabelle 9: Probenübersicht Klimauntersuchung .....	84
Tabelle 10: Ergebnisse verschiedener Varianten der Klimauntersuchung .....	86
Tabelle 11: Fensteranteil Fassade, Fensterfläche, Bruttogeschossfläche und Bruttovolumen von Case 1, Case 2, Case 3. ....	91
Tabelle 12: Heizwärmebedarf (HWB) und prozentuelle Verbesserung (Reduktion) durch Applikation von Vakuumgläsern mit unterschiedlichen Rahmenkonstruktionsausführungen für die Gebäude Case 1, Case 2 und Case 3. ....	92
Tabelle 13: Abbildungen inklusive Quellen .....	98

## 5.3 Literaturverzeichnis

### 5.3.1 Verwendete Ressourcen

Antherm (nn). Numerische Wärmebrückensimulationssoftware(verwendet: V. 7)  
([www.antherm.eu](http://www.antherm.eu))

Archiphysik (nn). Energieausweisprogram (verwendet: v. 12.) ([www.archiphysik.com](http://www.archiphysik.com))

DIN EN ISO 10077 – 1 & 2 (Mai 2010): Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen (EN ISO 10077:2006 + Corr.:2009).

DIN EN ISO 10211: 2008 – Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen (ISO 10211:2007)

DIN EN ISO 13789: 2008 – Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 13789: 2007)

DIN EN ISO 13790:2008 – Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008)

OIB Richtlinie 6 (2007, 2011, 2015): Energieeinsparung & Wärmeschutz (plus Leitfaden: Energietechnisches Verhalten von Gebäuden). Österreichisches Institut für Bautechnik ([www.oib.or.at](http://www.oib.or.at))

ÖNORM B 8110 (Normenreihe, Teile 1 – 7): Wärmeschutz im Hochbau (verschiedene Jahre)

ÖNORM EN 14608:2004-09, Fenster – Ermittlung der Widerstandsfähigkeit gegen Lasten in der Flügelebene (Racking)

ÖNORM EN 14609:2004-09, Fenster – Ermittlung der Widerstandsfähigkeit gegen statische Verwindung

ÖNORM EN 13049:2003-06, Fenster – Belastung mit einem weichen, Schweren Stoßkörper – Prüfverfahren, Sicherheitsanforderungen und Klassifizierung

ÖNORM EN 6946:2008, Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007)

PHI Darmstadt, n.d. Komponentendatenbank des Passivhausinstituts Darmstadt. Erreichbar via [www.passiv.de](http://www.passiv.de) (letztmalig abgerufen im November 2016).

Window (nn), Teil des Energy-Plus Simulationspakets, Department of Energy, USA (vgl.: <http://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/engineering-reference/page-043.html>)

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

### 5.3.2 Eigene Publikationen im Rahmen dieses Projektes

Pont, U., Proskurnina, O., Mahdavi, A. 2017. *Das Potential von Vakuumgläsern für Bestand und Neubau; Empirische, messtechnische und simulationsgestützte Annäherung an entsprechende Architekturdetaillierung*. In „Querschnitt – Publikation zum Forschungstag 2016/17 der Fakultät für Architektur und Raumplanungen“ in der Reihe Wegweisungen (Nr. 19). TU Wien, Fakultät f. Architektur und Raumplanung (Hrsg.), ISBN 978-3-902707-32-1

Pont, U; Mahdavi, A. 2015: *Innovative Baustoffe, Bausysteme und Informationstechnologien für die Gebäudesanierung*; Vortrag: Wirtschaftsimpulse durch Forschung: Das A&O der Sanierung: Adaptierung und Optimierung vom Gebäudebestand, Wirtschaftskammer Wien, Stubenring 8-10, 1010 Wien (eingeladen); 14.04.2015.

Heiduk, E., Mahdavi, A., Pont, U., Schuss, M., Sustr C., Proskurnina, O., Schober, P., Pichler, H., Hohenstein H.: *High-Tech für die sanfte Gebäudesanierung - Untersuchung von Vakuumgläsern zur Fenstermodernisierung*" Poster: ÖkoSan 15, Graz; 17.06.2015 - 19.06.2015.

Heiduk, E., Mahdavi, A., Pont, U., Schuss, M., Proskurnina, O., Schober, P., Pichler, H., Hohenstein, H. : *Wie kommt das Vakuum ins Glas ?*Vortrag: Fenster-Türen-Treff 2015, Salzburg (eingeladen); 05.03.2015 - 06.03.2015.

Schober, P., Pichler H., Heiduk, E., Mahdavi, A., Pont, U., Schuss, M., Sustr, C., Proskurnina, O., Hohenstein. H.: *Fortschrittsbericht Projekt - VIG-SYS-RENO: Arbeitspaket 4.*; Vortrag: Fortschrittsbericht Projekt VIG-SYS-RENO, Wien; 15.06.2015.

Proskurnina, O., Sustr, C., Pont, U., Schuss, M., Mahdavi A., Heiduk, E., Schober, P., Pichler, H., Hohenstein, H.: *Fortschrittsbericht Projekt - VIG-SYS-RENO: Simulation*; Vortrag: Fortschrittsbericht Projekt VIG-SYS-RENO, Wien; 15.06.2015.

Heiduk, E. , Mahdavi, A., Pont, U., Schuss, M., Sustr, C., Proskurnina, O., Schober, P. Pichler, H., Hohenstein, H. : *Fortschrittsbericht Projekt - VIG-SYS-RENO: Umfeld, Entwicklungsstand, Verfügbarkeit und Anwendungspotential von Vakuumglas*; Vortrag: Fortschrittsbericht Projekt VIG-SYS-RENO, Wien; 15.06.2015.

Proskurnina, O., Pont, U., Schuss, M., Sustr, C., Heiduk, E., Schober, P., Mahdavi, A.: *High-tech solutions for building retrofit: investigation of window systems with vacuum glazing*; Vortrag: envibuild 2015 - 10th International Conference Buildings & Environment 2015, Bratislava, Slowakei; 15.10.2015 - 16.10.2015; in: "Proceedings of the 10th International Conference on Building & Environment", J. Hraska, M. Kalousek et al. (Hrg.); STU Bratislava - Eigenverlag, (2015), 8 S.

Heiduk, E., Pont, U., Schober, P., Pichler, H., Dolezal, F., Proskurnina, O., Schuss, M., Tahmasebi, F., Sustr, C., Hohenstein, H., Mahdavi, A.: *Endbericht VIG-SYS-RENO - Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung*; Bericht für FFG - Programm Stadt der Zukunft; Berichts-Nr. Endbericht, 2015; 54 S.

Proskurnina, O., Pont, U., Heiduk, E., Schuss, M., Sustr, C., Mahdavi, A., Schober, P., Pichler, H., Hohenstein, H.: *High-tech solutions for building retrofit: investigation of window systems with vacuum glazing*; Vortrag: Current Topics in Building Performance WinterTerm 2015/2016, Wien; 09.10.2015 - 22.01.2016.

Mahdavi, A., Schober, P., Pont, U., Proskurnina, O.: *VIG-SYS-RENO - Vakuumglas in der Anwendung - Forschungsergebnisse und Ausblick*; Hauptvortrag: Fenster-Türen-Treff 2016, Saalfelden (eingeladen); 03.03.2016 - 04.03.2016; in: "Fenster-Türen-Treff 2016", P. Schober, Holzforschung Austria et al. (Hrg.); (2016), S. 66 - 82.

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

Heiduk, E., Mahdavi, A., Pont, U., Schuss, M., Sustr, C., Proskurnina, O., Schober, P., Pichler, H., Dolezal, F., Hohenstein, H.: *Investigation of Vacuum Glazing in existing window systems*; Poster: Central Europe towards Sustainable Building 2016 - Innovations for sustainable Future, Prague, Czech Republic; 22.06.2016 - 24.06.2016; in: "Proceedings of CESB2016 - Central Europe towards Sustainable Building 2016 - Innovations for Sustainable Building 2016", P. Hájek, J. Tywoniak, A. Lupisek et al. (Hrg.); CESB16 - Eigenverlag der CESB2016, (2016), ISBN: 9788027102488; S. 125 - 130.

Proskurnina, O., Pont, U., Schuss, M., Heiduk, E., Schober, P., Mahdavi, A.: *A computational inquiry into the application of vacuum glazing in building retrofit*; Poster: Vienna Young Scientists Symposium 2016, Vienna; 09.06.2016 - 10.06.2016; in: "Proceedings of Vienna Young Scientists Symposium 2016", B. Ullmann et al. (Hrg.); (2016), ISBN: 978-3-9504017-2-1 Titel anhand dieser ISBN in Citavi-Projekt übernehmen; S. 26 - 27.

Heiduk, E., Mahdavi, A., Pont, U., Schuss, M., Sustr, C., Proskurnina, O., Schober, P., Pichler, H., Dolezal, F., Hohenstein, H.: *Investigation of Vacuum Glazing in existing window systems*; in: "Proceedings of CESB2016 - Central Europe towards Sustainable Building 2016 - Innovations for Sustainable Building 2016", Book of (extended) abstracts; P. Hájek, J. Tywoniak, A. Lupisek et al. (Hrg.); herausgegeben von: CTUP - Czech Technical University Prague; CESB16 - Eigenverlag der CESB2016, CESB16 - Eigenverlag der CESB16, 2016, ISBN: 9788027102488 Titel anhand dieser ISBN in Citavi-Projekt übernehmen, S. 51 - 52.

Pont, U., Heiduk, E., Mahdavi, A.: *VIG-SYS-RENO-Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern zur Gebäudesanierung*; in: "Stadt der Zukunft: Intelligente Energielösungen für Gebäude und Städte", BMVIT (Hrg.); herausgegeben von: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie; Stadt der Zukunft - Intelligente Energielösungen für Gebäude und Städte, 2014, S. 65 - 66.

Heiduk, E., Pont, U., Schober, P., Hohenstein, H., Rubick, A., Mahdavi, A.: *Projektbeschreibung für Förderansuchen: VIG-SYS-RENO* ;Bericht für FFG - 1. Ausschreibung Stadt der Zukunft; Berichts-Nr. 1, 2014; 69 S.

Pont, U., A. Mahdavi, A.: *Innovative Baustoffe, Bausysteme und Informationstechnologien für die Gebäudesanierung*; in: "Wirtschaftsimpulse durch Forschung", herausgegeben von: TU Wien & WKO Wien; Eigenverlag TU Wien / Forschungs- & Transfersupport E0154 / Wirtschaftskammer Wien, Wien, 2015, (eingeladen), 7 S.

Hohenstein, H., Heiduk, E., Pont, U., Mahdavi, A.: *Anhang 1 zum Endbericht VIG-SYS-RENO (Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung) - Literatur-, Markt- und Hintergrundrecherche für innovative Vergasungslösungen mit Fokus auf Vakuumverglasungen (VG) und aller für das Projekt relevanten Themenbereiche* ;Bericht für FFG - Programm Stadt der Zukunft; Berichts-Nr. Anhang 1 zum Endbericht, 2015; 62 S.

Hohenstein, H., Heiduk, E., Pont, U., Mahdavi, A.: *Anhang 2 zum Endbericht VIG-SYS-RENO (Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung) - Ermittlung des Verbesserungspotentials für die Bauteilenergiebilanz durch den Einsatz von VG und VIG für die Fenstermodernisierung*; Bericht für FFG - Programm Stadt der Zukunft; Berichts-Nr. Anhang 2 zum Endbericht, 2015; 23 S.

Hohenstein, H., Heiduk, E., Pont, U., Mahdavi, A.: *Anhang 3 zum Endbericht VIG-SYS-RENO (Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung) - Thermische Simulationsrechnungen für den Einbau von Vakuumglas in historische Bestandsfenster für die sanfte Fenstermodernisierung* ; Bericht für FFG - Programm Stadt der Zukunft; Berichts-Nr. Anhang 3 zum Endbericht, 2015; 22 S.

Hohenstein, H., Heiduk, E., Pont, U., Mahdavi, A.: *Anhang 4 zum Endbericht VIG-SYS-RENO (Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung) - Ermittlung des Verbesserungspotentials in der Gebäudeenergiebilanz durch den Einsatz von VG und VIG für die Gebäudemodernisierung*; Bericht für FFG - Programm Stadt der Zukunft; Berichts-Nr. Anhang 4 zum Endbericht, 2015; 40 S.

Pont, U., Mahdavi, A.: *A comparison of the performance of two- and three-dimensional thermal bridge assessment for typical construction joints*; Vortrag: Building Simulation Applications - 3rd IBPSA-Italy Conference Bozen-Bolzano 8.2.17 - 10.2.17, Bozen, Italien; 08.02.2017 - 10.02.2017; 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.

## 6 Anhang

**Anhang 1:** ANHANG 1 des veröffentlichbaren Endreports - (Autor: E. Heiduk) - Ermittlung des Verbesserungspotenzials für die Bauteilenergiebilanz durch den Einsatz von VG und VIG für die Fenstermodernisierung

**Anhang 2:** ANHANG 2 des veröffentlichbaren Endberichts- (Verfasser: E. Heiduk) - Thermische Simulationsrechnungen für den Einbau von Vakuumglas in historische Bestandsfenster für die sanfte Fenstermodernisierung

**Anhang 3:** ANHANG 4 (Verfasser: E. Heiduk, R. Vallentin) Ermittlung des Verbesserungspotenzials in der Gebäudeenergiebilanz durch den Einsatz von VG und VIG für die Gebäudemodernisierung


### Weitere Literatur

Konferenzpaper / Proceedings CESP/B / BauSIM 2016  
14 – 16.09.2016, Dresden, Deutschland.

THE PERFORMANCE OF VACUUM GLAZING IN EXISTING WINDOW CONSTRUCTIONS:  
A CASE STUDY

O. Proskurnina, U. Pont, and A. Mahdavi  
Department of Building Physics and Building Ecology  
TU Wien, Vienna, Austria,  
S.435-440





**Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie**  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien  
[bmvit.gv.at](https://www.bmvit.gv.at)