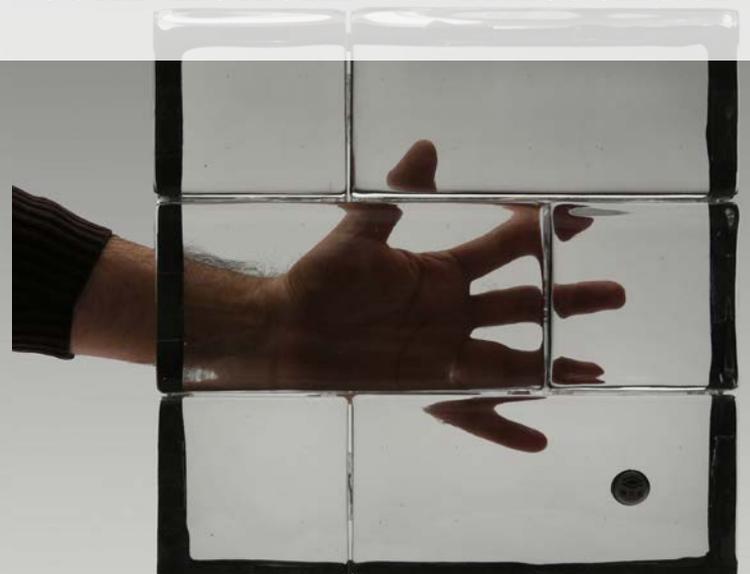


BBSR-
Online-Publikation
01/2023

Vakuumglas_WALL

Vakuumglas in Außenwandsystemen mit sehr hohem Wärmeschutz

von
Luis Ocanto-Arciniegas



Vakuumglas_WALL

Vakuumglas in Außenwandsystemen mit sehr hohem Wärmeschutz

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.44

Projektlaufzeit: 01.2019 bis 10.2021

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Daniel Wöffen
daniel.woeffen@bbr.bund.de

Autor

Fachhochschule Dortmund
i. V. Prof. Luis Ocanto-Arciniegas (Projektleitung)
luis.ocanto@fh-dortmund.de

Stand

Oktober 2021

Bildnachweis

Titelbild (Collage): Luis Ocanto-Arciniegas; Fotografie: Gabrielle Marl
Gabrielle Marl: S. 8

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Ocanto-Arciniegas, Luis, 2022: Vakuumglas_WALL: Vakuumglas in Außenwandsystemen mit sehr hohem Wärmeschutz.
BBSR-Online-Publikation 01/2023, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	7
1 Einführung	8
1.1 Einsatz von Vakuumglas in der Realisierung transparenter und transluzenter Außenwandsysteme mit sehr hohem Wärmeschutz	8
1.2 Transparenz und Transluzenz, Materialwahrnehmung	10
2 Grundlagen Vakuumglas	11
2.1 Stand der Technik, Stand der Forschung	11
2.2 Thermische Qualität des Vakuumglases	12
2.3 Problematik des Randverbundes	13
2.4 Zusammenhang zwischen Pillar-Abstand und Wärmeleitfähigkeit	15
2.5 Einfluss der Low-E-Beschichtung	16
2.6 Vakuumglas Eagon und Vakuumglas AGC - Fineo, ein Vergleich	17
2.7 Ausgewählte transparente und transluzente Materialien im Projekt, Materialeigenschaften	19
2.8 Tageslicht, Transmission und Sonnenschutz	22
3 Klebetechnik	23
3.1 Allgemeines	23
3.2 Geklebte Glaskonstruktionen, Klebeverbindungen	25
3.3 Direkt-Verklebung	26
3.4 Lineare Verklebung	26
3.5 Verträglichkeit	28
3.6 Eingesetzte Klebstoffe im Projekt, Eigenschaften	32
3.7 Rückbau, Recycling, Umwelt	36
4 Projektziele und Lösungsansätze	37
4.1 Formuliere Lösungsansätze	37
4.2 Zielsetzung	37
4.3 Baukonstruktiver und bauphysikalischer Ansatz	38
4.4 Untersuchungsmethodik	38
4.5 Projektteam und Organisation, Kooperationspartner	39
4.6 Arbeitspakete und Meilensteine	40
4.7 Beschreibung und Begründung	41
5 Fassadensysteme und Materialuntersuchungen	43
5.1 Methodik im Rahmen der Materialuntersuchungen	43
5.2 Entwickelte Glasaufbauten	47
5.3 Fassadensystem und Glasaufbauten, Adaption und Anpassung	50
5.4 Modellaufbauten und Fassadensystem, Übersicht	56
5.5 Modellaufbauten, Konzept 01	57
5.6 Modellaufbauten, Konzept 02	57
5.7 Case Study – Fassadengestaltung mit Vakuumglas_WALL Fassadenelemente	59

6	Versuche	
6.1	Glasaufbauten, Testobjekte Konzept 01 und Testobjekte Konzept 02	70
6.2	Direkt-Verklebung, Testobjekte Serien 01, 02, 03	70
6.3	Direkt-Verklebung, Adhäsionstest, Testobjekte Serie A - Schertest; Serie B - Alterungstest	70
6.4	Lineare Verklebung und Dauerhaftigkeit des Randverbundes	73
7	Ergebnisse	75
7.1	Ergebnisse Bauphysik	75
7.2	Labortest zur Beurteilung der Brauchtauglichkeit der geklebten Konstruktionen	78
7.3	Demonstratoren und Exponate	90
8	Wirtschaftlichkeit	111
8.1	Baupraktische Anschlussfähigkeit	112
9	Fazit, Ausblick	113
10	Mitwirkende	114
11	Kurzbiographie	115
12	Verzeichnisse	116
12.1	Literaturverzeichnis	116
12.2	Normen und Richtlinien	117
12.3	Abbildungsverzeichnis	118
12.4	Tabellenverzeichnis	122
12.5	Publikationsliste	122
12.6	Veranstaltungsliste	122
13	Anlage	123

Kurzfassung

Um die Ziele der Energiewende im beabsichtigten Zeitraum umzusetzen, müssen energieeffiziente Lösungen sowohl für den Neubau, insbesondere aber auch verstärkt für die energetische Sanierung des Gebäudebestands entwickelt werden.

Die Vision des Projektes Vakuumglas_WALL ist die Entwicklung einer transparenten und transluzenten Glaswand in einem Fassadensystem, das leistungsfähig und zugleich anpassbar an die Bedürfnisse der Nutzer ist und unter Berücksichtigung neuester Produktionstechniken und Materialentwicklungen energieeffiziente und anspruchsvolle architektonische Konzepte ermöglicht.

Das Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL führt Untersuchungen an Fassaden durch, die die Konzeption und Entwicklung eines multifunktionalen Baumoduls für die Gebäudehülle anstrebt, bestehend in erster Linie aus Vakuumglas (Wärmeschutz, Schallschutz) modellierbar je nach Anforderungen mit ausgewählten transluzenten und transparenten Baumaterialien. Hierbei ist das Vakuumglas als funktionaler, transparenter Dämm- und Schallschutz zu betrachten. Im Rahmen des Forschungsprojekts werden transluzente und transparente Glaselemente als Hybrid-Aufbauten für Fassaden entwickelt.

Auch die Adaption erdachter Hybrid-Aufbauten an herkömmlichen Fassadensystemen, wie Pfosten-Riegel Konstruktionen, Direktverklebung punktgehaltener Fassadenkonstruktionen im Neubau und Bestand (Retrofit) sind Ziele dieses Forschungsprojektes. Dabei werden innovative Fassadenkonzepte bei Element- und Ganz-Glasfassaden auch mit untersucht.

Das Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL, gefördert vom Innovationsprogramm Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) wird von den Kooperationspartnern Dow Deutschland GmbH (Standort Wiesbaden), Fuchs Design GmbH, LUCEM GmbH, MAGNA Glaskeramik GmbH und RAICO GmbH unterstützt.

Abstract

In order to implement the goals of the energy turnaround in the intended period, energy-efficient solutions must be developed both for new buildings and, in particular, for the energy-efficient renovation of existing buildings.

Vakuumglas_WALL is a research project that aims to design and develop a multifunctional building module for the building envelope, consisting primarily of vacuum glass (thermal insulation, sound insulation) that can be modeled with selected translucent and transparent building materials depending on the requirements. Here, the vacuum glass is to be regarded as functional, transparent insulation, and sound insulation.

As part of the research project, translucent and transparent glass elements are being developed as hybrid structures for facades. The adaptation of conceived hybrid structures to conventional facade systems such as post-and-beam structures, direct bonding of point-fixed facade structures in new buildings and existing buildings (retrofit) are also goals of this research project. Innovative facade concepts for element and all-glass facades are also examined.

The Vakuumglas_WALL research project is funded by the Zukunft Bau Innovation programm, Federal Institute for Building, Urban and Spatial Research (BBSR) and supported by cooperation partners Dow Deutschland GmbH (Site Wiesbaden), Fuchs Design GmbH, LUCEM GmbH, MAGNA Glaskeramik GmbH and RAICO GmbH.

1 Einführung

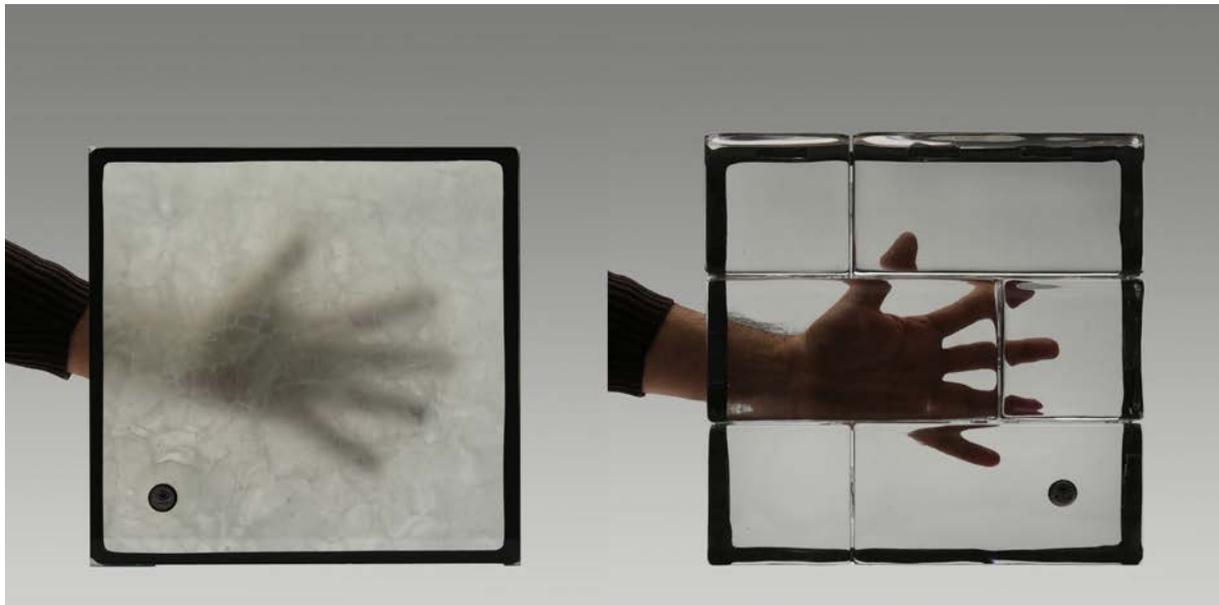


Foto: Gabrielle Marl FHDO

Transluzentes VG-Glasaufbau-Element (links) und transparentes VG-Glasaufbau-Element (rechts)

1.1 Einsatz von Vakuumglas in der Realisierung transparenter und transluzenter Außenwandssysteme mit sehr hohem Wärmeschutz

Alle auf dem Bausektor verfügbaren transluzenten und transparenten Bauteile bzw. Systeme können nach Gebäudeenergiegesetz (GEG) nur eingeschränkt oder gar nicht verbaut werden - so finden Glasbauwände derzeit nur im Industrie- und Gewerbebau Anwendung.

Im Forschungsprojekt „VG-WALL“ sollen daher zwei neuartige hochgedämmte transparente bzw. transluzente Außenwandkonzept-Systeme entwickelt werden, die auch im Wohnungsbau einsetzbar sind. Ziel ist es für transparente und transluzente Bauteile einen bisher nicht erreichbaren Wärmeschutz anzubieten. Damit werden ästhetisch ansprechende Neubauweisen und Sanierungskonzepte durch Aufgreifen der bei Architekten sehr beliebten, jedoch energetisch überholten Gestaltungselemente wie „Glasbaustein“, „Glaswand“ und „Profilbauglas“ ermöglicht.

Die wärmedämmende Funktionsebene ist in beiden Fällen Vakuumglas (VG), das durch Float- und Spezialgläser zum Wandsystem ergänzt wird. Es handelt sich hierbei um ein additives, höchst flexibles Bausystem aus Glas, das sehr dynamisch auf Nutzerverhalten und Baukontext anpassbar sein soll. Aus den in Vorgängerprojekten gewonnenen bauphysikalischen Erkenntnissen folgt, dass die konstruktive Überdeckung des Glasrandverbundes von Vakuumglas die Wärmebrückenproblematik in diesem Bereich lösen kann.

Durch den Aufbau des neuen Glasmoduls, (Konzept 01) mehrschichtiges Glasmodul, entstehen in der Gebäudehülle z.B. zwei parallele durchgehende Ebenen, die Vakuumglas-Ebene, die allein einen Ug-Wert von 0,58 W/m²K oder weniger aufweist und eine zweite Ebene, die aus transparenten oder transluzenten Materialien besteht.

Im baukonstruktiven Konzept wird das VG der Glasmodule außenseitig von Funktionsschichten (Spezialgläser, Folien) und raumseitig von lastabtragenden Schichten [Floatglas, Teilvorgespanntes Glas (TVG), Einscheibensicherheitsglas (ESG) oder Verbundsicherheitsglas (VSG)] eingefasst. So entsteht ein Schichtaufbau, in dem Bauteileigenschaften einfach durch den Einbau entsprechend ausgewählter Schichten eingestellt werden können.

Im zweiten Systemkonzept (Konzept 02) mit neuen Glasklinker- oder Profilbauglas-Elementen ist die Konstruktion so konzipiert, dass mit möglichst wenigen Komponenten eine Außenwand in Schnellbauweise fertiggestellt werden kann. Die Glasklinker werden durch Direktverklebung an die Vakuumglas-Schicht laminiert.

Die Profilbauglas-Elemente werden an die Vakuumglas-Scheiben montiert bzw. durch thermisch getrennte Aluminium-Profile oder glasfaserverstärkter Kunststoff-Profile (GFK) an den Kanten der so entstehenden Module zusammengehalten. Luftgefüllte Zwischenräume und GFK-Hohlprofile stellen die thermisch notwendige Randüberdeckung der Vakuumverglasung her und können nach Bedarf als Medienkanäle genutzt werden.

Wie sich in den vorangegangenen Projekten „Ultraslim“, „Ultralight“ oder „VG-Fassade“ (1) herausgestellt hat, stehen die sehr niedrigen Ug-Werte von Vakuumverglasungen, in Scheibenmitte (0,3 - 0,7 W/m²K) einem Glasrandverbund aus Glaslot gegenüber, der eine thermische Schwachstelle des Systems darstellt. Untersuchungen in den o.g. Forschungsprojekten zeigten, dass wenige Zentimeter Überdeckung ausreichen, um Wärmebrücken und damit Kondensatanfall zu minimieren. Die neuen VG-Wandaufbauten müssen darüber hinaus alle statischen und bauphysikalischen Anforderungen erfüllen, die auch an opake Außenwände gestellt werden. Durch die hohe Systemflexibilität bei einer gleichzeitig minimalen Anzahl von Komponenten entstehen kosteneffiziente Bausysteme. Diese neuen Systeme sollen insbesondere auch in Bestandssituationen und im Denkmalschutz einsetzbar sein und es ermöglichen, energetische Gebäudesanierungen schnell und unter Erhalt des optischen Erscheinungsbildes durchzuführen.

(1) ULTRASLIM – Entwicklung ultraschlanker, energieeffizienter Fassaden- und Fenstersysteme mit faserverstärkten Kunststoffprofilen (FVK) in Kombination mit Vakuumisolierverglasung (VIG) für optimalen Wärmeschutz (10.08.18.7-11.35)

ULTRALIGHT – Weiterentwicklung eines ultraschlanken, energieeffizienten Fassaden- und Fenstersystems mit faserverstärkten Kunststoffprofilen (FVK) in Kombination mit Vakuumisolierverglasung (VIG) für optimalen Wärmeschutz (10.08.18.7-13.37)

VG_FASSADE – Untersuchung der Einsparpotenziale durch den Einsatz von Vakuumglas in Glasfassaden und Entwicklung eines optimierten Tragsystems für dieses Einsatzgebiet (10.08.18.7-15.39)

1.2 Transparenz und Transluzenz, Materialwahrnehmung

Materialien werden nicht nur durch ihre technischen Eigenschaften unterschieden, sondern auch durch ihre Wirkung auf den Nutzer bzw. Betrachter. Die Wahrnehmung von Materialien unterscheidet sich auf vielschichtige Art und Weise durch das Zusammenwirken der verschiedenen Sinnesorgane (Hegger, 2007). Etwa 90 Prozent der Informationsreize eines Menschen basieren auf dem Sehsinn. Somit ist die optische Auswahl gewöhnlich die erste Entscheidungsgrundlage für einen Baustoff in der Architektur.

Die Oberflächenwahrnehmung basiert auf der Übertragung von Strahlung und die entsprechende Baustoffleistung ist die Reflexion der Strahlung an der Materialoberfläche. Aus diesem Grund spielt das Licht, das auf das Material fällt, bei der visuellen Wahrnehmung eine entscheidende Rolle. Die Oberfläche und Struktur der Baustoffe, von glänzend bis matt, hell bis dunkel, transparent bis opak, ist Grundlage architektonischer Gestaltung. So gewinnen dreidimensionale Strukturen an Tiefe, wenn Licht flach auf die Textur trifft. Durch eine ausgewählte Position von Fenstern oder Lichtquellen kann die Wirkung und Plastizität des Baustoffes hervorgehoben werden. Über transparente Materialien lässt sich dieser Effekt so weit verstärken, dass er scheinbar losgelöst vom Werkstoff funktioniert. Dabei werden halbtransparente, gleichmäßig texturierte Ebenen, etwa Glas, Kunststoff und Metall, aber auch gewebte oder perforierte Materialien überlagert. Der auftretende Effekt, die Interferenz, scheint die Struktur bei der Betrachtung aus unterschiedlichen Blickwinkeln jeweils zu verändern. Die Fassade wird belebt; große, gleichmäßige Flächen können somit eine hohe Lebendigkeit gewinnen.

Im Gegensatz zu transparenten Materialien, die zusätzlich zur Lichtdurchlässigkeit auch eine klare Durchsicht ermöglichen können, ist dies bei transluzenten Schichten nicht der Fall. Transluzente und transparente Materialien werden unter dem Begriff der diaphanen (griech.: durchscheinend) Baustoffe zusammengefasst (Kaltenbach, 2003). Sie brechen oder streuen das einfallende Licht. In unserer heutigen Zeit stehen Architekten und Gestalter neue Baustoffe in einem breiten Spektrum von absoluter Transparenz bis hinzu fast opaker Transluzenz zur Verfügung. Diese Produkte erfüllen nicht nur die zunehmend komplexeren Anforderungen, Vorschriften und Normen an Fassaden-Elemente sondern ermöglichen ein gestalterisches Potenzial, das noch lange nicht ausgeschöpft ist. Glas zeigt sich mit neuen Bearbeitungs- und Veredelungstechniken sowie Montagetechniken nach wie vor als vielseitiger Baustoff. Oft können aber transparente und transluzente Materialien die komplexen Anforderungen an die Gebäudehülle nicht erfüllen. Für hohe bauphysikalische Standards wird Glas bevorzugt. Im Verbund mit anderen Materialien können die positiven Eigenschaften des Glases, z.B. Vakuumglas eingesetzt werden um neue innovative, energieeffiziente Hybride zu schaffen.



Transluzente Glasmalerei an der Böhm Chapel, Architekt Gottfried Böhm 1954, Hürth

Foto: Ocantio

2 Grundlagen Vakuumglas

2.1 Stand der Technik, Stand der Forschung

Die Vakuumglastechnologie ist noch relativ jung, entwickelt sich aber rasant im asiatischen Raum weiter. Auf Grund der Verschärfung von Energiegesetzen in Asien ist die dortige VG-Nachfrage enorm angestiegen. In Europa und Deutschland sind Veränderungen im Bauwesen traditionell extrem langsam. Trotz interessanter Ergebnisse verschiedener Forschungsprojekte und anhand von Beispielbauten in Europa und Deutschland wird Vakuumglas leider nur als Randerscheinung bzw. Nischenprodukt betrachtet. Am Anfang des Jahrtausends sah es ein paar Jahre lang so aus, als ob Vakuum-Isolierglas (VIG) das Produkt für die Zukunft werden könnte.

Von 2005 bis 2014, nach intensiven Bemühungen der Maschinenhersteller zusammen mit Forschungsstellen wurde das Thema in Europa eher an den Rand gedrängt. Das lag am europäischen Markt mit seiner individuellen Gestaltung mit sehr unterschiedlichen Fenstergrößen und -arten sowie an nicht vorhandenen Prüfnachweisen mit belastbaren Aussagen für die Dauerhaftigkeit.

Zur Zeit ist in der Fachpresse (Huber, Lieb 2019) mehrfach über Vakuumglas und dessen Vorteile und Potenziale berichtet worden. Es wird aber auch auf die baurechtlichen Aspekte für VG-Verglasung aufmerksam gemacht. Die bekannten europäischen Regelwerke zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Mehrscheiben-Isolierglas (MIG) in der Normenreihe EN 1279 schließen das Produkt Vakuum-Isolierglas in ihren neuen Fassungen explizit aus. Das scheint sinnvoll zu sein, da die Randlasten in MIG hauptsächlich durch das eingeschlossene Gasvolumen bestimmt werden. Für die Anwendung von VG in Fassaden benötigt es ein eigenes Regelwerk.

VG ist zur Verwendung in Fenstern und Fassaden denselben Einwirkungen ausgesetzt und soll eine lange Verwendbarkeit über die Nutzungsdauer des Bauteils aufweisen (Dauerhaftigkeit). Deshalb ist VG in Europa nach wie vor ein unreguliertes und kein harmonisiertes Bauprodukt. Eine CE-Kennzeichnung von VG ist z.Zt. nicht möglich, daher wird ein Nachweis der Verwendbarkeit von Bauprodukten notwendig (früher Zustimmung im Einzelfall, ZiE). Die baurechtliche Lage des VG's soll geregelt werden. Seit Oktober 2018 gibt es auf internationaler Ebene einen Standard um die Spezifizierung von Vakuumglas-Produkten zu regeln, sowie Evaluierungsmethoden für thermische und schallschutztechnische Leistung des VG's, die ISO 19916-1. Eine weitere Norm, die ISO/PRF 19916-3, Glas im Bauwesen - Vakuumisolierglas - Teil 3: Prüfverfahren zur Bewertung der Leistung bei Temperaturunterschieden ist im September 2021 veröffentlicht worden, der Entwurf befindet sich aber noch im Entwicklungsstand. Diese Normen stellen eine Grundlage für weitere Normen dar. Damit wird eine Ebene für die Etablierung und Akzeptanz des Vakuumglases im Bausektor bzw. in der Glasindustrie geebnet.

In diesem Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL wird diese Situation mit Zuversicht betrachtet, da die letzten Entwicklungen im Bereich der Vakuumgläser zeigen, dass Wärmedurchgangskoeffizienten erreicht werden können, die gleich oder besser sind als die Ug-Werte von heute üblichen 3fach-Mehrscheiben-Isoliergläsern. Wie schon erwähnt sind in ausgewählten Bauvorhaben in Europa bereits VG eingebaut worden (2). Eine praktische Umsetzung ist schon erprobt und erfolgt. Die Erfahrungen, die mit VG in diesen Bauvorhaben und in weiteren Forschungsprojekten erzielt worden, beeinflussen maßgeblich die weitere positive Entwicklung des VG's (Hohenstein 2019). Da es seit April 2019 auch eine Fertigung von VG in Belgien gibt, sollte auch die baurechtliche Lage sowie Liefersituation zukünftig besser werden.

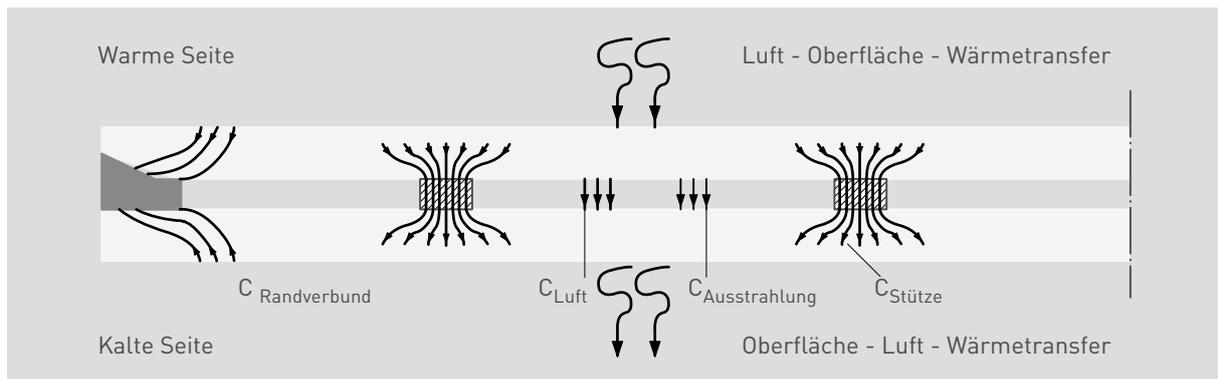
(2) VG_FASSADE – Forschungsbericht, Untersuchung der Einsparpotenziale durch den Einsatz von Vakuumglas in Glasfassaden und Entwicklung eines optimierten Tragsystems für dieses Einsatzgebiet (10.08.18.7-15.39)

<https://www.zukunftbau.de/projekte/forschungsprojekte/forschungsfoerderung/1008187-1539>

2.2 Thermische Qualität des Vakuumglases

Für die thermische Qualität und Dauerhaftigkeit ist einerseits das Vakuum, die Pillar (Abstandshalter), deren Form und Achsabstand sowie andererseits die Breite und Beständigkeit der Randversiegelung verantwortlich. Auch eine Low-E-Beschichtung ist für die Energieeffizienz der VG-Scheibe maßgeblich. Die auftretenden Wärmetransportvorgänge im VG sind in der Abb. 1 dargestellt.

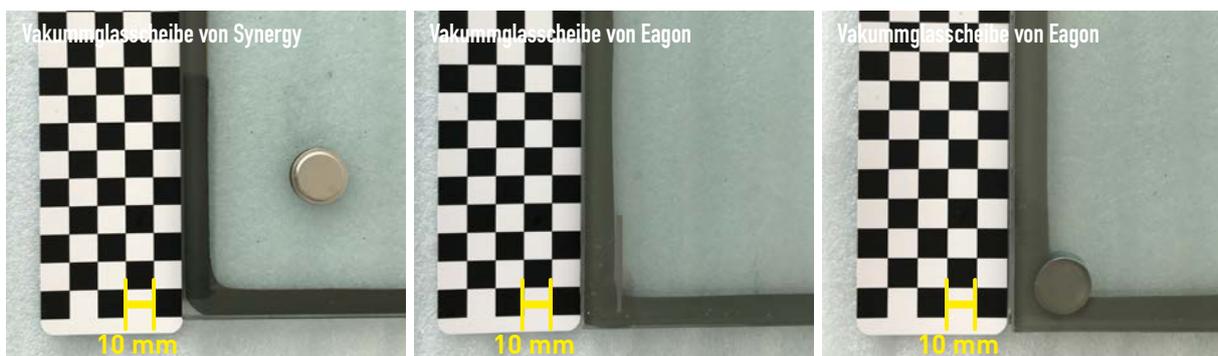
Abbildung 1
Wärmetransporte im Vakuumglas



Quelle: Ocanto

Der geringe Vakuumpalt ist die Hauptkomponente zwischen den Glasscheiben. Ein wichtiger Produktionsschritt bei der Herstellung von VG ist die Erzeugung des Hochvakuums von 10^{-3} Pa. Dies erfolgt durch das Evakuieren (Abpumpen) der Luft aus dem Scheibenzwischenraum über das Evakuierungsventil (Abb. 2) in einem mehrstündigen Prozess bei hohen Temperaturen durch neu entwickelte Turbo-Molekular-Pumpen.

Abbildung 2
VG - Detail einer Scheibe, Links: Abstandshalter, Getter und Evakuierungsventil unter Abdeckkappe, Synergy. Mitte: Getter in der Eagon VG-Scheibe, Rechts: Evakuierungsventil, Flächenbündig an der Eagon VG-Scheibe



Quelle: Ocanto

Low-E-Beschichtungen werden durch hohe Temperaturen $\geq 420^\circ\text{C}$ zerstört. Deshalb ist das Abstimmen der Prozesstemperatur von der Verarbeitungstemperatur der Glasritzen maßgeblich abhängig. Vorgespannte Low-E-Gläser entspannen sich schon ab 400°C . Dies bedeutet, dass nur Teilvorgespanntes VG hergestellt werden kann. Hierbei kann die Höchsttemperatur bis max. 430°C im Produktionsprozess betragen. Alle Materialien „gasen“ im Hochvakuum permanent aus. Dieses Ausgasen ergibt einen ständigen Anteil von Restgas im Vakuumpalt. Diese Moleküle beeinflussen langfristig den Wärmetransport und in Konsequenz den Wärmeschutz negativ. Dieser Vorgang muss permanent kompensiert werden, dafür wird ein Getter eingesetzt.

„Ein Getter ist ein chemisch reaktives Material, das dazu dient, ein Hochvakuum möglichst lange zu erhalten. Hierbei gehen an der Oberfläche eines Getters die Gasmoleküle mit den Atomen des Fest-Materials eine direkte chemische Verbindung ein oder die Gasmoleküle werden durch Sorption festgehalten“ (de.wikipedia.org/wiki/getter) siehe auch Abb. 2. Die Gasmoleküle werden auf diese Weise durch das Getter eingefangen. In der Regel basiert dieser Vorgang auf Titan oder Platin. Ein Getter ist die Voraussetzung für die Dauerhaftigkeit des Vakuums und die gleichbleibende Qualität über die erwartete funktionierende Lebensdauer des VG's von mehr als 50 Jahren.

2.3 Problematik des Randverbundes

Vergleicht man Vakuumglas und konventionelle - also mit Edelgasen befüllte - Mehrfach-Wärmeschutz-Verglasungen, so bestehen zwei Hauptunterschiede hinsichtlich des thermischen Bauteilverhaltens:

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

Moderne Mehrfach-Wärmeschutz-Verglasungen verfügen im Bereich des Glasrandverbundes über einen Wärmekanten-Aufbau, der die thermische Trennung gewährleistet (Abb. 3).

Abbildung 3

Schnitt durch eine Edelgas gefüllte Dreifach-Verglasung 4/12/4124 der Firma Pilkington (links), Randverbund Abstandshalter in 20-facher Vergrößerung (rechts)



Quelle: Team Ocanto - Rogall

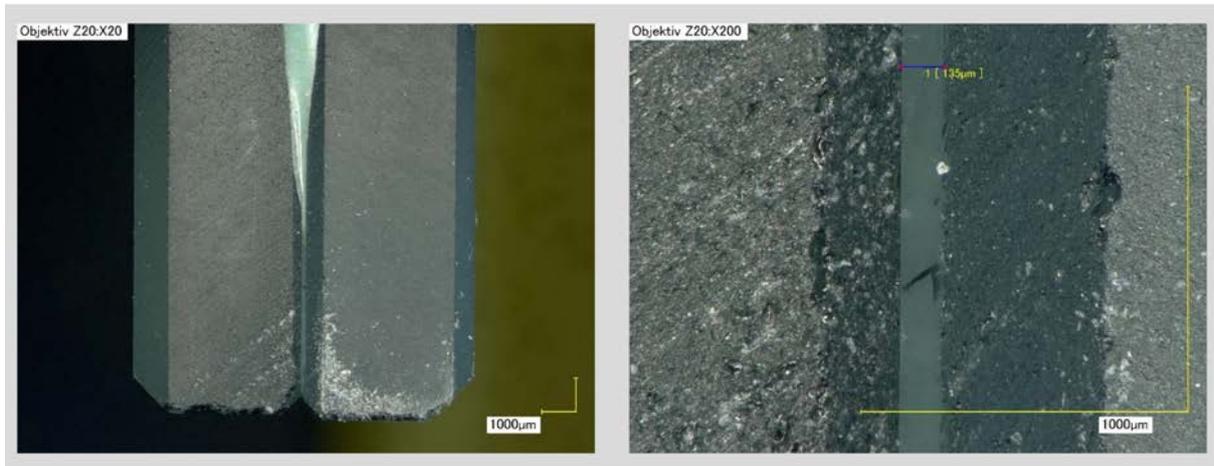
Das bei gasgefüllten Verglasungen immer notwendige Trockenmittel liegt hier in einem Hohlprofil aus Kunststoff vor, das eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist. Außerdem sind außen dünne Metallfolien zur Herstellung eines gasdichten Abschlusses aufgebracht. Die Abdichtung erfolgt im oberen Bereich durch Butylelastomere, im Unteren Bereich durch Polysulfid oder Silikon (Abb. 3, rechts).

Im Gegensatz hierzu ist der Aufbau des Glasrandverbundes bei Vakuumverglasungen („edge seal“) wesentlich einfacher, da hier kein Trockenmittel benötigt wird. Die beiden Scheiben sind über Glaslot „Material im Material“ direkt miteinander verbunden, um dauerhaft ein Hochvakuum im Scheibenzwischenraum gewährleisten zu können (Abb. 4). Wie in einer einfachen FEM-Simulation des Wärmeflusses sichtbar, verhält sich eine Vakuumverglasung im Bereich des Randverbundes ähnlich einer Einfachverglasung, da die Glasscheiben über die Randversiegelung mit dem Glaslot thermisch miteinander verbunden sind (Abb. 5).

Dieser Randverbund ist die thermische Schwachstelle des Glasverbundes mit Vakuumglas und wird je nach Fassadensystem unterschiedlich behandelt. In Fassadensystemen, in denen der Randverbund verdeckt (Pfosten-Riegelfassade) bzw. eingefasst wird, ist die Statik, die Wärmebrücken-Problematik und die Entwässerung bzw. Dichtung anders als bei Ganzglas-Fassadensystemen (Structural Glazing).

Abbildung 4

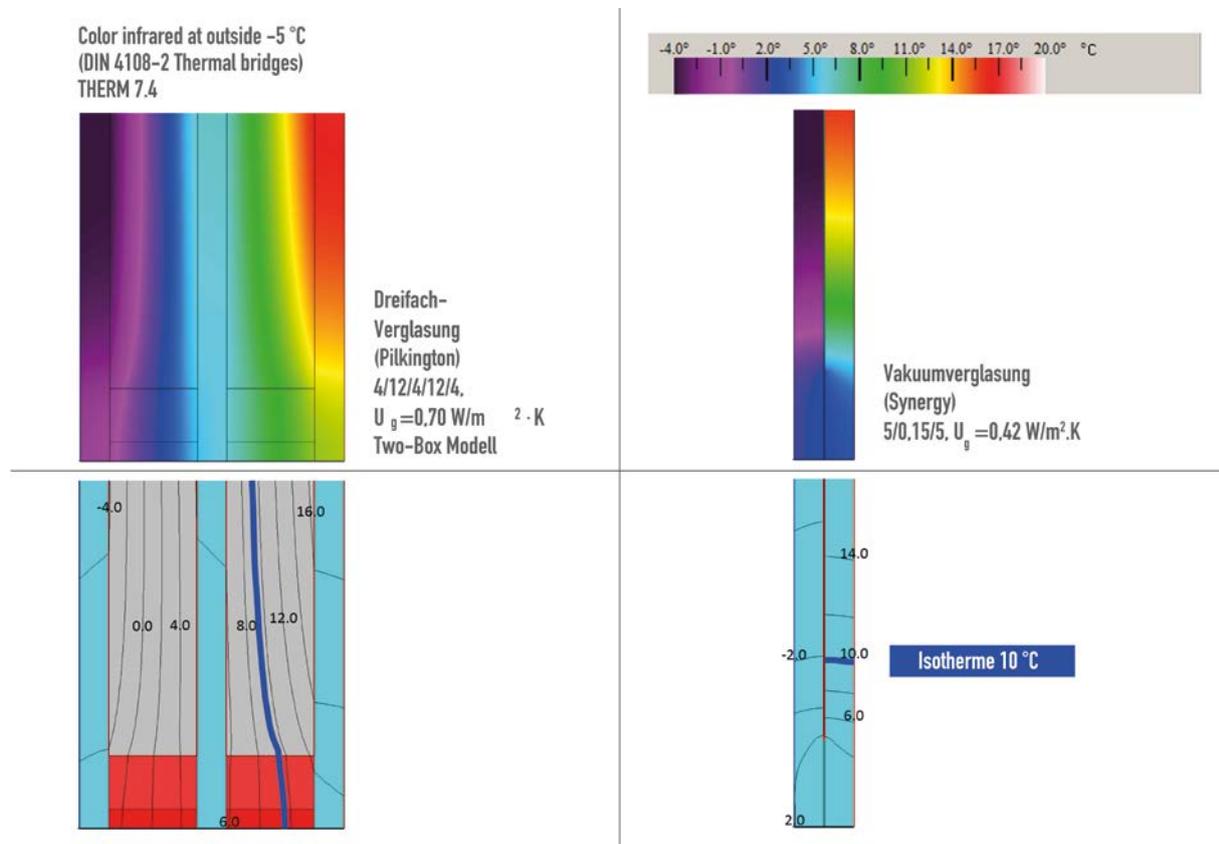
Seitenansicht eines VG 4/0,15/4 der Firma Synergy in 20-facher (links) und 200 facher (rechts) Vergrößerung



Quelle: Team Ocanto - Rogall

Abbildung 5

Isothermenvergleich einer Dreifach- und einer Vakuumverglasung



Quelle: Team Ocanto - Rogall

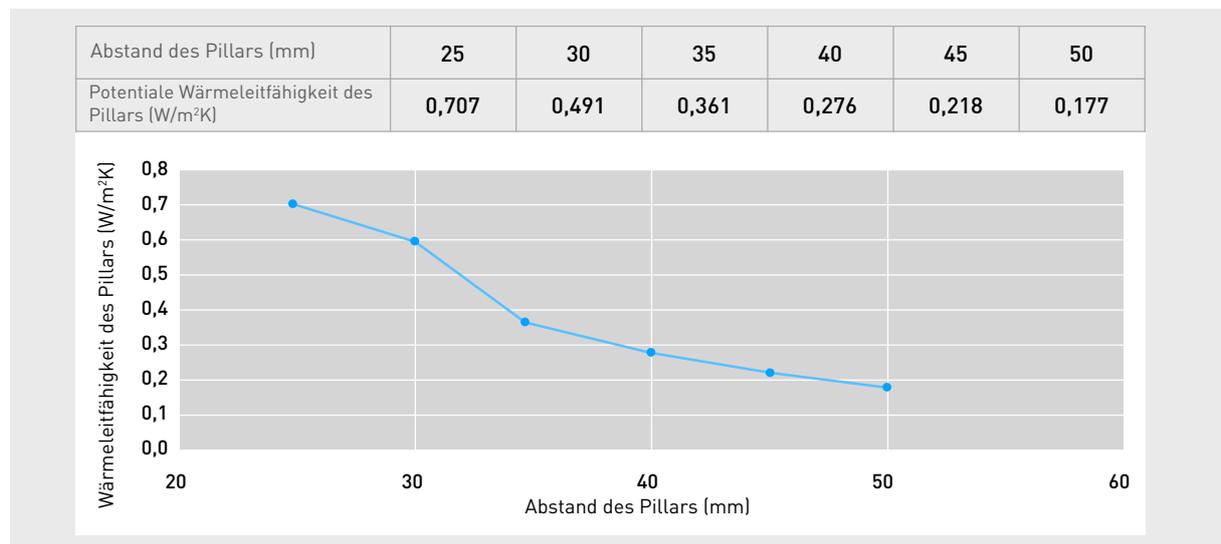
Ohne entsprechende konstruktive Maßnahmen wären folglich die raumseitigen Oberflächentemperaturen im Bereich des Randverbundes so niedrig, dass im Winter mit starkem Tauwasseranfall zu rechnen wäre. Eine bauphysikalische Herausforderung im Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL bestand darin, diese thermische Schwachstelle so zu kompensieren, dass die hervorragenden Ug-Werte der Verglasungen nicht beeinträchtigt werden.

2.4 Zusammenhang zwischen Pillar-Abstand und Wärmeleitfähigkeit

Der Vakuumspalt wird durch kleine Abstandhalter oder Stützkörper (Pillar) auseinander gehalten. Diese müssen den äußeren Luftdruck und anderen Belastungen z.B. Windlast aushalten können, sind aber gleichzeitig auch kleine punktförmige Wärmebrücken. Die Verwendung von vorgespanntem Glas erlaubt größere Achsabstände der Pillar und dies begünstigt bessere U-Werte des gesamten Glassystems (Abb. 6). Die Pillar der Firmen Synergy und Eagon sind u. a. durch ihre Ringform und ihr Material auf geringe Wärmeübertragung bei gleichzeitig guter Kraftübertragung optimiert. Außerdem ist er relevant für einen guten Schallschutz vom VG (Abb. 7).

Abbildung 6

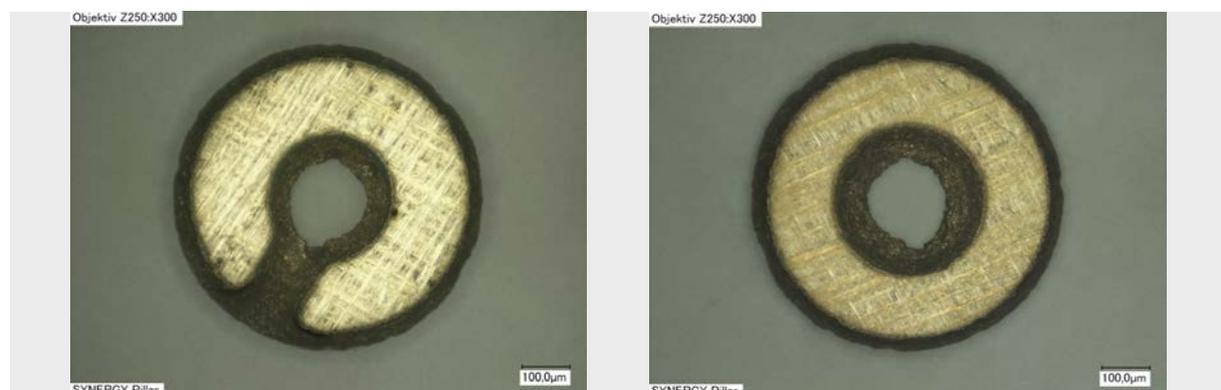
Zusammenhang zwischen Pillar und Wärmeleitfähigkeit



Quelle: Synergy

Abbildung 7

Ringförmiger Pillar von Synergy u. Eagon, Links: Vorderseite mit Aussparung zur besseren Vakuumierung, Rechts: Rückseite



Quelle: Team Ocanto - Rogall

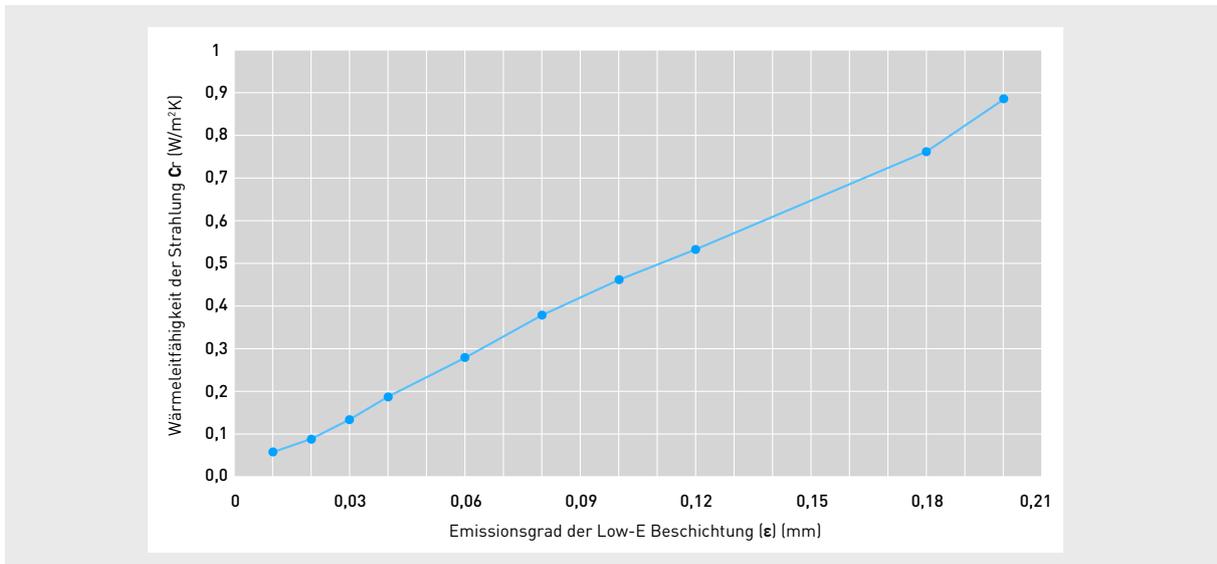
2.5 Einfluss der Low-E-Beschichtung

Der Strahlungsdurchgang durch ein VG-Element wird wie bei Isolierglas-Verglasungen auch durch die Art und Qualität der Low-E-Beschichtung und deren Emissivität bestimmt.

Die heutigen Isolier-Verglasungen werden im Wesentlichen durch die Low-E-Beschichtung leistungsfähiger, indem man immer leistungsfähigere Beschichtungen zum Einsatz bringt. Das Kennzeichen für sogenannte Low-Emissivity Wärmeschutzbeschichtungen (Low E) ist, bezogen auf den U-Wert, die Emissivität ϵ . Der niedrigste physikalisch erzielbare Wert ist 1,5 - 2,0 % ($\epsilon = 0.01$ bis 0.02), handelsüblich sind heute Werte von $\epsilon = 0,02$ bis $0,04$. Die Abbildung 8 zeigt den Einfluss der Low-E-Beschichtung und der Wärmeleitfähigkeit von VG.

Abbildung 8

Zusammenhang zwischen Low-E-Beschichtung und Wärmeleitfähigkeit des Vakuumglases



Quelle: Synergy

Abbildung 9

Zusammenhang von Wärmeübertragung durch Strahlung und Wärmeleitung vom Pillar sowie U-Wert der jeweiligen Low-E-Vakuumverglasung

Positionen	$C_{\text{radiation}}$ W/m²K	$\epsilon = 0,01$ $C_r = 0,05$	$\epsilon = 0,02$ $C_r = 0,05$	$\epsilon = 0,03$ $C_r = 0,14$	$\epsilon = 0,07$ $C_r = 0,32$	$\epsilon = 0,08$ $C_r = 0,36$	$\epsilon = 0,11$ $C_r = 0,49$	$\epsilon = 0,17$ $C_r = 0,75$
	C_{Pillar} W/m²K							
U - Wert W/m²K	Pillar Abstand= 30 mm $C_{\text{Pillar}} = 0,491$	0,50	0,54	0,57	0,71	0,74	0,84	1,02
	Pillar Abstand= 40 mm $C_{\text{Pillar}} = 0,491$	0,31	0,36	0,39	0,54	0,57	0,68	0,87
	Pillar Abstand= 45 mm $C_{\text{Pillar}} = 0,491$	0,26	0,30	0,34	0,49	0,53	0,63	0,83

Die Daten werden mit der Software Window 7 berechnet. Rahmenbedingungen gemäß JGJ151-2008
Der Pillar in der Vakuum-Scheibe ist ringförmig. Der Pillar-Abstand ist 40 mm

Quelle: Synergy

2.6 Vakuumglas Eagon und Vakuumglas AGC - Fineo im Vergleich

Auf Grund der Verfügbarkeit war das Vakuumglas von Eagon Glass, Produktionsort Südkorea, die erste Wahl im Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL. Im Forschungsprojekt VG_Fassade wurden VG-Scheiben von der Fa. Synergy verwendet. Die Fa. Synergy ist seit 2019 nicht mehr auf dem Markt. Beim ersten Kontakt und Verhandlungen zur Bestellung der Eagon-VG-Scheiben wurde ein Produkt angeboten, das EAGON 1 (Tab. 1). Das EAGON 1 mit einem U_g -Wert von $0,63 \text{ W/m}^2\text{K}$ hat einen mäßigen U_g -Wert verglichen mit dem Produkt von Synergy, das im vergangenen Forschungsprojekt VG-Fassade (U_g -Wert= $0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$) eingesetzt wurde. Das Produkt EAGON 1 wird mit einem vorgespannten Glas der Fa. Han-Glas (Saint Gobain in Südkorea) mit einer Low-E-Beschichtung Typ PLA 113 mit einem Emissivitätsgrad von $0,08$ hergestellt, daher resultiert der mäßige U_g -Wert dieses Produktes. Der U_g -Wert des Synergy-VG wurde im Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL für FEM-Simulationen zur Bauphysikalischen Performance der erdachten Glasaufbauten eingesetzt. Die Zwischenergebnisse 01 und 02 wurden mit einem U_g -Wert von $0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$ simuliert. Im Jahr 2020 hat die Firma EAGON ein neues Produkt entwickelt, das für das Forschungsprojekt sehr interessant ist, EAGON 2 mit einem U_g -Wert von $0,386 \text{ W/m}^2\text{K}$. In diesem Produkt findet eine Low-E-Beschichtung, PLA ONE, Anwendung. Die PLA ONE hat einen Emissivitätsgrad von $0,022$. daher hat das Produkt EAGON 2 einen hervorragenden U_g -Wert. Nachteilig bei so einem guten U_g -Wert ist allerdings die Verschlechterung des Solarfaktors, den sogenannten g -Wert. Bei Sonnenschutz-Verglasung gilt die Regel: Je besser der Schutzfaktor desto schlechter der g -Wert. Der g -Wert ist bei gezielter Solargewinnung bzw. passiver Solarnutzung sehr wichtig. Das Produkt EAGON 2 wurde im Forschungsprojekt sowohl für FEM-Simulationen als auch für die Demonstratoren und Exponate eingesetzt.

Tabelle 1
Eigenschaften Vakuumglas Eagon 1 u. Eagon 2, Angaben des Herstellers

Glas Floatglas 5 mm	Vakuum- Spalt	Pillar Achse Abstand	Randverbund Breite	Winddruck Widerstand [in Pascal]	U_g [$\text{W/m}^2\text{K}$]	Licht- Transmission T_L [in %]	Solarfaktor g -Wert EN 410 [in %]	R_w (C,Ctr) Wert [dB]	Gewicht [Kg/m^2]
EAGON 01									
TL5-V-T5 10,25 mm	0,25 mm	40 mm	10 mm	3.400	0,62	76	62	37	25
EAGON 02									
TL5-V-T5 10,25 mm	0,25 mm	40 mm	10 mm	3.400	0,38	70	53	37	25

T = Vorgespannt, L = low-emission Beschichtung, V = Vakuum

Quelle: Ocanto

Tabelle 2
Eigenschaften Vakuumglas FINEO, Angaben des Herstellers

Glas Floatglas 5 mm	Vakuum- Spalt	Pillar Achse Abstand	Randverbund Breite	Winddruck Widerstand [in Pascal]	U_g [$\text{W/m}^2\text{K}$]	Licht Transmission T_L [in %]	Solarfaktor g -Wert EN 410 [in %]	R_w (C,Ctr) Value [dB]	Gewicht [Kg/m^2]
FINEO-AGC									
L4,5-V-4,5 9,70 mm	0,70 mm	20 mm	4 mm	3.400	0,70	79	60	36	22,5

T = Vorgespannt, L = low-emission Beschichtung, V = Vakuum,

Quelle: Ocanto

FINEO, das Vakuumglas von AGC / Panasonic

Im April 2019 wurde ein Produktionswerk in Belgien für die Herstellung von Vakuumglas der Firma AGC eingeweiht und in Betrieb genommen. Die Verfügbarkeit von Vakuumglas in Europa sollte damit erstmalig gewährleistet werden. Das Produkt FINEO besitzt nach Herstellerangaben einen Ug-Wert von $0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$, einen Ug-Wert vergleichbar mit dem herkömmlicher 3-Fach Verglasungen, die auf dem Markt angeboten werden.

Interessant bei dem Produkt FINEO sind die verfügbaren Glasstärken: 3/3, 3,5/3,5, 4,5/4,5 und 5,5/5,5 mm. Je nach Bedarf kann man ein VG-Glas mit geringerem Gewicht einsetzen. Ob im Neubau oder Bestand; ein geringeres Gewicht der Verglasung und in Konsequenz ein schlankerer Fassadenrahmen, ist immer von Vorteil (Denkmalschutz od. Neubau, Leichtbau, Montage, Demontage, Wartung usw.). Das Produkt FINEO wird im Vergleich zu EAGON Produkten (diese werden mit teilvorgespanntem Glas produziert) mit normalem Floatglas hergestellt (Tab. 2).

Tabelle 3

Vakuumglas Eagon 2 und FINEO 10 im Vergleich. Angaben der Hersteller

	EAGON 2	FINEO 10
Zusammensetzung Glasscheibe Stärke mm	5/5 10,25	4,5/4,5 9,7
Gewicht kg/m ²	25	22,5
Randverbund, Breite mm	10	4
Ug-Wert W/m ² K	0,38	0,70
Pillar, Achsenabstand mm	40	20
Lichttransmission TL (in %)	70	79
Solarfaktor g-Wert (in %)	53	60
Schallschutz Rw (C,Ctr.) Wert (dB)	37	36

Quelle: Ocanto

Die teilvorgespannten Gläser erlauben einen größeren Achsabstand zwischen den Pillar und damit einen besseren Ug-Wert, siehe Abschnitte 2.4 u. 2.5.

Im Vergleich schneidet das Produkt EAGON (Tab. 3) besser ab als das von FINEO 10. Der Ug-Wert ist wesentlich besser auf Grund der Low-E-Beschichtung und den breiteren Achsabständen der Pillar. Die VG-Scheibe EAGON 2 ist etwas dicker, schwerer und besitzt eine schlechtere Lichttransmission sowie einen niedrigeren g-Wert trotz exzellentem Ug-Wert. Das Produkt FINEO besitzt Werte, die mit einer 3-Fach-Verglasung vergleichbar sind und außerdem folgende Vorteile hat: weniger Materialeinsatz und geringeres Gewicht.

Wie schon erwähnt wurde das Produkt EAGON 2 im Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL in Demonstratoren und Exponaten eingebaut. Auf Grund des Randverbundes von 4 mm ist FINEO 10 für die Forschung Vakuumglas_WALL ebenfalls ein interessantes Produkt. Im Vergleich mit dem 10 mm breiten Randverbund von EAGON stellt das Produkt FINEO eine Entspannung der Randverbund-Problematik dar (siehe Abschnitt 2.3). FINEO 10 wird in den FEM-Simulationen der Glasaufbauten mit untersucht, um die Ergebnisse beider Produkte vergleichen zu können und auszuwerten.

Geplant ist auch der Einsatz von FINEO Glas für das Konzept 02 (Lineare Verklebung in druckentspannter Isolierverglasung), siehe Abschnitt 4.3.

2.7 Ausgewählte transparente und transluzente Materialien im Projekt Vakuumglas-WALL: Eigenschaften

Im Forschungsprojekt wurden folgende Materialien auf Grund ihrer positiven Eigenschaften, Transparenz und Transluzenz, ausgewählt.

1) GUSSGLAS mit Prismastruktur, Produkt: Masterglass, Strukturglas Typ ESTRIADO von der Fa. Saint Gobain Glas.

Die Qualitäten von DECORGLASS und MASTERGLASS entsprechen der Norm DIN EN 572-5 für Ornamentglas. Die Lichtdurchlässigkeit von MASTERGLASS (klares, bedrucktes Glas) liegt je nach Muster und Dicke zwischen 70 und 90 %. Dieses Produkt bietet einen mittleren Sichtschutz. Das Glas verhindert direkte Einblicke in den Raum; Umrisse und Farben zeichnen sich jedoch ab. Glasdicke: 4 mm

2) PROFILBAUGLAS, bekannt als Industrieglas od. U-Glas

Das Profilbauglas ist eine spezielle Form des Gussglases nach DIN EN 572-7, das in Form von U-Profilen in den Dicken von 6 bis 7 mm hergestellt wird. Mit der U-Form wird eine größere statische Höhe des Querschnittes erreicht. Es ermöglicht eine Verglasung mit langen Elementen, ohne Pfostenprofile.

Physikalische Eigenschaften:

Elastizitätsmodul: $E = 60\,000 - 70\,000 \text{ N/mm}^2$ Härte nach Mohs: 6 bis 7 (Feldspat 6; Quarz 7)

Linearer Ausdehnungskoeffizient bei Erwärmung um 1°C , $\alpha = 75 \text{ bis } 85 \cdot 10^{-7}$

Spezifisches Gewicht: 2500 kg/m^3

Wärmeleitfähigkeit: $0,81 \text{ W/m}^2\text{K}$ Wärmedurchlaßwiderstand: $0,007 \text{ m}^2\text{K/W}$

Produkte: LINIT-Profilbauglas von Fa. LAMBERTS, LINIT Glastyp: P26 504 / Außenmaß 262 mm, Flanschhöhe 41 mm, Glasdicke 6 mm. LINIT-Typ P26/60/7 Solar / Außenmaß 262 mm, Flanschhöhe 60 mm, Glasdicke 7 mm

Nach Angaben des Herstellers ist LINIT prismsolar eine speziell von Lamberts entwickelte Oberflächenstruktur. Aufgrund dieser Prismenstruktur ist es möglich, dass die Solarstrahlung im Winter in hohem Maße durch die Verglasung in die Innenräume gelangt, im Sommer dagegen wird diese wieder nach außen reflektiert. Diese statische saisonale Verschattung, die aufgrund der Verwendung des Werkstoffes Glas entsteht, ist in der Regel sehr lange haltbar und dient dazu mitzuhelfen den Energieeintrag von Fassaden je nach Jahreszeit den damit verbundenen unterschiedlichen Energiebedarfen steuerbarer und effizienter zu machen.

3) ELEKTROCHROME VERGLASUNG, steuerbar

Elektrochromes Glas (auch intelligentes oder dynamisches Glas genannt) ist eine abtönbare Verglasung, die sich anhand einer Wärmequelle mit elektrischem Strom oder natürlicher Sonneneinstrahlungen bläulich verfärbt. Die elektrochrome Beschichtung des Glases besteht aus fünf Lagen Keramikmaterial. Der verdunkelte Zustand ermöglicht mit dem Glas unerwünschte Wärme und Blendlicht der Sonne zu absorbieren und abzuleiten. Der klare Zustand bietet die Möglichkeit der Optimierung von Tageslicht bzw. Sonnenenergie. (Angaben des Sage Glas Herstellers)

Produkt: SageGlass®, Hersteller Vetrotech Saint-Gobain International AG.

4) VSG - mit Metallgewebe

Gewebe und Glas. Produktbeschreibung: SEFAR Architecture VISION | fabric & glass sind schwarze Präzisionsgewebe, die mit Aluminium, Chrom, Titan oder Gold beschichtet werden. Sie ermöglichen die metallisierte

Gewebeseite mit Copper, Gold oder speziellem Design bedrucken zu können.

Bei Fassadenelementen wird SEFAR Architecture VISION entweder als Verbundglas laminiert oder als Isolierglas zwischen zwei Scheiben eingespannt. Wenn nur die äussere Seite metallisiert wird, verringert es die Einsicht von aussen und erzielt dabei herausragende licht- und wärmetechnische Werte. Die Innenseite des Gewebes ist schwarz und somit farbneutral. Von innen in 3 m Entfernung nimmt man das Gewebe optisch nicht mehr wahr. Neben den ästhetischen Merkmalen von SEFAR Architecture VISION verringert dies zusätzlich das Aufprallen von Vögeln auf die Glasfassade. Des Weiteren ist es möglich, SEFAR Architecture VISION in Kunststoff einzulaminieren oder es als textile Oberfläche zu verwenden. Dies kreiert eine ganz besondere und einzigartige Erscheinung der Innen-/Aussenansicht des Gewebes. Die metallisierte Aussenseite des Gewebes reflektiert den direkten Lichteinfall, wobei die schwarze Innenseite neutral wirkt und den Blick nach aussen nicht behindert. Angaben des Herstellers.

Produkt: SEFAR Architecture VISION, Sefar AG,

Eigenschaften:

Metallbeschichtung, einseitig

Breite: 158 cm

Garnstärke: 0.26 mm

Maschenöffnung: 25 %

Struktur: Körperbindung

g-Wert: 61.6 %

Lichttransmission Tv: 61.8 %

5) LICHTBETON

Bei Lichtbeton (auch lichtleitender Beton, oder transluzenter Beton) handelt es sich um einen Betonwerkstein, der durch die Einbringung lichtleitender Fasern durchscheinend wird. Im Gegensatz zu manchen Glasbetonkonstruktionen handelt es sich allgemein eher um Transluzenz als um Transparenz im engeren Sinne. Die Faserstrukturen zeichnen sich als Leuchtpunkte auf der Oberfläche ab und es zeichnen sich zusammenhängende Silhouetten durch Abschattung ab. Angewendet wird das Material in der Architektur vor allem für Wandverkleidungen und Fassaden. Aber auch eine Vielzahl von Designprodukte wurden mit diesem Material umgesetzt z.B. hinterleuchtete Möbel. Damit die Faserenden auf der Oberfläche hell erscheinen, müssen die Fasern durch den kompletten Stein reichen, lichtleitend sein und von der Gegenseite aus angestrahlt werden. Die Lichtquelle dafür kann unterschiedlicher Natur sein (Tages - oder Kunstlicht). (de.wikipedia.org)

Produkt: Lichtbetonplatten Hersteller: LUCEM GmbH, Aachen

Eigenschaften:

Betonplatten mit Kunststofffasern, Faseranteil ca. 40 %

Platten Abmessungen (max.): 1800 mm x 625 mm x 20 mm

Rohdichte: 2600 kg/m³

Wärmeleitzahl: 2,3 W/m²K

6) GLASKERAMIK

Glaskeramik ist eine Werkstoff-Gruppe, die aus einer polykristallinen und einer glasigen Phase besteht. Glaskeramik hat eine der Keramik ähnliche Struktur, wird jedoch anders hergestellt. In einem Glas wachsen mit Keimbildnern gesteuert Kristallite (teilweise Kristallisation). Die Werkstücke werden wie bei Gläsern auch gegossen, anschließend erfolgt eine Wärmebehandlung (Schneider, 2016). Bei der Herstellung von Flach-, Solar-, Farb- oder Flaschenglas fallen ständig Ausschüsse, Fehlproduktionen und Übermengen von ca. 5% der Gesamtglasproduktion an. Diese Industrieabfälle stellen die Rohstoffquelle für die Produktion von Glaskeramik dar. Die Glasabfälle werden zunächst kontrolliert in Scherben gebrochen und durchlaufen dann ohne Zusatz

von Bindemitteln oder Einsatz von Druck nur mit Hilfe von Temperatur und Zeit einen aufwendigen Sinterungsprozess. Anschließend werden die gesinterten Platten in Kühlhauben definiert abgekühlt. In der Endverarbeitung schließlich werden die Rohplatten kalibriert, auf Wunsch poliert und auf Endmaß geschnitten. Dadurch ist jede Glaskeramikplatte ein Unikat mit einzigartigen Merkmalen und Details. Die dabei entstehenden transluzenten Eigenschaften, welche bei Hinterleuchtung hervorragend zur Geltung kommen, machen das Produkt besonders reizvoll. (Angaben des Herstellers, MagnaGlas)

Produkt: Glaskeramikplatten, Hersteller MAGNA Glas GmbH,

Eigenschaften:

Platten Abmessungen (max.): 2800 mm x 120 mm; 3500 mm x 1500 mm

Rohdichte: 2400 kg/m³

Elastizitätsmodul E: ca. 57.000 N/mm²

Spezifische Wärmekapazität cp: 0,7 x 103 J kg⁻¹ K⁻¹

Temperaturausdehnungskoeffizient αT: 7,22 x 10⁻⁶ K⁻¹

Wärmeleitfähigkeit λ bei 64° C: 1,04 W/m²K

Charakteristische Biegezugfestigkeit nach DIN 52112: ca. 35 N/mm²

Brandschutzklasse A1 / EN 13501-1

7) GLASBAUSTEINE, GLASZIEGEL

Das Material Vollglasziegel ist ein Gussglas Erzeugnis und wird z.Zt. nur im Innenbereich auf Grund seiner Wärmeleitfähigkeit eingesetzt. Die Oberflächenstruktur ist glatt, glänzend und transluzent. Der Glasziegel besitzt eine Hohe Rohdichte. Je höher die Rohdichte eines Glasziegels ist, umso schwerer ist er. Bei hoher Rohdichte ist auch seine Druckfestigkeit höher und damit auch sein Schalldämmwert sowie seine Wärmeleitfähigkeit bei relativ schlechten Dämmeigenschaften.

Eigenschaften:

Stein-Abmessungen: 200 mm x 100 mm x 50 mm; 100 mm x 100 mm x 50 mm; 200 mm x 100 mm x 100 mm; 100 mm x 100 mm x 100 mm

Rohdichte: 2490 kg/m³

Wärmeleitfähigkeit λ : 0,80 W/m²K

Druckfestigkeit: 349 N/mm²

Brandschutzklasse A1 / EN 13501-1

Abbildung 10

Übersicht ausgewählter Materialien



Übersicht Ocanto; Quellen: Abb. 13.1, Ocanto; Abb. 13.2 Lamberts, Abb. 13.3 de.saint-gobain-building-glass.com. Abb.13.4 Sefar Arch. Vision, Broschüre, Abb. 13.5 - 13.8, Ocanto

2.8 Tageslicht, Transmission und Sonnenschutz

Glas und Tageslicht: Durch Tageslicht wird im Idealfall eine ausreichende Helligkeit in Räumen erzeugt. Gleichzeitig wird eine Sichtbeziehung nach außen hergestellt, was einer subjektiven räumlichen Qualität förderlich ist. Die DIN 5034 - Tageslicht in Innenräumen regelt im Teil 1 in Deutschland die Sichtverbindung nach außen (Siebert, 2020). Hierbei werden verschiedene Regularien beschrieben, die bei der Planung zu berücksichtigen sind. Nach der DIN 5034 soll die Breite des durchsichtigen Teils der Fassade mindestens 55 % der Raumbreite betragen und mindestens 30 % der Außenwandflächen. Die Unterkante der transparenten Fläche sollte dabei nicht mehr als 90 cm und die Oberkante mindestens 220 cm über OK-Fußboden liegen. Weiterführende Anforderungen sind in der Arbeitsstätten-Richtlinie zu entnehmen. Hier wird berücksichtigt, ob ein Raum vorwiegend sitzend oder stehend genutzt wird. Die Unterkante der transparenten Fläche soll zwischen 85 cm und 120 cm liegen. Die Höhe der Fenster sollte mindestens 125 cm und die Breite mindestens 100 cm betragen. Die Fensterfläche wird abhängig von der Raumtiefe definiert. Bei Raumtiefen von bis zu 5 m muss die Fensterfläche mindestens 1,25 m² betragen, darüber mindestens 1,50 m². Zur Beurteilung der durch das Tageslicht erzeugten Helligkeit in Räumen dient der Tageslichtquotient. Dieser Wert gibt das Verhältnis von Beleuchtungsstärke im Raum zur gleichzeitig im Freien zur Verfügung stehenden Beleuchtungsstärke auf die Horizontale an. Er gilt nur für diffuses Tageslicht, bei bedecktem Himmel. Die Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel liegen zwischen 5.000 lux und 20.000 lux. In der DIN 5034 werden ebenfalls die Mindestwerte für den Tageslichtquotienten für einseitig und zweiseitig tagesbelichtete Räume vorgegeben. Jedoch ist bei der tageslichttechnischen Planung zu berücksichtigen, dass dies eben nur absolute Minimalwerte sind. Für einseitig beleuchtete Räume ist ein mittlerer Tageslichtquotient von 0,9 % erforderlich, bei zweiseitig beleuchteten Räumen erhöht dieser sich auf 1 %. Bei einer Aussenbeleuchtungsstärke von 10.000 lux und einem Tageslichtquotienten von 1 % ergibt sich eine Beleuchtungsstärke von 100 lux, was gerade einmal ein Fünftel der erforderlichen Beleuchtungsstärke (bei Kunstlicht) darstellt.

Nutzung des Tageslichts: Die Anordnung der transparenten Bauteile (Fenster und Fassaden) sowie die Geometrie der Räume bestimmen den Anteil des nutzbaren Tageslichts. Ziel der Tageslichtnutzung ist eine blendfreie gleichmäßige Raumausleuchtung. Das Seitenlicht über dem Fenster ist die am meisten verbreitete architektonische Tageslichtkomponente. Die Tageslichtverteilung eines seitenbelichteten Raumes ist für bedeckten und klaren Himmel zu ermitteln. Die Richtwerte für die Beleuchtungsstärken im Freien liegen zwischen 10.000 lux und 80.000 lux (Siebert, 2020). Die Fenstergeometrie, Fenster- und Brüstungshöhen etc. beeinflussen die Tageslichtnutzung. In Fensternähe ist die Beleuchtungsstärke sehr hoch, was ggf. zu Blendungs- und Überhitzungsproblemen führt. Mit zunehmender Raumtiefe nimmt auch das Beleuchtungsstärken-Niveau ab.

Oftmals verstärkt die notwendige Aktivierung des Sonnenschutzes noch das Problem der ungleichmäßigen Beleuchtungsstärken, was in der Folge dazu führt, dass Kunstlicht eingeschaltet werden muss, um das Defizit auszugleichen. Je nach Material und Lage des Sonnenschutzes kann zusätzlich eine Erwärmung des Raumes stattfinden (z.B. eine Aluminium-Jalousie kann bei direkter Besonnung Oberflächen-Temperaturen über 40° C erreichen, dies entspricht ein Temperaturniveau einer Niedertemperatur-Heizung). Aus diesem Grund wird außenliegender Sonnenschutz ausdrücklich empfohlen, da hier die Wärme an die Außenluft abgegeben werden kann. Dachüberstände können vor besonders hoch stehender Sonneneinstrahlung und Blendung im Sommer schützen, aber auch das gesamte Fenster verschatten.

Das Oberlicht (eine Tageslichtöffnung in der Decke) verbessert die Beleuchtungsverhältnisse im Vergleich zum Seitenlicht deutlich. Hier sollte eine direkte Einstrahlung vermieden oder durch Reflexion verhindert werden, um eine gleichmäßige Ausleuchtung zu ermöglichen. Da die Beleuchtungsstärke mit zunehmender Raumtiefe sinkt und in unmittelbarer Fensternähe ein Lichtüberschuss besteht, sind Maßnahmen zur Regulierung erforderlich. Es können Lichtlenksysteme, teils kombiniert mit Sonnenschutzsystemen, zum Einsatz kommen. Diese werden meist als reflektorische oder prismatische Systeme ausgeführt. Dabei wird eine hohe Tageslichtausbeute bei einem niedrigen Energiedurchlassfaktor (geringe Erwärmung) und hoher Lichtdurchlässigkeit erreicht.

3 Klebetechnik

3.1 Allgemeines

Innovative Verbindungstechnologie des 21. Jahrhunderts

Im Gegensatz zu anderen Fügeverfahren, wie z. B. Schrauben, Schweißen oder Nieten, hat das Kleben keine nachteiligen Auswirkungen auf die zu verbindenden Teile. Es gibt keine Unterbrechungen durch Löcher, die Spannungskonzentrationen erzeugen und die optisch glatte und ebene Oberfläche der Füge Teile stören. Ein wichtiger Vorteil von Klebeverbindungen in Fassaden ist die Beseitigung von lokalen Wärmebrücken im Vergleich zu Schraubverbindungen. Aus diesen Gründen ist das Kleben eine sehr nützliche Verbindungsmethode für Fassadenanwendungen. Silikondichtstoffe mit geringer Festigkeit, die elastisch und dauerhaft sind, werden seit langem im Fassadenbau eingesetzt.

Der Europäische Klebeverband Afera schätzt den europäischen Gesamtmarkt für Kleb- und Dichtstoffe auf 17 Milliarden Euro und eine Wachstumsrate von jährlich 4 Prozent. Nach Informationen von Feica (Europäische Klebstoff- und Dichtstoffindustrie) werden in Europa jedes Jahr etwa 5 Millionen Tonnen Kleb- und Dichtstoffe hergestellt und verwendet. Es werden von Herstellern mehr als 250.000 verschiedene Produkte für unterschiedliche Anwendungen angeboten.

In Deutschland wird die Produktion vom Industrieverband Klebstoffe auf jährlich mehr als 1,5 Mio. Tonnen sowie eine Milliarde Quadratmeter Klebebänder- und Folien geschätzt. Die generierte Wertschöpfung, die durch den Einsatz von Klebetechnik entsteht, beträgt über 400 Milliarden Euro. Dieser Betrag entspricht ca. 50 Prozent des Beitrags des produzierenden Gewerbes und der Bauwirtschaft zum deutschen Bruttoinlandsprodukt (BIP). Nach dieser Aussage kann man behaupten, dass 50 Prozent der in Deutschland produzierten Waren und Baudienstleistungen mit Klebstoffen in Verbindung stehen (dpa: 210803-99-678525/5). Klebstoffe und Klebeverbindungen sind nun kein Neuland sondern unerlässliche Bauprodukte und Verbindungstechniken im Bauwesen, die ein erst zu nehmendes weites Feld zur Forschung im Bauwesen darstellen.

Im Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL wurden die Verbindungen von Vakuumglas und transparenten und transluzenten Materialien untersucht, um den Wärmeschutz der entstandenen Hybride (Composite) zu optimieren. Dazu wurden Klebeverbindungen durch Laminierungsverfahren mit Dicht- und Klebstoffen durchgeführt.

Kleben – Die Verbindungstechnik für hybride multifunktionale Bauelemente

Hybride Bauelemente oder Konstruktionssysteme bieten die Möglichkeit, teure, leistungsfähige Werkstoffe wie CFK oder Stahl mit relativ kostengünstigen, oft weniger leistungsfähig oder energieeffizient angesehenen Materialien wie Beton oder Holz interessant zu verbinden und damit die Vorteile aller Materialien zu kombinieren oder weniger effiziente Materialien mit hocheffizienten zu ersetzen. Da es sich hierbei oft um grundlegend verschiedenartige Werkstofftypen handelt, ist es meist nur mit Hilfe von neuartigen Klebeverbindungen möglich, einen sicheren, tragfähigen und dauerhaften sowie energieeffizienten Verbund herzustellen. Holz/Beton-Verbundsysteme sind ein gutes Beispiel für solche, hybride Strukturen, bei denen der Verbund zwischen Holz und Beton über Klebeverbindungen dauerhaft erreicht wird. Die nächste Stufe bei der Entwicklung solcher multifunktionalen hybriden Bauelemente besteht darin, die verschiedenen Werkstoffe mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften und Material-Kennwerten nicht nur bei der Statik und beim Lastabtrag sondern auch funktional nutzbar zu machen.

Heute werden die bauphysikalischen Anforderungen an die Gebäudehülle überwiegend durch einzelne additiv zusammengefügte Schichten ihrer Funktionen nach z. B. als Abdichtung gegen Regenwasser mit der

Windsperre, Wärmedämmung mit der Dampfsperre oder auch mit der Gebäude-Aussenhaut erfüllt. Zukünftig können wir strukturelle Elemente anbieten, die schon beim Entwurf gezielt nach Ihren Eigenschaften und Material-Kennwerten ausgewählt und bauphysikalisch effektiv ausgelegt und kombiniert werden, so dass sie von Beginn an mehrere wichtige Funktionen übernehmen können. Einfache multifunktionale Strukturen sind zum Beispiel Stahl-Glas- bzw. Holz-Glas-Verbundsysteme, bei denen das Glas einerseits als lichtdurchlässige Gebäudehülle fungiert, andererseits zudem statisch dem Lastabtrag dient.

Das Prinzip der multifunktionalen Tragwerke bzw. Bauelemente lässt sich beliebig variieren und erweitern. Dies führt nicht nur zu architektonisch ansprechenden Formen, sondern auch zu rationaleren und kostengünstigeren, sowie energieeffizienteren, nachhaltigeren und wiederverwertbaren Konstruktionen.

So lassen sich die unterschiedlichen Materialien mit ihren verschiedenen leistungsfähigen Funktionen und Kennwerten, auch teure Hochleistungs-Materialien, so mehrfach nutzen. Da bei den neu entwickelten Bauelementen meist grundlegend verschiedene Werkstoffe zu multifunktionalen Baugruppen zusammengesetzt werden, ist die Klebetechnologie oft die einzig sinnvolle Verbindungstechnik.

Klebetechnik bei Hybriden Systemen – Sicherheit

Geklebte Verbindungen im Bauwesen, insbesondere solche, die Lasten abtragen sollen, werden oft mit einer gewissen Skepsis betrachtet und nachweislich noch mit nicht notwendigen mechanischen Sicherungssystemen ergänzt, obwohl sie längst schon wie bei dem Brettschichtholz – früher auch »Leimholz« genannt – genormt sind. Dabei gibt es Klebstoffe für nahezu jede spezifische Anforderung, um beispielsweise besonders hohe Festigkeiten oder eine gute Wind-Dichtheit zu erzielen und diese auch über lange Zeit und harten klimatischen Umwelt-Bedingungen erhalten bleiben und ihre Funktionen ohne Mängel erfüllen.

Schon heute nach dem Stand der Technik und Forschung ist es möglich Klebeverbindungen herzustellen, die unter extremen Bedingungen dauerhaft ihre Ansprüche erfüllen, dabei erreichen neu entwickelte hybride Bauelemente einen hohen Grad an Nachhaltigkeit und sollen zu aller erst durch ihre Elementarisierung wieder verwendbar und somit auch umweltfreundlich wieder zu lösen und an einem anderen Gebäude oder auch für den Neubau wieder mit der Konstruktion neu zu verbinden sein. Es stehen schon heute und in naher Zukunft für die Bemessung geklebter Bauteile und Hybride Bauelemente sowie für die Ermittlung ihrer Leistungsfähigkeit die dazu gehörenden Kennwerte zu Verfügung. Es gibt mittlerweile für jeden erdenklichen Fall abgesicherte Verfahren.

3.2 Geklebte Glaskonstruktionen, Klebeverbindungen

Kleben zur Übertragung von Kräften zwischen Glas und Rahmenbauteilen oder zwei Glasbauteilen untereinander ist heute ein angewandter stofflicher Verbund im Glasbau. Durch das Laminieren, das vollflächige Aufeinanderkleben von Schichten, entsteht z.B. Verbundglas und Verbundsicherheitsglas (VSG). Isoliergläser werden linienförmig geklebt. Punktuelle Verklebungen sind dagegen eher selten, insbesondere da ihre Tragfähigkeit geringer ist.

Klebeverbindungen sind zur Aufnahme von Zug- und Druckkräften geeignet, jedoch Scherkräfte stellen ein Problem dar. Die Kräfte werden senkrecht und parallel zur Verbindungsfläche durch Adhäsions- und Kohäsionsmechanismen übertragen. Unterschieden werden Verklebungsmaterialien und Dichtstoffe. Ein Dichtstoff ist kein Kleber im Sinne einer Glasverbindung (Siebert, 2020). Die durch Klebeverbindungen übertragbaren Kräfte sind abhängig von Temperatur, Feuchtigkeit und Belastungsdauer. Bei Brandbeanspruchung versagen die meisten Verbindungen. Sehr wichtig ist die Prüfung der Verträglichkeit unter den verwendeten Kleb- und Dichtstoffen.

Geklebte Glaskonstruktionen werden vorrangig im Fassadenbau eingesetzt und auch im Bereich der Solartechnik finden geklebte Glaselemente Anwendung. Bei Solarpaneelen handelt es sich i.d.R. um aufgeklebte Backrails, für die ebenso die baurechtlichen Anforderungen gelten. Es gibt hier bereits einige Systeme mit Allgemeiner Bauartgenehmigung.

Geklebte Ganzglasfassaden - Structural Glazing-Fassaden (SG) oder Structural-Sealant-Glazing-System (SSG)

Vor allem wegen der hohen Transparenz sind SG-Fassaden für Architekten interessant. Hier werden durch die Verklebungen (meist Silikone) Windlasten planmäßig abgetragen. Structural Glazing ist ein in Deutschland zulassungspflichtiges Bauteil und unterliegt den Vorgaben des Baurechts. Allerdings gibt es in Deutschland noch keine normativen Vorgaben, daher müssen diese Anwendungen im Einzelfall nach den Leitlinien für Europäische Technische Zulassungen (ETAG 002) bewertet werden (Siebert, 2020). Im Geltungsbereich des deutschen Baurechts sind nur Konstruktionen zulässig, die dem Typ I oder Typ II der ETAG 002-1 entsprechen.

Lastabtragende Verklebungen dürfen nur unter besonders definierten Bedingungen im Werk gefertigt werden. Der Produktionsbetrieb muss für SG-Klebeverbindungen zugelassen sein. In Deutschland müssen SSG-Systeme über eine Allgemeine Bauartgenehmigung verfügen. Ist dies der Fall und soll dieses System zur Anwendung kommen, sind alle Vorgaben des Systemherstellers zu beachten.

Weichen die Planungen von der Zulassung ab muss Rücksprache mit dem Systemhersteller gehalten werden. In der Regel muss dann eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) für dieses System bezogene Bauartgenehmigung erwirkt werden. Geklebte Ganzglasecken müssen statisch nachgewiesen werden.

Systeme, die in der Klebung zur Anwendung kommen, setzen sich aus den nachfolgenden drei Bestandteilen zusammen:

- Oberfläche der Tragkonstruktion: anodische Oxidation des Aluminiums oder Edelstahls in verschiedenen Oberflächenbehandlungen und Qualitäten
- zugelassener SG-Klebstoff
- Oberfläche des eingesetzten Glases, bei Floatglas beständige Glasbeschichtungen oder emaillierte Oberflächen

Die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die einzelnen SG-Systeme enthält alle Angaben zu den einzusetzenden Oberflächen, Klebstoffen und Konstruktionen. Auch der mechanische Lastabtrag und das Haltesystem für Verglasungen mit einer Einbauhöhe über 8 m sind hier geregelt.

Bei der Ausführung der Klebung sind ein hohes Maß an Exaktheit und eine sehr genaue Qualitätssicherung erforderlich, damit die Voraussetzungen für eine dauerhafte Verklebung gegeben sind. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Kontaktfläche zwischen Klebstoff und den Rahmenmaterialien sowie der Qualität der Ausführung des Mehrscheibenisolierglases (Siebert, 2020).

Der Typ der Klebung, der zum Einsatz kommt, wird meistens durch die angestrebte Optik und Architekturwirkung geprägt, dabei ist die Lage der Klebefuge innerhalb der Fensterkonstruktion sehr wichtig. Bei einer Verklebung in Position 4 muss i.d.R. nicht mit stehendem Wasser gerechnet werden und auch die auftretenden Temperaturspitzen sind wesentlich geringer als bei einer Klebung auf Position 2. Ähnlich verhält es sich hinsichtlich der UV-Beständigkeit. Trotzdem ist bei einer Klebung im Falzgrund eine gewisse UV-Beständigkeit des Klebers erforderlich, da durch Reflexionen über die Oberflächen des Glases UV-Strahlung auf die verschatteten Klebeflächen treffen kann.

3.3 Direkt-Verklebung

Unter Direkt-Verklebung wird im Forschungsprojekt die vollflächige Verbindung von Glasscheiben mit einer oder mehreren Scheiben aus Glas oder anderen Materialien mittels eines Verbundmaterials aus Kunststoff definiert.

Im Grunde wird es laminiert. Das Endprodukt, die Laminat, entstehen durch die Verbindung zweier oder mehrerer Glasscheiben mittels elastischen, reißfesten Folien z.B. aus Polyvinylbutyral (PVB), Ionoplasten wie beispielsweise die Folie SentryGlas (SG), Ethylenvinylacetat (EVA), Sonderfolien wie thermoplastisches Polyurethan (TPU) oder durch Gießharze. Gießharze werden nicht als Folienmaterial verarbeitet, sondern in den Zwischenraum der Glasscheiben eingegossen. Sie sind als Einkomponenten-Material mit Aushärtung unter UV-Licht oder auch als Mehrkomponenten-Material verfügbar.

Die Einkomponenten-Materialien haben Vorteile bei der Verarbeitung, bei Mehrkomponenten-Materialien werden besondere Mischanlagen benötigt.

3.4 Lineare Verklebung

Unter linearer Verklebung werden im Projekt die Verbindungen bezeichnet, die auf einer Linie verlaufend durchgeführt werden. Bei einer linearen Verklebung von zwei oder mehreren Teilen wird in der Regel bei Verglasungen nur am Rand der zu verklebenden Teile ein Klebstoff linienförmig aufgetragen.

In der gegenwärtigen Zeit werden die zweistufigen Randverbundsysteme linear verklebt, um ein dauerhaft hermetisch dichtes System zu erhalten. Nach Produktnorm für Isolierglas DIN EN 1279 hat die Primärdichtung aus dauerplastischem Polyisobutylen (Butyl) die Funktion einer Dampfsperre. Die Sekundärdichtung aus Polysulfid, Polyurethan oder Silikon hat in erster Linie die statische Funktion den Gesamtaufbau zusammen zu halten.

Beide Klebestufen wirken zusammen, um eine dauerhafte Dichtheit gewährleisten zu können. Auf Grund von Umgebungsluftdruck sowie Temperaturänderungen kommt es im Randverbund zu Zug- und Druckbelastungen. Das viskoplastische Butyl kann aber Belastungen nicht aufnehmen, so dass der Sekundärdichtstoff diese Aufgabe übernimmt und das Butyl entlastet, um die Einwirkungen auf das Butyl so gering wie möglich zu halten. Der Sekundärdichtstoff wirkt also auch bei der Systemdichtigkeit mit.

Silikone sind im direkten Vergleich zu Polysulfid od. Polyurethan sehr diffusionsoffen. Dabei ist das anorganische Silikon UV-beständig, da dessen chemische Bindungen sehr stabil sind. Bei der geklebten Ganzglasfassade bezeichnet als Structural-Sealant-Glazing (SSG) muss Silikon als Sekundärdichtstoff verwendet werden. Silikon besitzt ein höheres E-Modul. Durch die höhere Steifigkeit werden Verformungen im Bereich des Randverbundes der Verglasung reduziert und die Primärdichtung weniger belastet. So wird eine verbesserte Dauerhaftigkeit erzielt.

Die geklebten Ganzglasfassaden werden linienförmig geklebt und müssen definierten Voraussetzungen folgen. Als Klebstoffe sind nur spezielle Silikone mit hohem Haftvermögen, grosser Materialfestigkeit und Elastizität zulässig. Die Silikonklebstoffe sollten die Europäische technische Bewertung (ETA = European technical assessment) besitzen. Zugelassene Klebstoffe haben eine ETA (Europäisch technische Bewertung) auf Basis der ETAG 002. Die ETAG 002 weist folgende Structural-Glazing Typen aus:

- Typ I: Das Eigengewicht wird mechanisch abgetragen. Ein mechanisches Rückhaltesystem für den Fall des Versagens besteht.
- Typ II: Das Eigengewicht wird mechanisch abgetragen. Ein mechanisches Rückhaltesystem für den Fall des Versagens der Verklebung besteht nicht.
- Typ III: Das Eigengewicht wird über die Verklebung abgetragen. Ein mechanisches Rückhaltesystem für den Fall des Versagens der Verklebung besteht.
- Typ IV: Das Eigengewicht wird über die Verklebung abgetragen. Ein mechanisches Rückhaltesystem für den Fall des Versagens der Verklebung besteht nicht.

In Deutschland sind nur die Typen I und II zugelassen. Ab einer Einbauhöhe von $H > 8$ m sind nur noch Fassaden des Typs I zugelassen.

Die geklebten Fassadensysteme benötigen als unregelmäßige Bauart eine Allgemeine Bauartgenehmigung oder eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung.

3.5 Verträglichkeit

Definition

Unverträglichkeit nennt man die Wechselwirkung zwischen unterschiedlichen Materialien eines Gesamtsystems, bei welcher sich eine oder mehrere der Systemkomponenten in Ihrer Funktion negativ beeinflussen. Ursache sind Migrationsprozesse von Stoffen unterschiedlicher Konzentration aus direkt oder indirekt miteinander in Kontakt stehenden benachbarten Materialien, die sich gegenseitig beeinflussen.

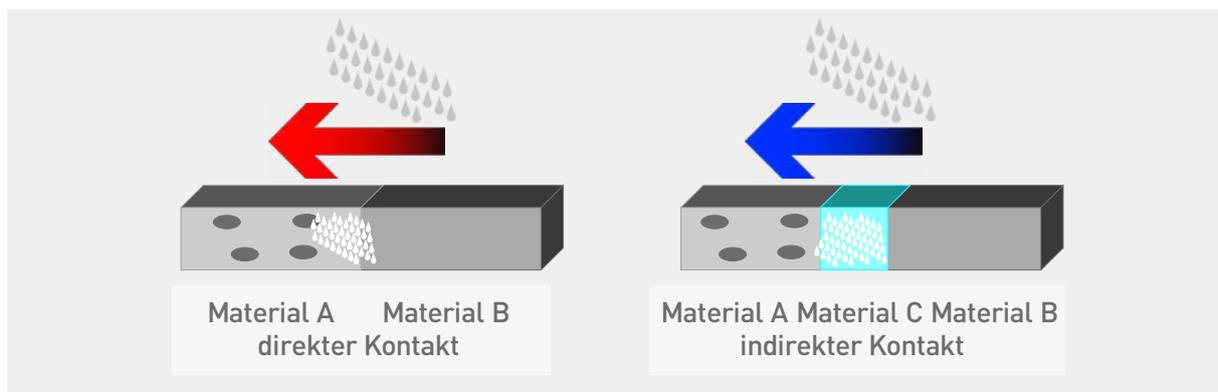
Prävention ist die Pflicht des Systemherstellers und erfordert folgende grundsätzliche Fragestellungen:

- Welche Einbausituation und welche Umgebungsbedingungen liegen vor?
- Welche Komponenten stehen im direkten oder indirekten Kontakt?
- Enthalten sie mobile Substanzen (Lösungsmittel, Öle, Weichmacher etc.)?
- In welchen Mengen liegen diese vor?

Diese Fragestellungen werden nur durch Laborversuche in der Praxis der Verträglichkeit der eingesetzten Stoffe nahe kommen.

Abbildung 11

Auswirkungen des Stoffaustausches, nach ift-Richtlinie DI-01



Quelle: Ocanto

Abbildung 11 beschreibt die Auswirkungen des Stoffaustausches zwischen unterschiedlichen miteinander in Kontakt stehenden Materialien, z.B. Dichtstoffe eines Isolierglasrandverbundes mit:

- Klotzmaterialien
- Dichtstoffen in Glasfalz und/ oder Wetterfuge
- Klebstoffe (z.B. bei Structural glazing)
- Verbundfolien im VSG

Normen und Richtlinien

Folgenden Normen und Richtlinien regeln die Verträglichkeit von Materialien mit Kleb- und Dichtstoffen:

ETAG 002, Paragraph 5.1.4.2.5 (bzw. ASTM C-1087)

Ist - Richtlinie DI-01 (2009) „Verwendbarkeit von Dichtstoffen“

- Teil 1: Prüfung von Materialien im Kontakt mit IG-Randverbund
- Teil 2: Prüfung von Materialien im Kanten-Kontakt mit VSG
- QKE, Bonn: RAL 716 Teil 3: Verklebte Verglasungen in PVC-Rahmenkonstruktionen

Sonstige Nennung in:

- DIN 52460 „Fugen- und Glasabdichtungen, Begriffe“
- DIN 18545-3 „Abdichtung von Verglasungen mit Dichtstoffen, Verglasungssysteme“.

Laborversuch nach ETAG 002 § 5.1.4.2.5.

Im Laborversuch nach der o.g. Richtlinie werden folgende Beurteilungskriterien aufgelistet:

- A: Verfärbung des hellen oder dunklen Dichtstoffes (siehe Tabelle 4)
- B: Adhäsion des Dichtstoffes auf Glas
- C: Adhäsion des Dichtstoffes auf dem Komplementär - Material
- D: Reiß- oder Runzelbildung auf der Dichtstoff-Oberfläche
- E: Öl- Film auf der Dichtstoff-Oberfläche

Tabelle 4

Beurteilungskriterien ETAG 002 § 5.1.4.2.5

N = None	Compatible for all Applications
VVS = Very, very slight – thin yellow line of discoloration at the interface between the gasket and the sealant	Compatible for Non Structural Applications
VSL = Very slight – a light yellow discoloration	Compatible for Non Structural Applications
SL = Slight – a light yellow to dark yellow discoloration	Compatible for Non Structural Applications
SE = Severe – a dark yellow to dark brown yellow discoloration	Compatible for Non Structural Applications
SL = Very severe – a brown or greenish or blackish discoloration	Incompatible

Quelle. Ocanto

Chemische Verträglichkeit am Beispiel Fassade

Die Verträglichkeit des Kontaktes der Wetterabdichtung mit dem Randverbund muss sichergestellt werden. Wetterabdichtung, Randverbund und Primärabdichtung müssen miteinander verträglich sein, daher soll eine Herstellerbestätigung vorhanden sein. Unverträglichkeiten können als Folge von Weichmachermigration das Butyl ablösen und die Primärabdichtung (gas-/Wasserdampfdichtigkeit) zerstören. Unverträglichkeiten können negativen Einfluss auf die Adhäsion der Dichtstoffe haben. Dichtstoffe müssen grundsätzlich hinsichtlich ihrer chemischen Verträglichkeit miteinander geprüft und freigegeben sein, bevor sie in die Anwendung kommen.

Dichtstoffe Verträglichkeit:

- Silikon

- Silikon, sauer vernetzend
 - Silikon, neutral vernetzend

- Polyurethan

- Polyurethan, einkomponentig
 - Polyurethan, zweikomponentig

- Polysulfid

- Polysulfid, zweikomponentig

- Acryldispersion

- Acryldispersion, elastisch
 - Acryldispersion, elastoplastisch

- Acryl-Lösemittel

- MS-Polymer

- SMP-Dichtstoff

In der Kombination von Dichtstoffen ist besonders zu beachten:

- keine ungeprüften Materialkombinationen verwenden (PS/SI, PU/AC, SI/SI usw.).
- Auch in der Kombination Wetterabdichtung/Isolierglas müssen alle Komponenten chemisch miteinander verträglich sein (durch eine schriftliche Bestätigung des Herstellers).
- Verträglichkeitstest sind oft nur Momentaufnahmen.
- Fugendimensionierung und maximale Fugentiefen beachten.

Fugendimensionierung

Die Fugendimensionierung ist als wichtiger Aspekt zu berücksichtigen, zu grosse Fugendimensionen (zu tiefe Fugen) führen bei einkomponentigen Dichtmaterialien zu einer stark verlangsamten Durchreaktion

(max. Fugentiefen 14-15 mm) - der Austausch von Chemikalien wird begünstigt. Gegebenenfalls können hier zwei-Komponenten Materialien nach vorheriger Prüfung eingesetzt werden. Fugendimensionen für Aussenwandfugen müssen in Anlehnung an DIN 18540 geplant werden und sollen Wetter - und Umwelt verträglich sein.

Beschichtungsumschlag auf Glaskante

Die Haftung und Verträglichkeit des Dicht-/Klebstoffes auf Beschichtungs-Rückständen muss sichergestellt werden, da Beschichtungs-Rückstände auf der Glaskante die Haftung des Dichtstoffes beeinträchtigen können. Ein oftmals mechanisches od. chemisches Nachbehandeln ist für die Beschichtung im Bereich der Kleb-/Dichtstoffe erforderlich.

Kantenüberschlag bei Festmass - Beschichtungen

Im Produktionsprozess werden die Glaskanten undefiniert beschichtet und verursachen Haftverlust bei den Wetterfugen. Dies trifft auch bei Heißlacken im Paneelbau zu, daher ist ein Kantenschutz von der Beschichtung zu fordern. Am besten vor der Festmass-Beschichtung die Glaskanten ankleben.

Verträglichkeit Dichtstoffe mit Dichtprofilen

Untergründe wie Weich-PVC, EPDM, APTK, Neopren, Bitumen- / Teerhaltige Materialien sind in Verbindung mit verschiedenen Dichtstoffen nicht geeignet - Gefahr der Weichmachermigration. Mit Silikon verträgliche Profile sind z.B. die sogenannten Silikonprofile.

Verträglichkeit Dichtstoffe mit Natursteinen

Marmor- / Natursteine sind Untergründe, die ein sehr fein strukturiertes und weit gefächertes Porensystem aufweisen. Weichmacherhaltige Dichtstoffe sind nicht geeignet, da die Weichmacher bei Fugenkompression in den Untergrund abwandern können (Randzonenverschmutzung). Nur spezielle weichmacherfreie „Natursilikone“ sind hier zu verwenden. Diese Betrachtungen gelten auch für Lichtbeton und Glaskeramik wegen ihres fein strukturierten Porensystems. Hierbei sollten die Oberflächen vor dem Kleben behandelt bzw. beschichtet werden.

Verträglichkeiten von Dichtstoffen VSG

VSG - Verbundsicherheitsglas: Laminierte Gläser z.B. mit PVB-Folie (Polyvinylbutyral-Folie) oder Gießharz: PVB-Hersteller bzw. Dichtstoff-Hersteller sind hinsichtlich der Verträglichkeit Folie zu Dichtstoff zu befragen, es besteht hierbei eine Gefahr der Delamination des VSG. Selbst bei verträglichen Materialien sind die Fugentiefen nicht zu tief zu wählen, da ein längerer Einfluss des Spaltproduktes auf die Folie negative Auswirkungen haben kann. PVB-Folien mit Schallschutz-Eigenschaften haben einen höheren Anteil an Weichmachern als normale Baufolien und sind noch nicht sehr lange auf dem Markt. Die Verträglichkeit mit Gießharzen vom Hersteller des Gießharzes bzw. Dichtstoff-Herstellers ist einholen. Gießharze sind wesentlich empfindlicher hinsichtlich ihrer Verträglichkeit zu Dichtstoffen als z.B. PVB-Folien.

Schadensfälle:

Schadenfällen bei VSG können ausgelöst werden durch:

- Verarbeitung, Vorspannung auf Laminat
- Folienprobleme (Adhäsion, Weichmacherproblematik, Alterung)

- Bewegung, abhängig von Einbausituation, Tiefe und Glasformat
- chemische Wechselwirkung mit angrenzenden Materialien
- Wasser- oder Dampfeinwirkung

Verträglichkeiten von Materialien mit Dicht-Klebstoffen sollten immer im Einzelfall abgeprüft werden. Kunststoffe (EPDM, APTK, Neopren, Chloropren, Weich-PVC,...) welche organische Weichmacher oder Lösemittel enthalten, sind im Direktkontakt mit Silikondichtstoffen kritisch. Besondere Vorsicht ist nötig bei Direktkontakt zwischen verschiedenen Dichtstoff-Typen (PS, PU, Silikon), Bestätigungen durch beide Hersteller sind sinnvoll. Bei Verfüugung zwischen Isoliergläsern nur die empfohlenen, freigegebenen und geprüften Dichtstoffe verwenden. PVB-normale Baufolien werden im Regelfall als verträglich eingestuft. PVB-Schallschutzfolien sind dabei kritischer. Gießharze sind auch kritisch in Abhängigkeit vom Typ zu betrachten. In einer Laborprüfung wird untersucht, ob chemische Wechselwirkungen bei Direktkontakt mit dem betreffenden Dichtstoff und einem bestimmten Material auftreten (Beschleunigung durch Wärme, Feuchte und UV-Licht), reale Komplexität von Einflüssen kann dabei nicht simuliert werden.

3.6 Eingesetzte Klebstoffe im Projekt, Eigenschaften

Im Projekt sind drei Klebstoffe des Projektpartners DOW eingesetzt worden:

DOWSIL 2400 wurde für die Montage und lineare Verklebung der Vakuumglasscheiben mit den ausgewählten Materialien der verschiedenen Glasaufbauten verwendet. Das DOWSIL 2400 ist farblos bzw. glasklar. Bei Aushärtung wird es absolut durchsichtig. Diese Eigenschaft passte gut in das Klebekonzept des Vakuumglass-WALL Projektes.

DOWSIL EI-2888 wurde für die Abfüllung des entstandenen Zwischenraumes der Glasaufbauten benutzt. Dieses flüssige glasklare Gieß-Silikon wurde nicht als Klebstoff benutzt, sondern als Füllstoff, wegen der Transparenz und des guten Lichttransmissionswertes (Lichttransmission LT = 90% bei 350nm und LT >9 3% bei 400-800 nm). In Kombination mit dem DOWSIL 2400 wird optisch kein Material-Übergang wahrgenommen und ist bestens für das Laminierungskonzept des Projektes geeignet.

DOWSIL 3364 Warm Edge IG Sealant wurde für die geplanten Außendichtungen an der Fassadenkonstruktion im Fassadensystem RAICO THERM+ A-I verwendet. Wegen seiner geringen Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 0,186 \text{ W/mK}$) war es die geeignetste Wahl im Rahmen der konstruktiven Maßnahmen der Projektziele.

Beschreibung der Klebstoffe

DOWSIL 2400 Silicon-Montagedichtstoff ist ein neutral aushärtender 100-prozentiger Silikondichtstoff, der für die anspruchsvollen Anforderungen eines Dichtstoffs für die Hinterfütterung bei der Hochgeschwindigkeitsfertigung von Fenstern und Türen entwickelt wurde. DOWSIL 2400 Silicondichtstoff liefert für die Montage eine sofortige gute Anfangs-Festigkeit, um die Produktivität bei Backbedding-Anwendungen zu verbessern. Mit DOWSIL 2400 Silicon-Montagedichtstoff hergestellte Fenster können sofort verarbeitet werden ohne dass die Integrität der Dichtung beeinträchtigt wird oder sich der Fensterflügel verzieht. Es kann auf die meisten gängigen Fenstermaterialien für Standard- und Stoßverglasungen aufgetragen werden und ist auch mit den meisten Isolierglasdichtstoffen kompatibel. DOWSIL 2400 ist ein Schmelzklebstoff. Schmelzklebstoffe oder Hotmelt genannt, sind lösungsmittel- bzw. wasserfrei sowie bei Raumtemperatur mehr oder weniger feste Produkte, die im heißen Zustand als viskose Flüssigkeit vorliegen und auf die Klebefläche aufgetragen werden. DOWSIL 2400 Silicon-Montagedichtstoff ist in klarer Farbe erhältlich.

DOWSIL™ EI - 2888 Grundierungsfreies Silikon-Vergussmittel-Kit. Geeignet für die Verkapselung von starren und flexiblen Leiterplatten für LED-Beleuchtung im Innen- und Außenbereich, explosionsgeschützte und hochgradig schutzgeprüfte Leuchten sowie Außenanzeigen auch für raumfahrttaugliche Anwendungen. Dowsil EI-2888 ist eine patentierte Technologie von Dow. Es ist ein optisch klares 2-Komponenten Silikon-Vergussharz mit allen Vorteilen eines Silikonproduktes und mit extra guter Haftung ohne Primer. Dowsil EI-2888 besitzt eine gute Haftung auf eloxiertem Aluminium, Glas, FR4, Stahl, Edelstahl, PC, PBT und Kupfer. Um diese Haftung zu erhalten, benötigt man keinen Primer. Dies ist einzigartig für ein 2-Komponenten-Silikon, das bei Raumtemperatur aushärtet. Die Haftung ist auch nach 2000 Stunden Einwirkung unter folgenden Bedingungen noch ausreichend:

- + 150°C Dauertemperatur und + 85°C/85% relativer Luftfeuchtigkeit
- Thermoschocktest: -40°C – 150°C
- UV-Licht-Exposition

Das Dowsil EI-2888 ist ein 2-Komponenten-Produkt mit einem Mischungsverhältnis von 1:1. Durch die niedrige Viskosität von Teil A (2000 mPa.s) und Teil B (2300 mPa.s) können die 2 Komponenten sowohl manuell als auch mit dynamischen oder statischen Mischern leicht gemischt werden. Eine Entlüftung unter Vakuum ist nicht erforderlich.

Physikalische Eigenschaften:

- Härte: Nach dem Aushärten bei Raumtemperatur entsteht ein flexibles, aber starkes Produkt.
- Nach 21 Tagen erreicht Dowsil EI-2888 eine Härte von 60 Shore 00 oder 10 Shore A.

Optisch klare Silikonharze sind nicht nur feuchtigkeitsbeständig, sondern absorbieren auch thermische Belastungen. Ihre hohe Lichtdurchlässigkeit und thermische Stabilität sorgen dafür, dass die Lichtqualität über einen langen Zeitraum erhalten bleibt. Silikone haben ihren Vorteil gegenüber Epoxiden unter extremen Bedingungen bewiesen. Die Erzielung der Haftung war bei vergleichbaren Produkten jedoch immer noch ein Problem, eine Oberflächenvorbereitung war oft erforderlich. Dieser zusätzliche Prozessschritt ist bei der Verwendung von Dowsil EI-2888 völlig unnötig.

DOWSIL™ 3364 Warm Edge IG Sealant ist ein Isolierglassilikon und zeichnet sich durch seine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit aus. Es trägt dazu bei, die Energieeffizienz der gesamten Fassade zu verbessern und hilft zudem, die Innen - Oberflächentemperaturen zu erhöhen und damit das Kondensatrisiko zu verringern. DOWSIL™ 3364 Warm Edge IG Sealant ist ein hochmoduliges, 2-komponentiges Silikon für den Isolierglasrandverbund und geeignet für Luft- und gasgefüllte Isolierglasfenster bei Fenster und Fassade. Es kann in vielen Bereichen eingesetzt werden:

- Fassadenecken: Randverbund bei Ganzglasecken, Randverbund bei gerahmten Konstruktionen
- Elementfassaden: Rand-/Rahmenbereich, Fensterrahmen
- Isolierglas - Glaskante
- Randbereich bei Toggle Systemen (Eingreifsysteme)

DOWSIL 3364 Warm Edge IG Sealant ist ein hochfestes, 2-komponentiges Silikon, geeignet als Sekundärrandverbund von zwei- / oder dreifach Isolierglas mit Luft- oder Gasfüllung. Anwendungsbereiche sind Isolierglas für Fenster und Fassade.

Eigenschaften:

- Ein um bis zu 5 % niedriger U_{cw} -Wert
- 45% geringere Wärmeleitfähigkeit*
- Bis zu +1°C wärmere Oberflächentemperatur gegenüber konventionellen Isolierglas-Siliconen mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0.35 \text{ W/mK}$
- Getestet gemäß ETAG 002 und EN 1279
- Hohes Elastizitätsmodul - geringere Krafteinwirkung auf das Butyl
- Gute Haftung auf Glas und Abstandhaltern
- Temperaturstabilität: -50°C bis +150°C
- UV- und Ozon beständig

DOWSIL™ 3364 Warm Edge IG Sealant ist patentiert mit europäisch-technischer Zulassung für geklebte Fassaden (ETAG002).

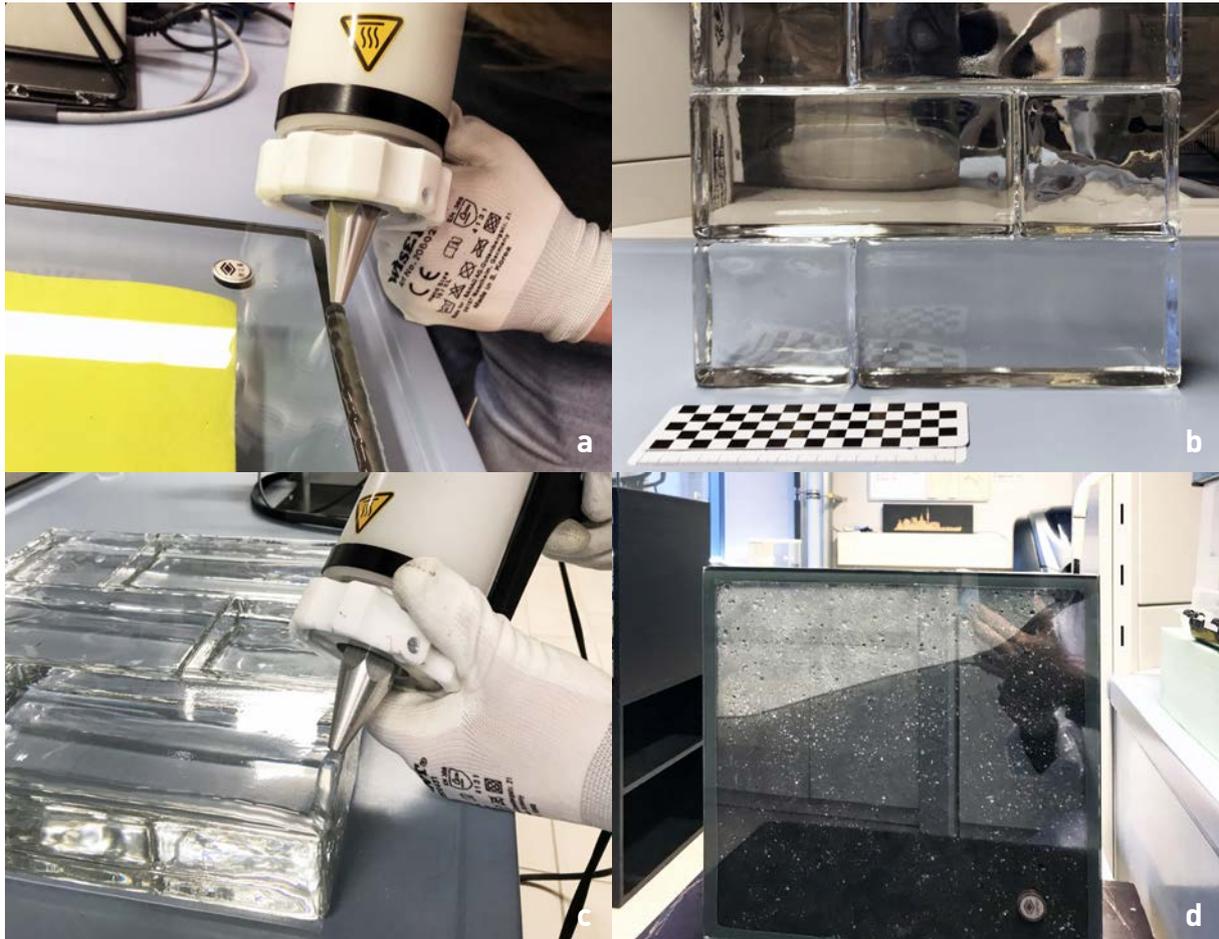
* Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 0.19 \text{ W/mK}$. Die nach EN 12667 bestimmte Wärmeleitfähigkeit des Strukturdichtstoffes beträgt $\lambda = 0,186 \text{ W/mK}$. Die DOWSIL™ 3364 Sealant wird nach EN ISO 10456 mit $0,19 \text{ W/mK}$ deklariert.

Klebekonzept im Forschungsprojekt, direkt Verklebung

Die Direkt-Verklebung wurde im Baustoff-Labor der FH-Dortmund, Fachbereich Architektur durchgeführt. Hierbei wurden zwei Typen von Kleber verwendet, einen Hot-Melt Kleber DOWSIL 2400 für die Ränder, um die Scheiben miteinander zu verbinden und anschließend wurde die resultierende Kavität (ca. 2 - 3 mm) mit Gießsilikon, das neuartige DOWSIL EI - 2888, gefüllt.

Abbildung 12

Klebephasen beim Klebekonzept - direkt Verklebung: a) Klebstoff am den Rand applizieren (hier VG-Scheibe), b) geklebte Teile, c) Klebstoff am Rand applizieren (hier Glasbausteine), d) Kavität mit Gießsilikon befüllen (hier Lichtbeton-Teil)



Quelle: Ocanto

3.7 Rückbau, Recycling, Umwelt

Im Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL liegt der Focus auf Glasaufbauten mit Vakuumglas als Wärmeschutz. Diese Glasaufbauten werden nur möglich durch die direkte oder indirekte Verklebung der ausgesuchten Teile. Damit entstehen interessante Hybride oder Composite, die leider eine bestimmte Lebensdauer wegen Materialermüdung oder Umgebungseinflüsse erreichen. Der Rückbau dieser Glasaufbauten sollte bei deren Konzeption berücksichtigt werden. Dieser Aspekt wurde im Forschungsprojekt bei Materialauswahl und Verbindungsart mit einbezogen. Wie erwähnt sind die entwickelten neuen Aufbauten prinzipiell als Verbundglas konzipiert. Die Zwischenschicht wurde bei allen Materialbeschaffenheiten mit Gießharz laminiert. Die Entscheidung liegt an der Verfügbarkeit und einfachen Handhabung des Gießsilikons der Fa. DOW. Dieser Klebprozess konnte in unseren Laboren durchgeführt werden. Eine Lamination bzw. Verarbeitung von PVB-, EVA- oder TPU-Laminaten könnte nur bei einem Fachbetrieb realisiert werden.

Das Konzept 01 Teil A des Forschungsprojektes VG_WALL sieht eine Direktverklebung vor. Die Direktverklebung als Produktionsverfahren hat sich als relativ unkompliziert erwiesen und das Ergebnis ist effektiv und effizient. Rückbauversuche wurden im Projekt durchgeführt und werden im Kapitel 6 (Versuche) detailliert erklärt. Die Trennung bzw. der Rückbau der Komponenten der Glasaufbauten ist aufwendig aber nicht unmöglich. Die Komponenten werden erstmal mechanisch getrennt und die bei der Trennung entstandenen Rückstände werden ausgewaschen bzw. aufgelöst. Nach dieser Prozedur wurden Komponent- und Abfallmaterial nochmals sortiert und recyclingfähig gemacht. Im Konzept 01 Teil B des Forschungsprojektes VG_WALL wurde eine Linienverklebung vorgeschlagen, da sie weniger invasiver als eine direkte Verklebung ist. Der Glasverbund kann einfacher und umweltschonender rückgebaut werden. Deshalb wurde an eine Linienverklebung der Ränder der Verglasungskomponenten (diverse Glasaufbauten VG + transluzente Materialien) gedacht.

Im Konzept 02 werden die Glasaufbauten nicht geklebt, sondern durch Alu- oder GFK-Profile zusammen gehalten, die Demontage erfolgt mechanisch ohne „entkleben“.

Die ausgewählten Materialien im Projekt: Gussglas, Profilbauglas und Glasbausteine lassen sich problemlos recyceln. Die Glaskeramik ist selbst ein Produkt aus 100% recyceltem Material. Der Lichtbeton ist an sich ein Composite, er kann zerkleinert und gesiebt werden, um die kleinen Kunststoffteile auszusortieren. Das gewonnene Granulat wird anschließend wieder als Kiesersatz zu Beton verarbeitet. Die Klebstoffe bzw. Silikone können gesammelt und depolymerisiert und zu Silikonmonomere verformt werden. Dieses Material wird anschließend zu Silikon-Öl verarbeitet. Das Öl wird auf einer breiten Basis als Schmierstoff im Bereich Industrielmaschinen verwendet.

Der Kernpunkt des Recyclen ist eine sortenreine Trennung und Klassifizierung der Abfälle. In der Bauwirtschaft werden heute i.d.R. Bauabfälle beim Rückbau an der Baustelle sortiert um anschließend an die Deponieanlage transportiert zu werden. Bauabfällen wie Floatglas, VSG und Isolierverglasung legen einen langen Weg zurück bis sie zu sortenreinen, recyclebaren Teilen gewonnen werden können. Um Glas-Lamine zu recyceln müssen diese erstmal zerkleinert, die Scherben mit Trennflüssigkeit chemisch behandelt, nach der Trennung gewaschen und zuletzt getrocknet und sortiert werden. Eine Mechano-chemische Abtrennung von Verbundfolien wie PVB-Folie und den Glasfraktionen erfolgt durch eine Behandlung mit Tensidmischungen. Dieses Verfahren hat sich bisher aus wirtschaftlichen Gründen leider nicht am Markt etabliert. Um recyceln zu können, muss man „entkleben“ können. Klebeverbindungen sind kaum zerstörungsfrei zu lösen. Das Kleben ersetzt reversible Fügeverfahren (wie Schrauben, Nieten usw.). Die Europäische Union fordert „reparierbare“ Produkte, das „Entkleben“ wird nun zu einem intensiven Forschungsfeld. Umwelt Start-Ups wie das Unternehmen saperatec GmbH Dessau, forschen daran und betreiben eine Recycling-Anlage, gefördert von der EU (FO-Programm Horizon 2020). Es handelt sich um eine integrierte Recycling-Anlage von Wertstrom Input über Wertstrom-Aufbereitung, Trennprozessen bis zur Rezyklatsortierung- und Aufbereitung von Abfällen. Solche Unternehmen stellen eine positive und erprobte Zukunftsperspektive für das Recyceln von Kompositen dar.

4 Projektziele und Lösungsansätze

4.1 Formulierung Lösungsansätze

Wie in den vorangegangenen Projekten „Ultraslim“, „Ultralight“ oder „VG-Fassade“ herausgestellt werden konnte, stehen die sehr niedrigen Ug-Werte von Vakuumverglasungen in Scheibenmitte (0,3 - 0,7 W/m²K) einem Glasrandverbund aus Glaslot gegenüber, der eine thermische Schwachstelle des Systems bildet.

Insbesondere beim neu zu entwickelnden Glasstein-System tritt dieses Problem durch die kleinen Glasformate (ca. 0,1 - 0,2 m²) besonders hervor, da der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient anteilig stärker hervortritt. Diesem Problem soll durch den gestaffelten Einsatz zweier Vakuumverglasungen in einem Element begegnet werden. Die neuen VG-Wandaufbauten müssen darüber hinaus alle statischen und bauphysikalischen Anforderungen erfüllen, die auch an opake Außenwände gestellt werden.

Das Dampfdiffusionsverhalten dieser flächig weitgehend diffusionsdichten Systeme wurde untersucht und im Rahmen eines Wärme-Feuchte-Managements (Gradtagzahl, reale Wetterbedingungen) mit Unterstützung durch Entwickler der ETU Software GmbH berücksichtigt.

Die Entwicklung beider Systeme soll hierbei im Hinblick auf Parametrisierung und Einbindung in die Industrie 4.0 erfolgen. Durch die hohe Systemflexibilität bei einer gleichzeitig minimalen Anzahl von Komponenten entstehen kosteneffiziente Bausysteme. Die neuen Systeme sollen insbesondere auch in Bestandssituationen einsetzbar sein und es dort ermöglichen, energetische Gebäudesanierungen schnell und unter Erhalt des optischen Erscheinungsbildes auch in denkmalgeschützten Gebäuden durchzuführen.

4.2 Zielsetzung

Alle auf dem Bausektor verfügbaren transluzenten Bauteile bzw. Systeme können nach GEG heute nur eingeschränkt oder gar nicht verbaut werden - so finden Glasbauwände derzeit nur in Industrie- und Gewerbebau Anwendung. Im Forschungsprojekt „VG-WALL“ sollen daher zwei neuartige hochgedämmte transparente bzw. transluzente Außenwandsysteme entwickelt werden. Die wärmedämmende Funktionsebene ist in beiden Fällen Vakuumglas (VG), das durch Float- und Spezialgläser zu einem Wandsystem ergänzt wird. Erstes Entwicklungsziel ist ein Glasstein-System, in dem Vakuumglas überdeckt eingesetzt wird.

Das System soll alte Glasbausteine aus den 60er/70er Jahren GEG-gerecht ersetzen, dabei zunächst als selbsttragende Konstruktion und nachfolgend als tragende Außenwand entwickelt werden. Zweites Entwicklungsziel sind Bauelemente aus Vakuumglas und Profilbauglas, die, als Ersatz für die energetisch sehr ungünstigen, in Industriebauten jedoch verbreiteten „U-Gläser“, zukünftig zur Ausführung von Außenwänden eingesetzt werden können. Beide neuen Systeme bieten einen für transparente Bauteile bisher nicht erreichten Wärmeschutz. Sie ermöglichen ästhetisch ansprechende Neubaupweisen und Sanierungen durch Aufgreifen der bei Architekten sehr beliebten, jedoch energetisch überholten Gestaltungselementen „Glasbaustein“ und „Glaswand als Außenfassade“ zu realisieren.

Forschungsansatz

Aus den in den Vorgängerprojekten gewonnen Erkenntnissen folgt, dass die konstruktive Überdeckung des Glasrandverbundes von Vakuumglas die Wärmebrückenproblematik in diesem Bereich lösen kann. Durch den Aufbau des neuen Glasstein-Systems entstehen zwei parallele, durchgehende Ebenen aus Vakuumglas in der Gebäudehülle, die allein einen kombinierten Ug-Wert von 0,2 W/m²K oder weniger aufweisen und sich im Bereich des Randverbundes gegenseitig überdecken. Untersuchungen der Forschungsprojekte „Ultralight“ und

„VG-Fassade“ zeigten, dass wenige Zentimeter Überdeckung ausreichen, um Wärmebrücken und damit den Kondensatanfall zu eliminieren.

Der VG-Kern der Glassteine wird außenseitig von Funktions- und Dekorschichten (Spezialgläser, Folien) und raumseitig von lastabtragenden Schichten (Floatglas, TVG, ESG oder VSG) eingefasst. So entsteht ein Schichtaufbau, in dem Bauteileigenschaften einfach durch Anordnung einer entsprechenden Schicht eingestellt werden können.

Die neuen Profilbauglas-Elemente werden so konzipiert, dass mit möglichst wenigen Komponenten eine Außenwand in Schnellbauweise fertiggestellt werden kann. Durch strukturelle Linienverklebung mit Vakuumglas erhält das Profilbauglas eine noch höhere Stabilität. Luftgefüllte Zwischenräume und speziell zu entwickelnde GFK-Hohlprofile stellen die thermisch notwendige Randüberdeckung der Vakuumverglasung her.

4.3 Baukonstruktiver und bauphysikalischer Ansatz

Angestrebt wird die Konzeption und Entwicklung eines multifunktionalen Baumodules für die Gebäudehülle bestehend in erster Linie aus Vakuumglas (Wärmeschutz, Schallschutz), modellierbar nach Anforderung mit ausgewählten transluzenten und transparenten Baumaterialien. Einsatzbereiche: Wohnungs- und Gewerbebau.

Im Forschungsprojekt werden zwei Konzepte untersucht. Konzept 01 wird hauptsächlich aus VG und transparente und transluzente Materialien zusammengesetzt und Konzept 02 setzt sich a) aus VG und Voll-Glasklinker und b) aus VG und Profilbauglas zusammen. Die Glasaufbauten werden an bestehenden Fassadensystemtypen adaptiert bzw. baukonstruktiv angepasst. Die thermischen Leistungen der Glasaufbauten an einem Fassadensystem werden mittels FEM-Simulationen evaluiert. Die Laminierung der Glasteile wird in zwei unterschiedlichen Verfahren untersucht: Eine Direktverklebung vollflächig und eine Linienverklebung an den Rändern der Verglasung mit Abstandhalter. Danach folgt die Herstellung der Prototypen für Last- und Klimaversuche. Zuletzt werden zu Ausstellungszwecke Demonstratoren im Maßstab 1:1 als Wand-Fassadenprobe gebaut. Wegen ihres hohen Detaillierungsgrades wird die Studie nur auf der Ebene der Festverglasung der Fassade durchgeführt.

4.4 Untersuchungsmethodik

1. Ermittlung der aktuellen Anforderungen an transparente Außenwände. Aktualisierung der gesetzlichen Anforderungen an Glas- und lastabtragende Außenwände und Vorhangfassaden. Recherche und Sondierung der in Frage kommenden Produkte mit neuen Materialeigenschaften.
2. Auswahl geeigneter Materialien (Verglasungen, adaptive Folien, Steuerungssysteme, Kleb-/Dichtstoffe, u.a.) durch Vorversuche zur Material- und Fassadensystemfindung, Berücksichtigung wirtschaftlicher und nachhaltiger Faktoren in Kooperation mit den Firmenpartnern.
3. Konzipierung des modularen Schichtenaufbaus für das Glasmodul-System (Konzept 01). Konzeption eines Systems für Wandaufbauten aus neuen VG-Glasmodulen unter Berücksichtigung aller Systemkomponenten.
4. Konzipierung eines Vollglas-Klinker-Systems und eines Profilbauglas-Systems (Konzept 02) mit minimaler Komponentenzahl unter Berücksichtigung aller Systemkomponenten
5. Adaption und baukonstruktive Anpassung der entwickelten Glasaufbauten an ausgesuchten Fassadensystemen Typ Pfosten-Riegel- und Structural Glazing System.

6. Evaluierung der Lösungsansätze für neue VG-Glashybrid-Bauelemente anhand von FEM-Simulationen des thermischen Bauteilverhaltens und Optimierung der Systeme.

7. Konzept 01.

Klebe-Vorversuche zur Verbindung transluzenter, transparenter ausgewählter Materialplatten, Funktionsfolien und weiteren Elementen an das Vakuumglas.

7.1 Last- und Klimaversuche an Prototypen des neuen Glasmodul-Systems (Konzept 01), ggf. Optimierung und Anpassung des Systems. Bau von 1:1-Funktionsprototypen ausgehend von den Ergebnissen der Vorversuche und Simulationen. Belastungs- und Differenz-Klimaversuche an Funktionsprototypen. Bau und Prüfungen von Probe-Wandabschnitten (Montage, Luft- und Wasserdichtigkeit, Aufprallversuche, Rückbaubarkeit) Versuche zum Einstellen des Transparenzgrades über Folien und Scheibenschichten.

8. Konzept 02.

Konstruktion und Bau von Prototypen des neuen Vollglas-Klinker- und Profilbauglas-Systems, M (1:1) Klebe-Vorversuche an Verglasungspaketen. Versuche zur Findung eines geeigneten Materials für die Stoß- und insbesondere Lagerfugen beim Vollglas-Klinker; Ansatz sind Silikone mit mineralischen Zuschlägen zum Erreichen einer dauerhaft hohen Druckfestigkeit. Bau und Prüfungen von Wandabschnitten (Montage, Luft- und Wasserdichtigkeit, Aufprallversuche, Rückbaubarkeit).

8.1 Last- und Klimaversuche an Prototypen des neuen Profilbauglas-Systems, ggf. Optimierung und Anpassung des Systems. Fa. Dow: Bereitstellen von Material, Versuchsreihen zur Kleb- und Dichtstoff-Findung. Fa. Raico: Bereitstellen von Material, Versuchsreihen zur Fassadenkonstruktion.

4.5 Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Fachhochschule Dortmund, Fachbereich Architektur:
Projektleitung des Forschungsprojekts: V. Prof. Luis Ocanto-Arciniegas,

Mitarbeit: Dipl. Ing. M.Sc. Andreas Maurer, 3D-Drucklabor und Baustofflabor
Mitarbeit: Dipl. Ing. M.Sc. Daniel Horn, Leiter des Baustofflabors und des Metalllabors

Kooperationspartner:

Dow Silicones - Deutschland (Standort Wiesbaden), Kleb- und Dichtstoffe
Ansprechpartner: Dipl. Ing. Markus Pletttau, Global Segment Leader Façade - High Performance Building
Technischer Berater: Dipl. Ing. Olaf Pretzsch, Application Engineer - High Performance Building

Fuchs Design, Vollglas Glasbausteine
Ansprechpartner und Technische Beratung: Herr Ralf Dröge

LUCEM Lichtbeton, Ansprechpartner: Dr. Andreas Roye
Technischer Berater: Herr Wolfgang Tischbierek

MAGNA Glaskeramik, Glaskeramik
Ansprechpartner und Technische Beratung: Herr Martin Kettmann

RAICO, Fassadensysteme
Ansprechpartner und Technische Beratung: Dipl. Ing. M.Eng. Michael Kaufmann, Leiter Objekttechnik

4.6 Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitsphasen Plan

AP 1 – VORARBEITEN & RECHERCHE (2 Monate)

Stand der aktuellen, gesetzlichen Anforderungen an Glas- und lasttragende Außenwände, Vorhangfassaden usw.

Recherche und Sondierung in Frage kommender Produkte mit neuen Materialeigenschaften

Definition der Projektziele in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern

Firmenpartner:

Dow: Beratung, Bereitstellen von Materialdaten zu Spezialsilikon

Fuchs Design: Beratung, Bereitstellen von Materialdaten zu Glasbausteinen

Lucem: Beratung, Bereitstellen von Materialdaten zu Lichtbeton

MAGNA Glas: Beratung, Bereitstellen von Materialdaten zu Glaskeramik

Raico: Beratung, Bereitstellen von Materialdaten zu Glas-Fassadensystemen

AP 2 – THEORETISCHE ARBEITEN (6 Monate)

Evaluierung der erdachten Lösungsansätze für neue VG-Glassteine und PBG-VG-Elemente anhand von FEM-Berechnungen

Konzeption eines Systems für Wandaufbauten aus den neuen VG-Glasmodulen unter Berücksichtigung aller Systemkomponenten

Berücksichtigung wirtschaftlicher Faktoren in Kooperation mit den Firmenpartnern

Materialbestellungen

Firmenpartner:

Dow: Beratung Spezialsilikone, Vorversuche zur Materialfindung

Fuchs Design: Beratung zu Glasbausteinen, Vorversuche zur Materialfindung

Lucem: Beratung zu Lichtbeton, Vorversuche zur Materialfindung

MAGNA Glas: Beratung zu Glaskeramik-Platten, Vorversuche zur Materialfindung

Raico: Beratung Fassadensysteme, Baukonstruktionen, Vorversuche zur Fassaden-Systemfindung

AP 3 – PROTOTYPEN GLASMODUL-SYSTEM - Konzept 01(10 Monate)

Klebe-Vorversuche an Glasaufbauten

Versuche zur Auslegung der Setz- und Stoßfugen mit Silikon und Glasbausteinen

Bau von verschiedenen 1:1-Funktionsprototypen, Serien: 100 x 100 mm, 300 x 300 mm, 500 x 500 mm und 1500 x 500 mm entsprechend Vorauswahl in AP 2

Adhäsions-Test nach ASTM C794 od. ETAG 002-1

Bau eines Probe-Wandabschnitts aus einem der zuvor evaluierten Prototyp-Bausteine

Versuche zum Finden eines geeigneten Materials für die Stoß- und insbesondere Lagerfugen:

Ansatz HM-Silikon zum Erreichen einer dauerhaft hohen Druckfestigkeit

Prüfungen an einem Probe-Wandabschnitt (Montage, Luft- und Wasserdichtigkeit, Rückbaubarkeit)

Leistungen der Firmenpartner:

Dow: Bereitstellen von Material, Versuchsreihen zur Kleb- und Dichtstofffindung

Fuchs Design: Bereitstellen Material, Bauteilprüfungen an Funktionsprototypen und Wandabschnitten

Lucem: Bereitstellen von Material, Versuchsreihen zum Lichtbeton

Magna Glas: Bereitstellen von Material, Bauteilprüfungen an Prototypen und Wandabschnitten

Raico: Bereitstellen von Material, Versuchsreihen zu Fassadenkonstruktionen

AP 4 – PROTOTYPEN GLASMODUL-SYSTEM - Konzept 02, Druckentspannter Glasverbund (10 Monate)

Lineare Verklebung zur Verbindung von VG zu ausgewählten Materialien

Bau von 1:1-Funktionsprototypen (750 x 750 mm) ausgehend von den Ergebnissen der AP 2

Prüfung in Anlehnung an DIN EN 1279-2, von 3 verschiedenen Systemen: VG-Glas, VG-Glaskeramik, VG-Lichtbeton

Aufgaben Firmenpartner:

Dow Corning: Bereitstellen von Material, Versuchsreihen zur Kleb- und Dichtstoff-Findung

Magna Glas: Bereitstellen von Material, Bauteilprüfungen

Lucem: Bereitstellen von Material, Versuchsreihen mit Lichtbeton

Raico: Bereitstellen von Material, Versuchsreihen zur Fassadenkonstruktion

AP 5 – BERICHTWESEN (4 Monate)

Veröffentlichungen und Berichte

Zwischenpublikationen in Absprache mit dem BBSR und den Industriepartnern

4.7 Beschreibung und Begründung von möglichen Optimierungen durch Veränderungen gegenüber der ursprünglichen Antragsstellung

Adaptive Glasaufbauten

Im ursprünglichen Antrag des Forschungsprojekts Vakuumglas_WALL lag zur Zeit seiner Erstellung der Fokus auf einem Adaptiven System von Glasaufbauten aus Vakuumglas und ausgewählten Materialien im Verbund. Dieser Ansatz wurde mit dem Projektpartner Saint Gobain Glas und 3M-Deutschland formuliert. Ausgangspunkte für diesen Forschungsansatz waren Sondergläser und Produkte aus Gussglas der Fa. Saint Gobain Glas sowie Funktionsfolien der Fa. 3M-Deutschland. Leider kündigte im August 2019 die Fa. 3M-Deutschland die Zusammenarbeit aus Firmen internen Gründen und damit auch die Unterstützung der Forschungsaktivitäten durch Drittmittel und Geldwerten Leistungen. Um die Anwendung von Funktionsfolien als einen unserer Forschungs-Schwerpunkte weiterhin verfolgen zu können wurden im Herbst 2019 weitere Recherchen zur Partnerfindung für unser Forschungsprojekt fortgesetzt. Im Frühjahr 2020 wurde auch Zusammenarbeit mit der Fa. Saint Gobain sehr kompliziert. Die Schließung des Glaswerkes SGG in Mannheim wurde im November 2019 beschlossen und damit schwand auch das Interesse der Fa. SGG am Forschungsprojekt. In dem Mannheimer Werk sollte ursprünglich ein Vakuumglas-Produktionswerk wieder aktiviert werden. Der Ansprechpartner im Projekt der Fa. SGG war nur schwer zu erreichen und im Mai 2020, als der 3. Kooperationsvertrag unterschreiben werden sollte, kündigte leider auch die Fa. SGG endgültig die Zusammenarbeit in unserem Projekt.

Um die Finanzierungsdefizite des Projektes decken zu können, wurden neue Projektpartner gefunden und Drittmittel eingeworben. Mit der Fa. Magna Glas, Hersteller von Glaskeramik und der Fa. Fuchs Design, Hersteller von Vollglas-Glasbausteinen, wurde das Projekt fortgesetzt. Nach Projekt-Eintritt der neuen Partner lag der Fokus mehr auf der Problematik der Laminierung bzw. der Direkt-Verklebung und in Konsequenz auch deren Einflüsse bei den Structural-Glazing Fassadensystemen. Die Machbarkeit der Glasaufbauten mit Vakuumverglasung und den ausgewählten Materialien musste neu formuliert und überprüft werden. Hierbei war die Kombination mit den gewählten Glasbausteinen wegen ihrer Formate und deren Toleranzen eine besondere Herausforderung. Die Toleranzen bei der Steingröße (+/- 3-4 mm) erforderten neue Lösungen bei der Laminierung mit dem Vakuumglas. Eine Laminierung mit Folien ist nur mit mehreren hintereinander geklebten Folien möglich, dies würde das ganze aufwendiger und zu teuer machen. Hier war der Einsatz eines anderen Laminierung-Konzeptes notwendig, in dem keine Laminierungs-Folien verarbeitet werden, sondern Gießharz oder Flüssig-Silikon im Zwischenraum der Glasscheiben eingegossen wird. Dieser Ansatz wurde ab Juni 2020 (theoretische Arbeiten) weiter verfolgt. FEM-Simulationen zu diesem Konzept wurden erstellt und überprüft. Die Machbarkeit des Konzeptes wurde durch Laborproben und Demonstratoren überprüft. Im Zuge der Forschungsaktivitäten mit der Direkt-Verklebung war im Herbst 2020 die Frage der Rückbaubarkeit der Fokus un-

serer weiteren Forschungen. Zu diesem Zeitpunkt waren die Laborversuche noch nicht durchgeführt und eine Rückbaubarkeit konnte deshalb nicht geprüft werden. Ein zweites Klebekonzept für die Lineare Verklebung in einem druckentspannten System mittels Abstandshalter der Fa. Swisspacer wurde uns vorgeschlagen. Dieses Konzept verfolgten wir ebenfalls weiter. Kontakt zu den Firmen Saint Gobain Research und Swisspacer (Hersteller von Swisspacer Air) und der Firma AGC (Hersteller in Belgien vom VG-Fineo) wurde aufgenommen und im Januar sollte die Zusammenarbeit mit den Firmen anfangen. Dies aber gescheiterte aus Vertragsrechtlichen Gründen. Beide Firmen wollten die erarbeiteten Zwischenergebnisse und Informationen des Forschungsprojektes als Voraussetzung zur Zusammenarbeit erhalten. Dies wurde vom Projektpartner und der Verwaltung der FH-Dortmund abgelehnt. Die Realisierung der Laborproben des Konzeptes mit dem druckentspanntem System für die Laborprüfung nach DIN EN 1279-2 blieb offen.

Glasaufbauten mit Profilbauglas

Im ursprünglichen Antrag war das Konzept VG und Profilbauglas ebenfalls ein Forschung-Schwerpunkt. Nach Recherchen und Untersuchungen zum Profilbauglas wurde der Ansatz der Verklebung mit Vakuumglas geändert. Angedacht war eine lineare Verklebung der PBG-Stege mit dem VG. Bei Profilbauglas-Fassadensystemen des deutschen herkömmlichen PBG-Systems werden die Glasteile in den Profilen der Fassadenrahmen-Exponate mechanisch zusammen geklemmt. Eine Montage der VG mit Profilbauglas (als Verbund mechanisch) kann auch in dieser Ausführung realisiert werden und lässt sich gut z.B. im Raico-Fassadensystem THERM+ A-I integrieren. Bei einem Glasaufbau von VG und Profilbauglas entsteht ein doppelschaliges Element, dessen Kontaktoberflächen durch PVC-Schienen getrennt und damit thermisch entkoppelt wird. Die Montage dieses Glasaufbaus kann sowohl senkrecht als auch waagrecht ausgeführt werden. Es wurden Konzeptzeichnungen und Details der Anschlüsse entwickelt und anschließend durch FEM simuliert.

Glasaufbauten mit Lichtbeton

Die Glasaufbauten mit Lichtbeton sind zwar die weniger transluzenten, eher opaken, aber thermisch sehr interessant. Die Lichtbetonplatten im Verbund bieten einen sehr guten Wärmeschutz bei einer gewissen Transluzenz. Diese Lichtbetonplatten können außerdem durch Wärmespeicherung sowohl im Winter als auch im Sommer thermisch genutzt werden. Durch thermische Aktivierung der Lichtbetonplatten mit ihrem Beton-Anteil und dessen Trägheit bzw. Speicherfähigkeit kann der thermische Komfort der dahinter liegenden Innenräume erheblich verbessert und Energie eingespart werden. Mit diesem Glasaufbau entsteht eine Art „Trombewand“, welche eine Verbesserung der Energie-Effizienz eines Gebäudes bei geringem Einsatz von Haustechnik optimieren kann. Voraussetzung für das Konzept im Sommer sind bewegliche, drehbare Fassadenelemente. Diese werden wie geplant die gespeicherte Wärme der Innenräume durch die nächtliche Drehung der Fassaden-Elemente an die Außenluft abgeben. Das Konzept wurde mit dem Partner Raico besprochen, was leider keine Resonanz gefunden hat, da die Fa. Raico keine drehbaren Fenster- und Fassadenelemente in ihrem Produkt-Programm hat. Ein anderes Argument von Raico war die Schwierigkeit eine effektive und effiziente Dichtung bei solchen Konstruktionen zu erreichen. Die Komplexität des Konzeptes liegt an der Entwicklung einer vernünftigen und dauerhaften Abdichtung der oberen und unteren Anschlüsse des Dreh-Flügel-Elementes. Dieses Konzept ist nicht aufgegeben. Hierfür sollte ein Projektpartner, der dieses Konzept ausführen kann, gefunden werden. In Gesprächen mit der Firma rp-technik GmbH Profilsysteme aus Bönen NRW wurde dieses Konzept und die Abdichtungsproblematik diskutiert. Die Firma zeigte sich bereit das Konzept zu verfolgen bzw. zu entwickeln. Für die denkmalgeschützte Sanierung des Gesundheitsamtes Dortmund entwickelte die Firma rp-technik schon ein ähnliches Fassadensystem und führt die Sanierung mit Stahl-Dreh-Flügel-Elementen durch. Hierfür wurden filigrane Drehfenster aus Stahl mit Isolierglas von der Firma rp-technik hergestellt und montiert. Die Abdichtungsproblematik wurde bei diesem Projekt gelöst. Bei einer Fortsetzung des Forschungsprojektes Vakuumglas_WALL könnten die Entwicklungen der drehbaren VG-Lichtbeton-Elemente in einem Versuchsmodul ein Jahr lang durch Monitoring verfolgt und Ergebnisse ausgewertet werden.

5 Fassadensysteme und Materialuntersuchungen

5.1 Methodik im Rahmen der Materialuntersuchungen

Konzipierung der Glasaufbauten, Materialauswahl

Bei der Konzipierung der Glasaufbauten wurden in erster Linie Materialien ausgesucht, die transluzente oder transparente Eigenschaften besitzen. Transluzente Bauprodukte, die vom Bauplaner und Architekten in Fassaden gerne eingesetzt werden, sind aber auf Grund des schlechten Wärmeschutzes der Fassaden im Außenbereich nicht geeignet. Ausgewählt wurden folgende Materialien: Gussglas strukturiertes Glas, Schaltbares, laminiertes Glas, Lichtbeton, Glaskeramik, Metallgewebe und Voll-Glas-Klinker.

Neun Glasaufbauten wurden als Verbundwerkstoff vorgeschlagen, Funktion und Typ wie folgt eingeordnet:

Funktion Sichtschutz, Typ Direkt Verklebung

Glasaufbau Modell 01:

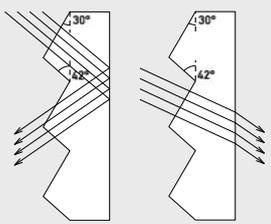
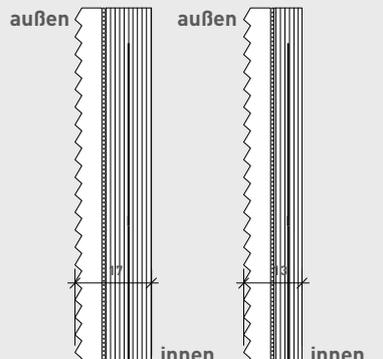
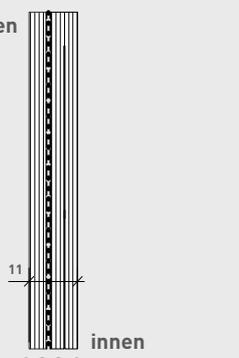
Gussglas mit Prismenstruktur / Verbundfolie (EVA, PVB) od. Guss silikon / Vakuumglas: Vorgespanntes Floatglas 5 mm, Vakuum 0,25 mm, Low-E-Beschichtung Floatglas 5 mm

Glasaufbau Modell 05:

ESG 4 mm, Metallgewebe AL, Verbundfolie EVA, Vakuumglas: Vorgespanntes Floatglas 5 mm, Vakuum 0,25 mm, Low-E-Beschichtung Floatglas 5 mm

Abbildung 13

Glasaufbauten: Zusammensetzung und Funktion Modell 01 und Modell 05

<p>MODELL 01 VG + GUSSGLAS Merkmale: Sichtschutz Überhitzungsschutz</p>  <p>Hochstehende Sommersonne > 40° Totalreflexion der Strahlung</p> <p>Flache Wintersonne < 35° Verlustfreier Durchgang der Strahlung</p>	 <p>außen</p> <p>außen</p> <p>innen</p> <p>innen</p> <p>1 2 3</p> <p>Vertikalschnitt</p>	<p>Aufbau: 1 Gussglas Prisma-Struktur 6 mm 2 Verbundfolie PVB, EVA, SGP 3 Vakuumglas 5Klar, V=0,25mm E-Low, 5Klar</p> <p>4 Vakuumglas 3Klar, V=0,25mm E-Low, 3Klar</p>
<p>MODELL 05 VG + METALLGEWEBE Merkmale: Sichtschutz Passive Wärmeschutz</p>	 <p>außen</p> <p>innen</p> <p>1 2 3 4</p> <p>Vertikalschnitt</p>	<p>Aufbau: 1 ESG 4 mm 2 Metallgewebe AL 3 Verbundfolie EVA 4 Vakuumglas 3Klar, V=0,25mm E-Low, 3Klar</p>

Quelle: Ocanto

Funktion Sichtschutz, optimaler Wärmeschutz, Typ Lineare Verklebung

Glasaufbau Modell 02:

VSG 6 mm: Floatglas 3 mm, Verbundfolie SentryGlasPlus, Floatglas 3 mm Elektrochrome Beschichtung / SZR mit Edelgas gefüllt 12 mm / Vakuumglas: Vorgespanntes Floatglas 5 mm, Vakuum 0,25 mm, Low-E-Beschichtung Floatglas 5 mm

Glasaufbau Modell 04:

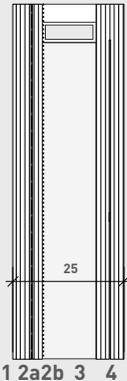
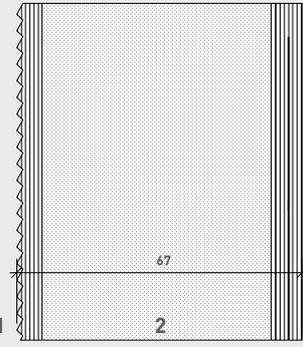
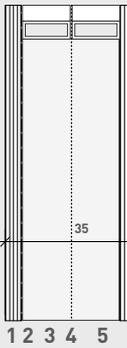
Profilbauglas mit Prismenstruktur Flanschhöhe 60 mm / Dicht- und Klebstoff Silikon / Vakuumglas Floatglas 3 mm, Vakuum 0,25 mm, Low-E-Beschichtung Floatglas 3 mm

Glasaufbau Modell 06:

ESG 4 mm / Verbundfolie SentryGlas / SZR mit Edelgas 12 mm / Funktionsfolie / SZR mit Edelgas 12 mm Vakuumglas: Vorgespanntes Floatglas 5 mm, Vakuum 0,25 mm, Low-E-Beschichtung Floatglas 5 mm

Abbildung 14

Zusammensetzung Glasaufbauten, Funktion Sichtschutz, lineare Verklebung: Modell 02, Modell 04, Modell 06

<p>MODELL 02 VG + Schaltbare Beschichtung Merkmale: Sichtschutz Überhitzungsschutz</p>	<p>außen  innen</p> <p>1 2a 2b 3 4 Vertikalschnitt</p>	<p>Aufbau: 1 VSG 6 mm 2a Verbundfolie SentryGlas 2b Elektrochrome Beschichtung 3 SZR mit Edelgas 4 Vakuumglas 3Klar, V=0,25mm E-Low, 3Klar</p>
<p>MODELL 04 VG + PROFILBAUGLAS Merkmale: Sichtschutz Passive Wärmeschutz Überhitzungsschutz</p>	<p>a  i</p> <p>1 2 3 Vertikalschnitt</p>	<p>Aufbau: 1 Profilbauglas mit Prima-Struktur Flanschhöhe 60 mm 2 Silikon 3 Vakuumglas 3Klar, V=0,25mm E-Low, 3Klar</p>
<p>MODELL 06 VG + SPIEGELFOLIE Merkmale: Wärmeschutz</p>	<p>außen  innen</p> <p>1 2 3 4 5 6 Vertikalschnitt</p>	<p>Aufbau: 1 ESG 4 MM 2 Verbundfolie SentryGlas 3 SZR mit Edelgas 12 mm 4 Funktionsfolie, Spiegel folie 5 SZR mit Edelgas 12 mm 6 Vakuumglas 3Klar, V=0,25mm E-Low, 3Klar</p>

Quelle: Ocanto

Funktion Sichtschutz, Lichtfilter, optimaler Wärmeschutz, Typ Direkte Verklebung

Glasaufbau Modell 03:

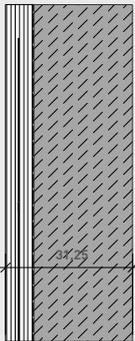
Vakuumglas: Vorgespanntes Floatglas 5 mm, Vakuum 0,25 mm, Low-E-Beschichtung Floatglas 5 mm / Verbundfolie (EVA, PVB) od. Gußsilikon / Lichtbeton-Platte 25 mm

Glasaufbau Modell 07

Vakuumglas: Vorgespanntes Floatglas 5 mm, Vakuum 0,25 mm, Low-E-Beschichtung Floatglas 5 mm / Verbundfolie (EVA, PVB) od. Gussilikon / Glaskeramik-Platte 25 mm

Abbildung 15

Zusammensetzung Glasaufbauten, Funktion Sichtschutz, Lichtfilter, direkte Verklebung: Modell 03, Modell 07

<p>MODELL 03 VG + LICHTBETON Merkmale: Lichtfilter Speichermasse (Beton)</p>	<p>außen</p>  <p>innen</p> <p>1 2 3 Vertikalschnitt</p>	<p>Aufbau: 1 Vakuumglas 3Klar, V=0,25mm E-Low, 3Klar 2 Verbundfolie EVA od. Gussilikon 3 Lichtbeton 25 mm</p>
<p>MODELL 07 VG + METALLGEWEBE Merkmale: Sichtschutz Passive Wärmeschutz</p>	<p>außen</p>  <p>innen</p> <p>3 2 1 Vertikalschnitt</p>	<p>Aufbau: 1 Vakuumglas 3Klar, V=0,25mm E-Low, 3Klar 2 Verbundfolie EVA od. Silikon 3 Glaskeramik 21 mm aus 100% recyceltem Abfall</p>

Quelle: Ocanto

Funktion tragende Elemente, optimaler Wärmeschutz, Typ Direkt Verklebung

Glasaufbau Modell 08

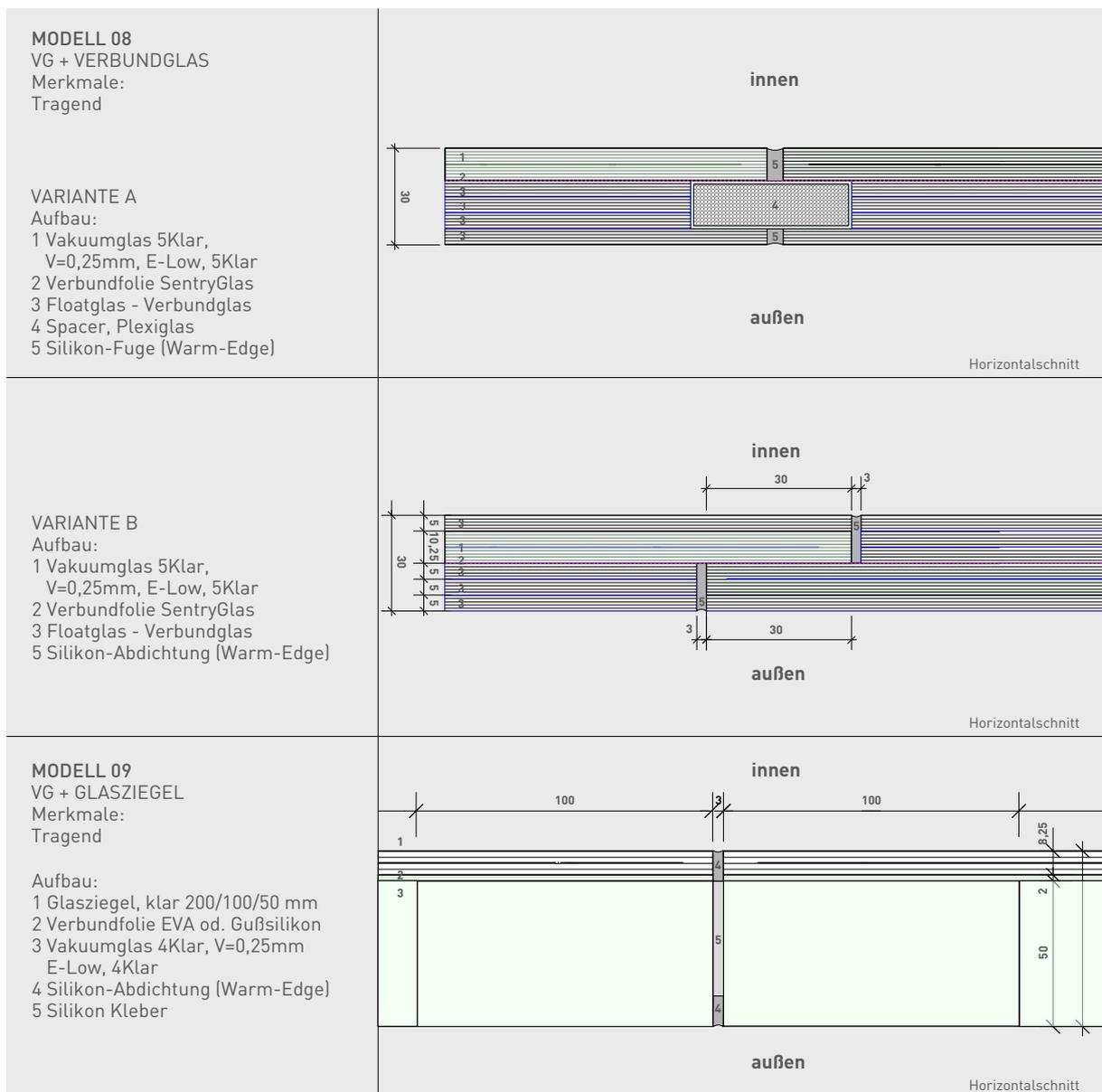
Vakuumglas: Vorgespanntes Floatglas 5 mm, Vakuum 0,25 mm, Low-E-Beschichtung Floatglas 5 mm / Verbundfolie SentryGlas / Floatglas-Verbundglas / Spacer aus Plexiglas Kantrohr 45 mm x 15 mm mit Aerogel-Füllung / Stoßfuge: Warm-Edge-Silikon

Glasaufbau Modell 09

Glasziegel klar 200/100/50 mm / Verbundfolie (EVA, PVB) od. Gußsilikon Vakuumglas: Vorgespanntes Floatglas 5 mm, Vakuum 0,25 mm, Low-E-Beschichtung Floatglas 5 mm

Abbildung 16

Zusammensetzung Glasaufbauten, Funktion tragend, direkte Verklebung: Modell 08 (2 Varianten), Modell 09



Quelle: Ocanto

5.2 Entwickelte Glasaufbauten

Sechs repräsentative Aufbauten wurden für Untersuchungen ausgewählt. Die sechs Aufbauten unterscheiden sich in Funktion, Struktur, Transluzens- und Transparenzgrad, Dichte und Stärke:

- 1) Gussglas/strukturiertes Glas
- 2) VSG mit Schalbarer Beschichtung
- 3) Lichtbeton
- 4) Glaskeramik
- 5) Profilbauglas
- 6) Voll-Glasklinker

Jeder Aufbau sollte bestimmte Eigenschaften und Funktionen beim Einsatz an dem Fassadensystem erfüllen, siehe Abb. 17.

Abbildung 17
VG Aufbauten: Struktur und Leistungen, Auswahl

<p>Modell 01 Aufbau</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Gussglas, Prisma-Struktur 2) Laminierungsfolie 3) Vakuumglas 	<p>Modell 02 Aufbau</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) VSG Floatglas 2a) Laminierungsfolie 2b) Schalbare EC Beschicht. 3) SZR 12A* 4) Vakuumglas 	<p>Modell 03 Aufbau</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Vakuumglas 2) Laminierungsfolie od. Harz 3) Lichtbeton LUCEM® 	<p>Modell 07 Aufbau</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Vakuumglas 2) Laminierungsfolie od. Harz 3) Glaskeramik Magna Glas® 	<p>Modell 04 Aufbau</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Profilbauglas, PrismaSolar® 2) Verklebung od. KS-Schiene 3) Vakuumglas 	<p>Modell 09 Aufbau</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Glasbausteine, voll Glas 2) Verklebung Harz od. Silikon 3) Vakuumglas
<p>Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zweck: visuell und akustisch • Bedarfsgesteuerte Funktion: Vorbeugen, Modulieren, Speichern • Betrieb: Passiv • von Außen wirkend • Komponenten System: Sonnenschutz, Wärmedämmung, Schalldämmung • Sichtbarkeit: Transparenz, Translucenz <p>Opak</p>	<p>Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zweck: Visuell und akustisch • Bedarfsgesteuerte Funktion: Vorbeugen, Modulieren, Speichern • Betrieb: Aktiv • von Innen wirkend • Komponenten System: Sonnenschutz, Wärmedämmung, Schalldämmung • Sichtbarkeit: Transparenz, Translucenz <p>Opak</p>	<p>Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zweck: thermischer Komfort • Bedarfsgesteuerte Funktion: Vorbeugen, Modulieren, Speichern • Betrieb: Passiv • von Innen wirkend • Komponenten System: Sonnenschutz, Wärmedämmung, Schalldämmung • Sichtbarkeit: Transparenz, Translucenz <p>Opak</p>	<p>Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zweck: thermischer u. akustischer Komfort • Bedarfsgesteuerte Funktion: Vorbeugen, Modulieren, Speichern • Betrieb: Passiv • Komponenten System: Sonnenschutz, Wärmedämmung • Sichtbarkeit: Transparenz, Translucenz <p>Opak</p>	<p>Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zweck: thermischer u. akustischer Komfort • Bedarfsgesteuerte Funktion: Vorbeugen, Modulieren, Speichern • Betrieb: Passiv • Komponenten System: Sonnenschutz, Wärmedämmung, Installationsraum • Sichtbarkeit: Transparenz, Translucenz <p>Opak</p>	<p>Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zweck: thermischer u. akustischer Komfort • Bedarfsgesteuerte Funktion: Vorbeugen, Modulieren, Speichern • Betrieb: Passiv • Komponenten System: Sonnenschutz, Wärmedämmung, Installationsraum • Sichtbarkeit: Transparenz, Translucenz <p>Opak</p>

Quelle: Ocanto

Materialeigenschaften

Kenndaten der im Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL eingesetzten VG-Verglasungen (Standard) sind Daten zu den Materialeigenschaften des Vakuumglases vom südkoreanischen Hersteller EAGON Windows & Doors, EAGON Industrial Co. Seoul / aus Südkorea geliefert, siehe Tab. 5

Tabelle 5
Eigenschaften Vakuumglas EAGON

Aufbau Floatglas 5 mm	Vakuum Layer	Pillar Abstand Raster	Randverbund	Winddruck Widerstand [in Pascal]	U_g [W/m ² K]	Licht Transmission T_L [in %]	g-Wert EN 410 [in %]	R_w (C.Ctr) Wert [dB]	Weight [Kg/m ²]
T5-V-TL5 10,25 mm	0,25 mm	40 mm	10 mm	3.400	0,38	70,5	54,06	37	24,90

T = vorgespannt, L = low Emission Folie (Pos. 3), V = Vakuum.

Quelle: Ocanto

Jedes im Forschungsprojekt verwendete Material wird gemäß der einschlägigen Literatur im Hinblick auf „gemeinsame“ Werte aus der Praxis betrachtet (siehe Tab. 6). Dies soll die Ergebnisse des Vergleichs mit Standardfassaden nicht verzerren. Die Anpassung der Materialeigenschaften und damit die Verbesserung der Fassadenleistung sind Themen für weitere Untersuchungen.

Tabelle 6
Eigenschaften der verwendeten Materialien

MATERIAL	Lambda [W/(m·K)]	Rohdichte kg/m ³	ϵ Emissivität
AL I Aluminium 10456 Ar18 in 50 mm U 0,52	160	2700	0,900
EDELSTAHL	17	7800	0,900
GLAS	0,8	2490	0,900
BETON	>2,0 bis 2,6	>2000 bis 2600	0,900
KS-Faser	0,25-0,35	1150	0,900
Glaskeramik	1,04	2400	0,900
Profilbauglas	1,0	2490	0,900
EPDM	0,25	0,250	0,900
Silikon-Standard	0,30-0,40	1250-1900	0,900
Warm-Edge-Silikon	0,19	1250-1900	0,900
Wärmeleitendes Silikon	2,0	1250-1900	0,900
Gasfüllung	0,034	–	
Gasfüllung, Argon	0,021	–	
Vakuum (Luft)	0,0000040525	–	
Aerogel Platte (Slentite®)	0,0017	130	0,900
Swisspacer Ultimate Box 2	0,14		0,900
Polyvinylchlorid PVC-U hart	0,17	1390	0,900
Polyvinylchlorid PVC-P weich	0,14	1200	0,900
Polyurethan (PU)	0,40	1500	0,900
Polychloropen (PCP) z.B. Neopren	0,23	1240	0,900

Quelle: Ocanto

Rahmenbedingungen

Folgende Glas-Aufbauten sowie die passenden Fassadensysteme werden zunächst in FEM-Simulationen untersucht und unter folgenden Kriterien und Parametern für alle Fassadensysteme weiter entwickelt:

- Im Wohnungsbau: eine θ_{si} raumseitige Oberflächentemperatur [°C] kleiner als 13° C bei einer Außentemperatur von -10° C und 20° C im Innenraum, eine rel. Feuchte > 50% sollte verhindert werden (DIN 4108-2)
- Im Gewerbebau: eine θ_{si} raumseitige Oberflächentemperatur [°C] kleiner als 10,5° C, bei einer Außentemperatur von -10° C und 20° C im Innenraum, eine rel. Feuchte 40% sollte verhindert werden.
- Variation von Fensteröffnungen und Fassadentypen: Bei Fassadenöffnungen Kastenfenster. Kastenfenster-Fassade, Ganz-Glas-Fassade, Zweite-Haut-Fassade, Pivot-Elemente.
- Parametrisierung der Fassadengestaltung nach Lage bzw. Himmelsrichtung der Fassade um Veredelung wie Siebdruck, Folierungen zu variieren und erproben.

Folgende baukonstruktive Maßnahmen werden bei den Simulations-Modellen aufgegriffen, siehe Tab. 7.

Tabelle 7

Baukonstruktive Maßnahmen Kriterien und Parameter zur Untersuchung

Bei Vorhangfassaden: / Pfosten-Riegel System	Ganz Glasfassaden: Structural Glazing, Punktanker
- Einbaulage verändern bzw.:	- Variation der Tiefe des Glaseinstands
- Variation der Tiefe des Glaseinstands	- Glasbefestigung vereinfachen und rationalisieren
- Position der Verglasung mit zusätzlicher Dämmung des Rahmens von außen	- Filigrane Abdichtung bzw. schmalere Fugenbildung durch wärmedämmende Dichtung außen
- außenseitiges Einbringen von Dichtungen aus wärmedämmenden Materialien	- raumseitiges Einbringen von Kollektoren und Dichtungen aus wärmeleitenden Materialien
- raumseitiges Einbringen von Kollektoren und Dichtungen aus wärmeleitenden Materialien	- Punkthalterung soll überprüft werden in Abhängigkeit der Lage des VG's (Statik)
- Vorsatz einer dünnen ESG mit Abstandshalter „warme Kante“	- Optimierung des Hilfrahmens (Unterkonstruktion), Verwendung von alternativen Materialien mit geringerer Wärmeleitfähigkeit z.B. GFK, CFK.
- Dämmschichten verschiedenster Stärke und Wärmeleitfähigkeiten	
- Reduktion der Breite des VG-Randverbundes („edge seal“), VG mit 5mm Randverbund (ideal).	
- Erhöhung der Rahmentiefe (Fenstersysteme)	
- Variation bzw. Erhöhung der Systembreite, mehr Spielraum für die Tiefe des Glaseinstands und Unterbringung von notwendiger Technik z.B. bei Adaptiver Verglasung (Pfosten-Riegel)	

Quelle: Ocanto

Thermische Leistung der Glasbau-Systeme

Wie sich in den vorangegangenen Projekten „Ultraslim“, „Ultralight“ oder „VG-Fassade“ herausgestellt hat, ist eine spezielle Betrachtung des Randverbundes zwischen Verglasung und Fassadenkonstruktion dringend erforderlich um eine optimale thermische Leistung der neu entwickelten Glasbau-Systeme zu erzielen.

Die Abhängigkeit dieser Verbindungsstelle wird wesentlich von der Länge des Randverbundes sowie dem Glaseinstand beeinflusst. Um die thermische Performance der Verglasung und die damit verbundene Fassadenkonstruktion thermisch zu optimieren, wurde wie im Forschungsprojekt VG-Fassade auf numerische thermische Wärmebrückensimulation zurückgegriffen. Für diese Studien wurden mit der Software FLIXO 8.0, THERM, WINDOW 7.5 und Grasshopper vereinfachte Berechnungsmodelle der Konstruktionsvorschläge mit dem Vakuumglas durchgeführt.

Thermische Simulation mittels FEM-Software, Wärmebrückensimulation

Um die Leistung der erdachten Konstruktionen bewerten zu können, wurde auf den Erfahrungen des Forschungsprojektes VG-Fassade hinsichtlich FEM-Simulationen aufgebaut. Im Detail wurde die zertifizierte Software FLIXO 8.0 und die Software WINDOWS 7.5 zu diesem Zweck benutzt.

Detailanschlüsse (im Horizontal- und Vertikalschnitt) der unterschiedlichen Aufbauten und dazu entwickelten Anschlüsse an die Fassadensysteme wurden 2D- und 3D in CAD-Zeichnungen angefertigt, diese ins Simulationsprogramm importiert, mit den Material-Kennwerten konfiguriert und anschließend die entsprechenden Simulationen durchgeführt:

Zu den wichtigsten Leistungsindikatoren, die auf diese Weise ermittelt werden können zählen:

- Temperaturen und Wärmeströme in den Konstruktionen und auf den Oberflächen der Glasbau-Systeme.
- Diese können als thermische Leitwerte ausgedrückt werden, aber auch mit einfachen Indikatoren, wie dem fR_{si} -Wert beschrieben werden.
- Auch wenn der PSI-Wert nur eine geringe Aussagekraft hinsichtlich der thermischen Qualität von Bauteilen hat, können diese Werte ganz gut zum Vergleich von Konstruktionen ohne Vakuumglas d.h. mit herkömmlichen Glas-Systemen bzw. Isolierglas und solchen mit Vakuumglas herangezogen werden.
- Wasserdampfdiffusion in den Bauteilen kann genauso wie mögliche Korrosions-, Kondensations- und Schimmelbildung mittels dieser Simulation beschreibbar gemacht werden.

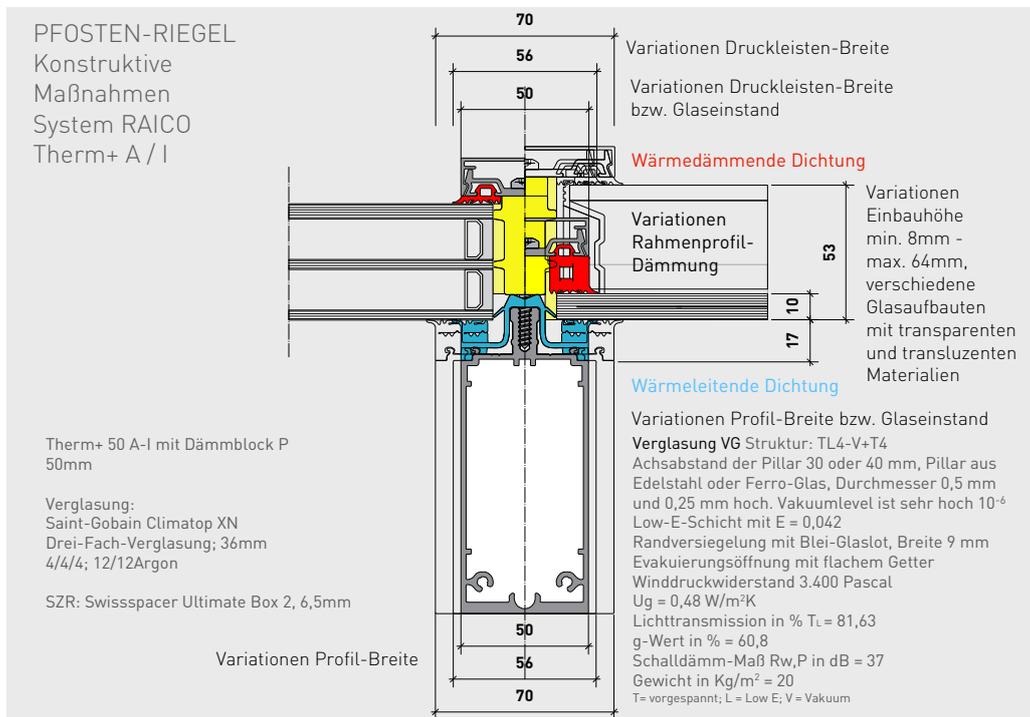
5.3 Fassadensysteme und Glasaufbauten, Adaption und Anpassung

Die vorgeschlagenen Glas-Aufbauten wurden an einem vorhandenen Fassadensystem des Projektpartners: RAICO GmbH adaptiert und simuliert. Das ausgewählte Raico Systemprogramm ist das System THERM+ A-I . Um die Isothermen besser darstellen zu können, wurde Wert darauf gelegt ein Profil zu verwenden, das einen möglichst großen Schraubkanal aufweist.

Aus diesem Grund fiel die Wahl auf das Tragprofil aus der Serie RAICO THERM+ A-I (Aluminium „I-Fassade“). Diese Profile haben gegenüber der V-Variante einen größeren Schraubkanal (18,5 statt 13 mm). Ein weiterer Vorteil der „I-Fassade“ ist, dass die Höhe der Innendichtung 13,5 mm statt 9,5 mm wie bei der V-Variante beträgt, wodurch vor allem die Oberflächentemperaturen in den kritischen Bereichen niedriger ausfallen werden, siehe Abb. 18 u. 19.

Abbildung 18

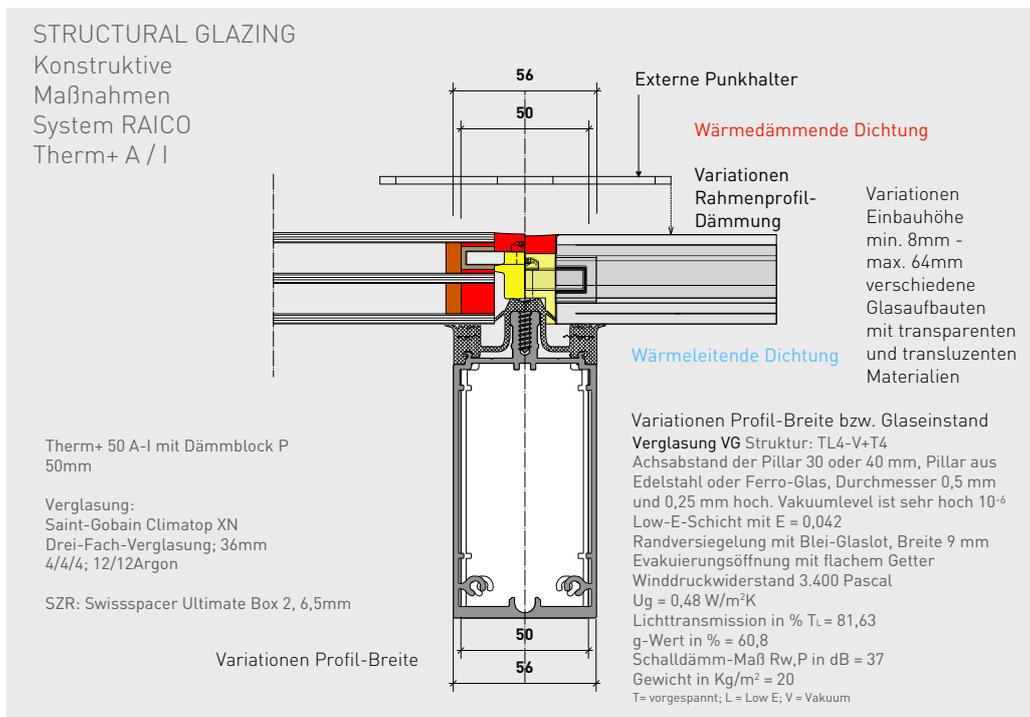
Fassadensystem Raico Therm+ A-I Pfosten-Riegel: Baukonstruktive Maßnahmen für die Untersuchung. Vergleich mit herkömmlicher 3-fach Verglasung



Quelle: Ocanto

Abbildung 19

Fassadensystem Raico Therm+ A-I, Structural Glazing Baukonstruktive Maßnahmen für die Untersuchung. Vergleich mit herkömmlicher 3-fach Verglasung

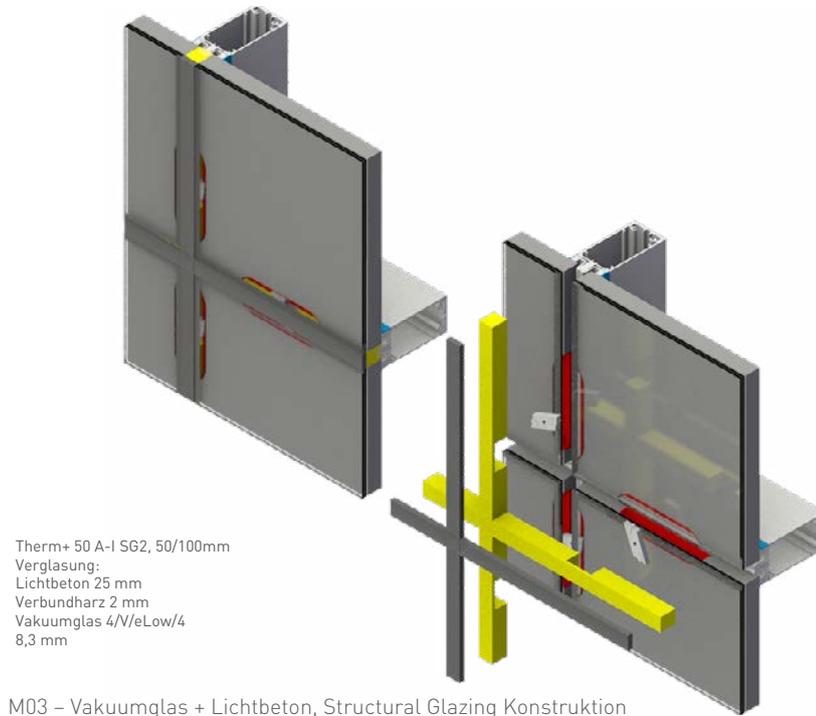


Quelle: Ocanto

Glasaufbauten und Fassadensystem Raico THERM+ A-I Pfosten-Riegel u. Structural Glazing, Adaption

Abbildung 20

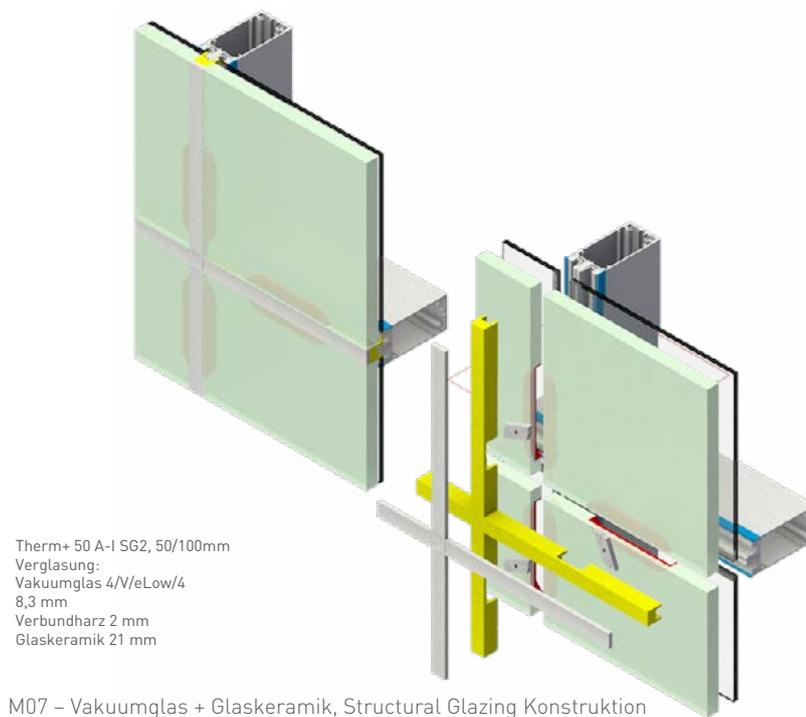
Glasaufbau M03 - Vakuumglas + Lichtbeton in Structural Glazing Konstruktion, Visualisierung



Quelle: Ocanto

Abbildung 21

Glasaufbau M07 - Vakuumglas + Glaskeramik in Structural Glazing Konstruktion, Visualisierung

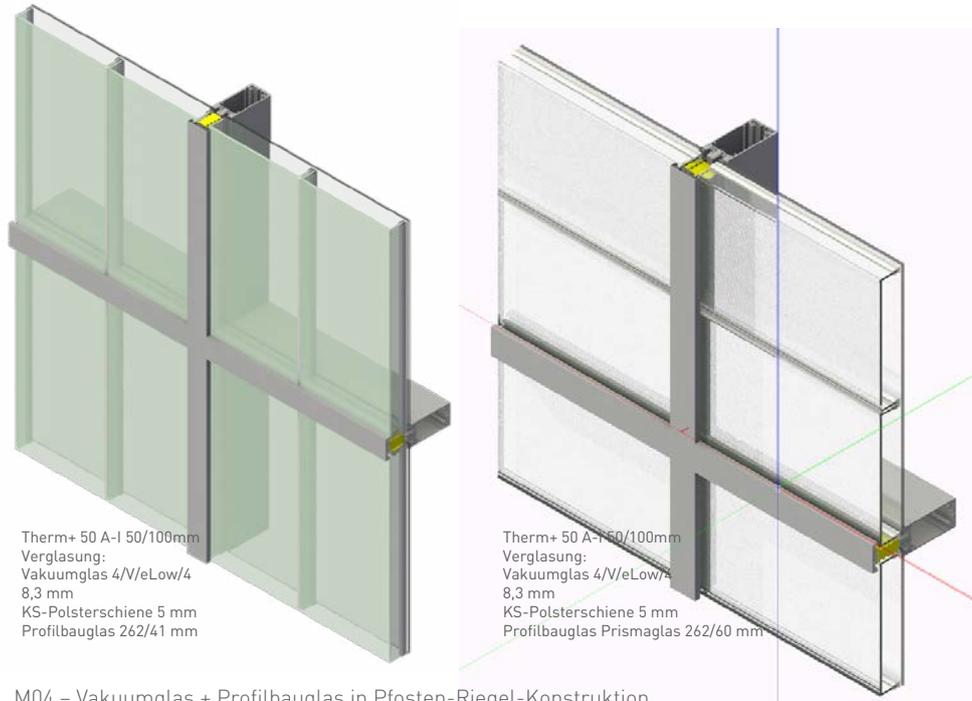


Quelle: Ocanto

Glasaufbauten und Fassadensystem Raico THERM+ A-I Pfosten-Riegel u. Structural Glazing, Adaption

Abbildung 22

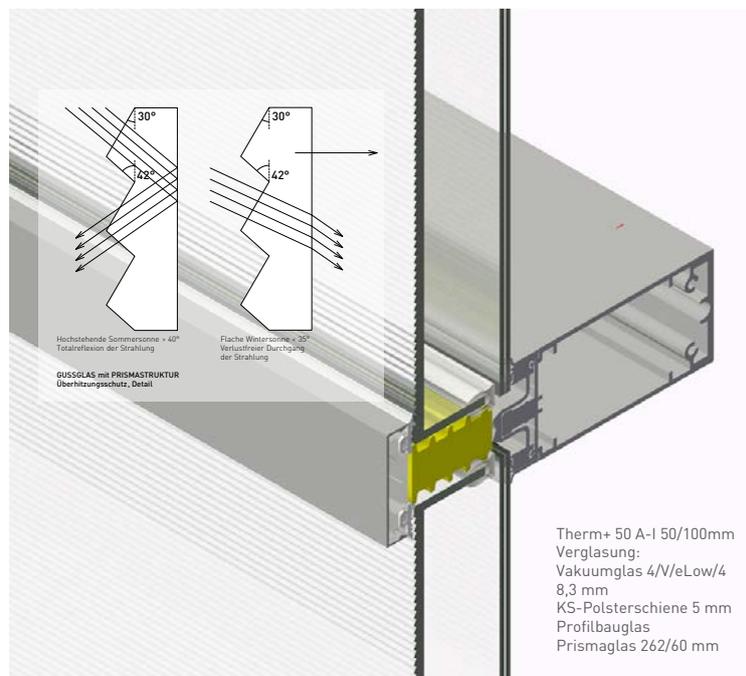
Glasaufbau M04 - Vakuumglas + Profilbauglas in Pfosten-Riegel-Konstruktion, Visualisierung



Quelle: Ocanto

Abbildung 23

Glasaufbau M04 - Vakuumglas + Profilbauglas in Pfosten-Riegel-Konstruktion, Detail - Visualisierung

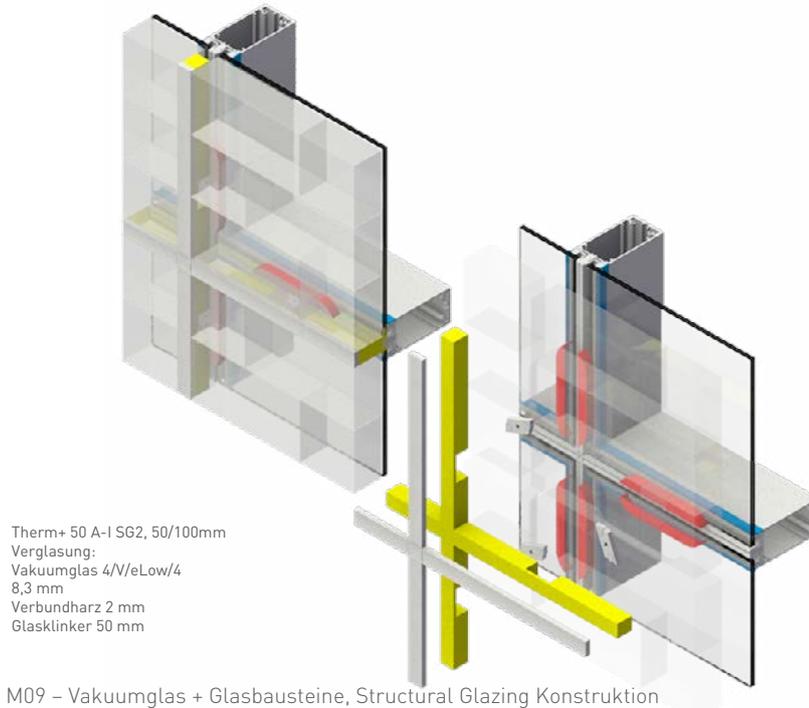


Quelle: Ocanto

Glasaufbauten und Fassadensystem Raico THERM+ A-I Pfosten-Riegel u. Structural Glazing, Adaption

Abbildung 24

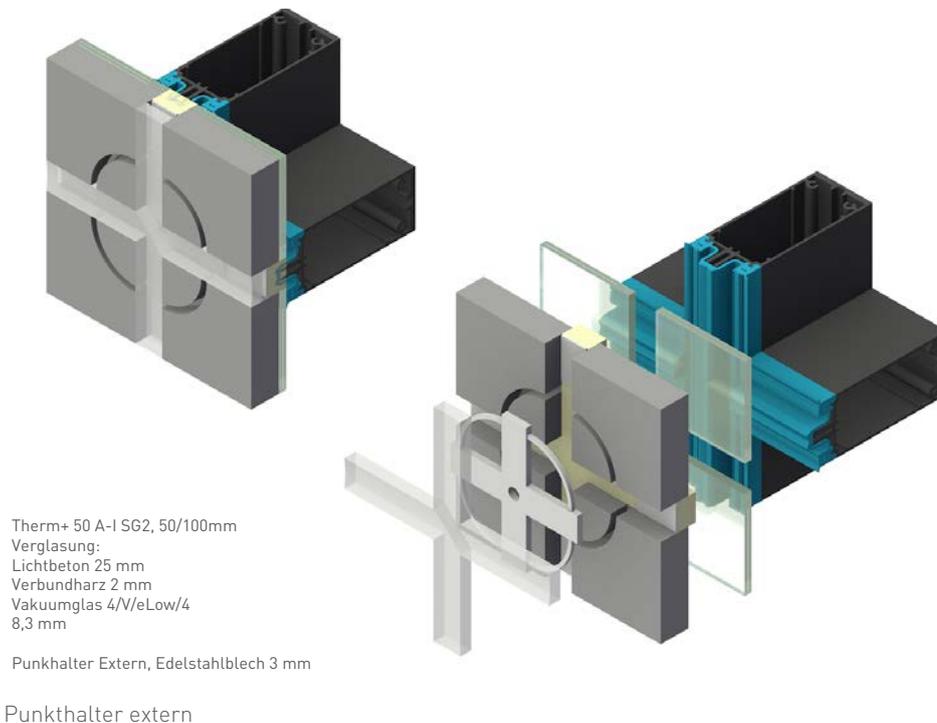
Glasaufbau M09 - Vakuumglas + Glasbausteine in Structural Glazing Konstruktion, Visualisierungsentwurf



Quelle: Ocanto

Abbildung 25

Glasaufbau M03 - Vakuumglas + Lichtbeton in Structural-Glazing-Konstruktion, externer Punkthalter, Studie



Quelle: Ocanto

Dichtungen und Direkt-Verklebung

Im laufenden Forschungsprojekt werden neuartige Silikone verwendet: wärmedämmendes Silikon an der Dichtung der Konstruktionsaußenseite und wärmeleitendes Silikon an der Dichtung der Konstruktionsinnenseite. Unsere Berechnungen zeigen, dass weitere Verbesserungen des thermischen Bauteilverhaltens möglich sind, wenn die Wärmeleitfähigkeiten der äußeren und raumseitigen Überdeckung des Glasrandverbundes (Dichtungen) optimiert werden.

Im Forschungsprojekt „VG-WALL“ wurde schon folgende Annahme untersucht: Wenn in der vorteilhaftesten Konfiguration raumseitig Wärme zur kritischen Anschlussstelle des Verglasungs-Rahmens geleitet und außen-seitig Material mit möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit zur Überdeckung angebracht wird, wirkt sich dieses auf die Gesamt-Energieeffizienz positiv aus. Auf diese Weise kann das Aluminium-Profil effektiv als Kollektor genutzt und der Randverbund der Vakuumverglasung zur Vermeidung von Kondensatbildung gezielt minimal erwärmt werden, ohne dass hierdurch viel Energie nach außen verloren geht. Das Aluminium-Profil kann also effektiv als Kollektor genutzt werden, wenn der Randverbund der Vakuumverglasung zur Vermeidung von Kondensatbildung minimal erwärmt wird.

Es kann so insbesondere in Kombination mit dem im Forschungsprojekt untersuchten Exponaten mit reduziertem Glasrandverbund der Wärmeschutz von Pfosten-Riegel- und Ganzglas-Fassaden mit Vakuumverglasung nochmals deutlich verbessert werden. Es gilt die Regel: Raumseitig müssen wärmeleitende und außenseitig wärmedämmende Materialien zum Einsatz kommen.

Die entwickelten neuen Glas-Aufbauten sind prinzipiell als Verbundglas konzipiert. Die Zwischenschicht wird je nach Materialbeschaffenheit entweder mit Folien oder Gießharz laminiert, siehe auch Kapitel 6. Bei spiegelglatten Materialien wie Glaskeramik, Floatglas und Lichtbeton ist der Einsatz von Folien geeigneter. Bei unregelmäßigen Oberflächen wie bei Gussgläsern und Glasklinkern stellte sich heraus, dass eine flüssige Verbundmasse besser einsetzbar ist.

Das Konzept 01 Teil A des Forschungsprojektes Vakuumglas_WALL sieht eine Direktverklebung vor. Die Direktverklebung ist als Produktionsverfahren relativ unkompliziert und das Ergebnis ist effektiv und effizient. Diese Art von Verklebung erweist sich als nachteilig, wenn diese nach Ablauf der Nutzungsdauer rückgebaut werden soll. Die Trennung bzw. der Rückbau der Komponenten der Glasaufbauten ist aufwendig, dabei werden die Komponenten erstmal mechanisch getrennt und anschließend werden die bei der Trennung entstandenen Rückstände ausgewaschen bzw. aufgelöst. Danach werden Komponenten und Abfallmaterial nochmals sortiert, getrennt und zum Recycling vorbereitet. In Anbetracht dieser Problematik, wurde ein anderes Konzept (Konzept 01 Teil B) vorgeschlagen, um die Rückbaubarkeit der Glasaufbauten zu vereinfachen.

Das Konzept 01 Teil B des Forschungsprojektes Vakuumglas_WALL sieht eine Linienverklebung vor und ist weniger invasiver als eine direkte Verklebung um den Glasverbund einfacher und umweltschonender rückzubauen. Dabei wurde wie bei herkömmlichen Isoliergläsern auch an eine Linienverklebung der Ränder der Verglasungskomponenten (diverse Glasaufbauten VG + transluzente Materialien) gedacht. Durch dieses Konzept wurde auch eine Verbesserung des Wärmeschutzes im Randbereich erreicht. Die transluzenten Materialien der entwickelten Glasaufbauten (Lichtbeton, Glaskeramik und Glasklinker) haben eine Stärke von 25 bis 50 mm. Die entstandenen Glasaufbauten mit Vakuumglas sind fast so stark wie Panzer- oder Brandschutzglas.

Die Verklebung der Vakuumglasscheiben mit den ausgewählten transluzenten Materialien soll mittels eines Abstandhalters befestigt werden. Dabei entsteht ein Scheibenzwischenraum. Die entstandene Kavität bzw. der SZR soll vor Schmutz und Wassereintritt geschützt werden und dauerhaft dicht sein. Im Konzept 02 werden die Voll-Glas-Klinker und das VG laminiert und die Profilbauglas-Elemente werden mechanisch an den Profilen der Fassade befestigt ohne direkte Verklebung. Nur die Fuge zwischen den Profilglasbau-Elementen wird mit Silikon abgedichtet um einer Verschmutzung vorzubeugen und der Witterung standzuhalten. Siehe Abb. 26

5.4 Modellaufbauten und Fassadensystem, Übersicht

Konzept 01 u. Konzept 02, Übersicht der Modellaufbauten

Abbildung 26

Fassaden System Therm+ A-I und SG mit Aufbauten

	Aufbau M01 Laminiertes Glas Vakuumglas	Aufbau M02 VSG Floatglas schalbare EC Beschichtung Vakuumglas	Aufbau M03 Vakuumglas Lichtbeton	Aufbau M04 Profilbauglas Vakuumglas	Aufbau M07 Vakuumglas Glaskeramik	Aufbau M09 Voll-Glasbausteine Vakuumglas
Konzept 01 Teil A Direkte Verklebung Pfosten-Riegel Raico THERM+ 56 A-I						
Konzept 01 Teil A Direkte Verklebung Structural-Glazing Raico THERM+ 50 A-I						
Konzept 01 Teil B Lineare Verklebung Pfosten-Riegel Raico THERM+ 56 A-I						
Konzept 01 Teil B Lineare Verklebung Structural-Glazing Raico THERM+ 50 A-I						
Konzept 02 Direkte Verklebung Raico THERM+ 56 A-I						
Konzept 02 mechanische Verbindung, ohne Verklebung Raico THERM+ 56 A-I						

warm edge Silikon Wärmeleitendes Silikon Wärmedämmung

Quelle: Ocanto

5.5 Modellaufbauten, Konzept 01

Wie im Abschnitt Simulationen der Fassadensysteme (siehe Kapitel 7) beschrieben, wurden Detailanschlüsse der Glasaufbauten an Pfosten-Riegel Fassaden und Ganzglass-Fassaden Structural Glazing des Konzeptes 01 simuliert. Hierbei wurden die unterschiedlichen Aufbauten mit den konstruktiven Maßnahmen und Parametern (siehe auch Abb. 40 u. Abb. 41) untersucht.

Die Art der Verklebung in Kombination mit der Fassadenkonstruktion Pfosten-Riegel oder Structural Glazing beeinflusst das thermische Verhalten der Aufbauten und in Konsequenz des Randverbundes. Bei dem Konzept 01 (die VG Verglasung im Verbund) werden zwei Teilkonzepte differenziert: Teil A, Aufbauten in Direkt-Verklebung der Aufbauten Schichten an Pfosten-Riegel Fassaden und Teil B Lineare Verklebung der Aufbau Schichten an den Rändern mit SZR (spacer).

Hierbei sind alle Komponenten der Verglasung auf nur einer Ebene zusammengeführt. Bei dem so entstandenen Modul isolieren dauerhaft die Verbund-Glasscheiben und Funktionsschichten das Innenklima gegenüber dem Außenklima.

Montage der folgenden Fassadensysteme:

Pfosten-Riegel, Semi Structural Glazing, Structural Glazing und Punkt gehaltene Fassaden

Material-Kombinationen:

- a) Glas-Beschichtung-Glas/Spezialgläser
- b) Glas-Beschichtung/Verbund/Lichtbeton
- c) Glas-Folie im SZR/Glas mit Glas-Verbund-Metallgewebe/Vakuumglas

Beim Konzept 01 – Teil A ist der Rückbau aller Glas-Aufbauten durch mechanische Trennung der Glas- und Folienschichten möglich, aber aufwendig. Ein erneuter Einbau der neu entwickelten Glas-Module ist nach dem Rückbau dank seiner langen Lebensdauer und Montageart sinnvoller.

In Konzept 01 – Teil B gewährleistet die Linien-Verklebung mit Scheiben-Zwischenraum und Ventile den Druckausgleich und begünstigt zugleich den Rückbau bzw. das Recycling durch Trennung der einzelnen Komponenten.

5.6 Modellaufbauten, Konzept 02

Im Konzept 02 wird der Glasaufbau 09, Voll-Glasbaustein mit VG im Direkt-Verklebungs-Verfahren Struktural-Glazing Fassaden simuliert sowie Pfosten-Riegel des Fassadensystems Raico Therm+ A-I simuliert. Die Bautiefe der Aufbauten beträgt mit halbe Steine bzw. 50 mm. Das Fassadensystem THERM A-I erlaubt eine Bautiefe bis 64 mm.

Der Aufbau M04 - Profilbauglas mit einer Flansch-Höhe von 40 mm passt in Pfosten-Riegel System Raico Therm + A-I. In Structural-Glazing-Systeme wird der Aufbau 04 – Profilbauglas nicht angepasst. Eine Übersicht der Aufbauten und die Unterteilung der Konzepte wird je nach Fassadentyp in Abb. 26 dargestellt.

Die bauphysikalischen Eigenschaften der entwickelten Glas-Aufbauten wurden mittels FEM-Simulationen überprüft. Der Wärmeschutz ist durch das Vakuumglas gewährleistet. Die Lage der Vakuumverglasung ist generell an der Innenseite der Glasaufbauten, mit Ausnahme bei der Kombination mit Lichtbeton.

Beton ist je nach Rezeptur ein hervorragender Wärmespeicher. Dabei wirkt der Lichtbeton des Glasaufbaus wie eine Trombe-Wand und bringt vor allem in den kalten Jahreszeiten thermischen Komfort in den Innenräumen (siehe auch Kapitel 5). Teil-Ergebnisse der Simulationen werden im Kapitel 7 - Ergebnisse erläutert.

Nach Abschluss der durchgeführten Simulationen werden die Prototypen als Demonstratoren gebaut. Jeder Demonstrator wird im Maßstab 1:1 gebaut. Die Demonstratoren bestehen aus einem Glasaufbau und einer Rahmenkonstruktion als Pfosten-Riegel oder als Structural-Glazing System, je nach Beschaffenheit des Aufbaus (siehe Kapitel 7).

Die Demonstratoren haben eine Dimension von: 1500 mm x 500 mm. Dieses Maß ergibt sich aus der Größe der Lichtbetonplatten, die in einer maximalen Größe von 620 mm x 1600 mm herstellbar und verfügbar sind.

Der Demonstrator des Profilbauglases ist etwas breiter in der Ausführung und hat eine Dimension 1500 mm x 750 mm.

5.7 Case Study – Fassadengestaltung mit Vakuumglas_WALL Fassadenelemente

Funktion und Ornament, Programm und Gestaltung

„Architektur braucht Mechanismen, die es ihr ermöglichen, sich mit der Kultur zu verbinden.

Dies wird erreicht, indem sie die Kräfte, die die Gesellschaft formen, immer wieder Material aufnimmt, mit dem sie arbeiten kann. Die Materialität der Architektur ist also so zusammengesetzt, dass sie sowohl aus sichtbaren als auch aus unsichtbaren Kräften besteht. Der Fortschritt in der Architektur vollzieht sich durch neue Konzepte, durch die sie sich mit dem Material verbindet und manifestiert sich in neuen ästhetischen Kompositionen und Affekten. Es sind diese neuen Affekte, die es ermöglichen uns ständig auf neue Weise mit der Stadt auseinanderzusetzen.“ *

* Übersetzung Auszug aus The Function of Ornament, Farshid Moussavi,

Materialien und Formate

Im Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL wurden mehrere Materialien ausgewählt, die mit Vakuumglas kombiniert worden sind. Diese Materialien haben unterschiedliche Qualitäten und vor allem unterschiedliche Formate und Materialstärken, die die Fassade strukturieren. Diese Materialien wurden in erster Linie an das Fassadensystem adaptiert und verifiziert. Eine Untersuchung der Gestaltungsmöglichkeiten und der sinnvolle Einsatz bezüglich Gebäudetyp im Neubau und auch bei der energetischen Sanierung im Bestand wurde vorgenommen und soll in diesem Kapitel erläutert werden. Die Materialien wurden nach Format anhand von Herstellerangaben sortiert und ausgewählt. Die Format-Auflistung der gewählten Materialien ist wie folgt:

1) VAKUUMGLAS

Vakuumglas wird im Vergleich zu heutigen Formaten eines Floatglases aus Produktionsgründen in relativ kleinen Formaten hergestellt. Interessant für das Forschungsprojekt sind folgende Produkte:

- Vakuumglas der Firma EAGON Industrial Co., Südkorea
Maximale VG-Scheibengröße: 2000 mm x 2400 mm
- Vakuumglas Produkt FINEO der Firma AGC Glass Europe, Belgien
Maximale VG-Scheibengröße: 1500 mm x 2500 mm oder 1600 mm x 2400 mm
- Vakuumglas der Firma Taiwan Glass Industry Co., Taiwan
Maximale VG-Scheibengröße: 2500 mm x 1500 mm; Sonderfertigung: 1800 mm x 3600 mm

2) GUSSGLAS

- Gussglas, Ornamentglas Typ Estriado der Firma Saint Gobain Glass
Maximale VG-Scheibengröße: 4 mm Stärke, 2160mm x 1650 mm und 3200 mm x 1650 mm;
6 mm Stärke, 3210 mm x 1650 mm.

3) PROFILBAUGLAS

- Profilbauglas Typ Primasolar der Firma Lamberts
Format pro Element: Breite 262 mm, Flach Höhe 60 mm, Glasstärke 7 mm; Länge 1000 mm bis 7000 mm.

4) LICHTBETON

- Lichtbetonplatten Typ LINE der Firma LUCEM GmbH, Aachen
Formate: 1200 mm x 600 mm, 1600 mm x 600 mm; Dicken 20 mm / 30 mm

5) GLASKERAMIK

- Glaskeramikplatten der Firma Magna Glas GmbH
Formate: 2800 mm x 1250 mm, 2700 mm x 1200 mm, 3400 mm x 1400 mm: Stärken 21 mm (Standard),
Alternativ 15 mm und 23 mm.

6) GLASBAUSTEINE

- Formate: Glasbausteine des Herstellers Fuchs Design: 200 mm x 100 mm x 50 mm; 100 mm x 100 mm x 50 mm; 50 mm x 100 mm x 50 mm.

Entwurfsstrategie

Nach Sortierung und Auswertung der Materialformate wurde folgendes festgestellt:

- Die Formate der VG-Hersteller sind fast gleich, nur Taiwan Glass ist in der Lage größere Scheiben anzubieten.
- Alle Materialformate sollten an die VG-Formate angepasst werden. VG wird als Wärme- und Schallschutz mit den verschiedenen Materialien kombiniert aber nicht die gewählten transparenten und transluzenten Materialien miteinander.
- Die Lichtbetonplatten hatten die kleinsten Dimensionen von allen Formaten. Um zu viele Stoßfugen zu vermeiden sollte eine neue Lösung erdacht werden.

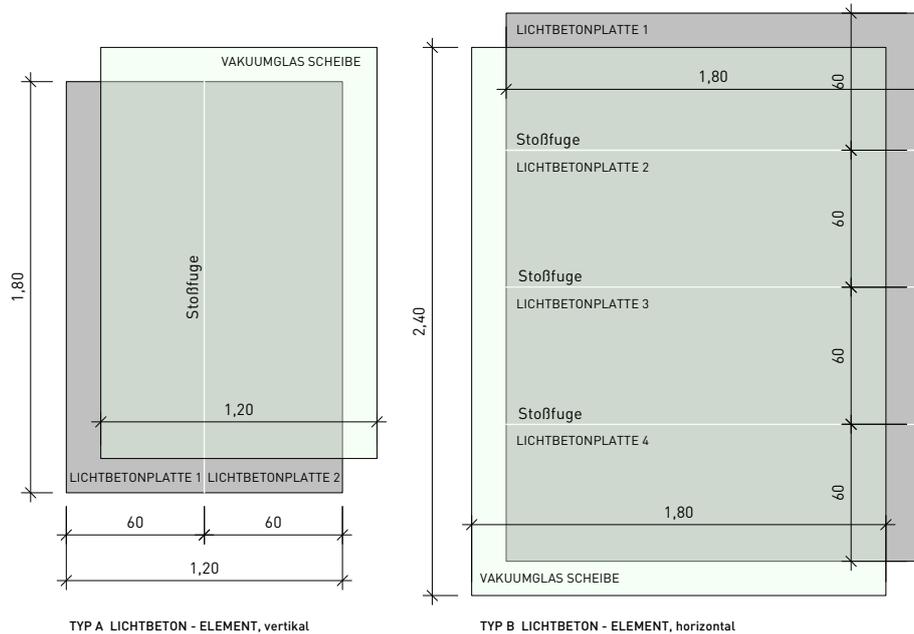
Die erste Strategie war ein Rastermaß zu finden, um mögliche Plattenformate bei den Glasaufbauten zu generieren. Die Entscheidung fiel auf die gängigen Mauerwerksmaße basierend auf dem sogenannten oktamerischen Maßsystem, dessen Grundeinheit (Baurichtmaß) von 12,5 cm der achte Teil eines Meters ist. Damit können die Glasaufbau-Formate passend sowohl im Bestand als auch Neubau eingesetzt werden.

Es wurde eine Anpassung der Lichtbetonplatten vorgenommen. Die Lösung war, die Längsseite der Formate der Lichtbetonplatten auf die Breite der VG-Scheiben anzupassen. An der Längsseite der VG-Scheiben werden die Lichtbetonplatten verlegt bzw. laminiert. Die entstehenden Stoßfugen von ca. 0,5 mm werden mit einem klaren Silikon verfügt, so dass sie anschließend optisch wie eine Lichtzeile im Lichtbeton wahrgenommen werden. Anordnung und Anpassung der Lichtbetonplatten an die Vakuumglas-Scheibe siehe Abb. 27.

Um die Glasaufbauten und deren Formate zu verifizieren wurde ein Gebäudeentwurf vorgeschlagen. Es handelt sich hierbei um einen Wohnungsbau mit Gewerberäumen im Erdgeschoss. Das Gebäude besteht aus 5-Vollgeschossen inkl. Dachgeschoss. Das Dach besteht aus 3 Sheddach-Elementen, die für eine bessere Belichtung und Belüftung der Dachgeschoss-Wohnungen sorgen und zur Montage von PV-Modulen dienen. Die Platzierung und Anordnung der Fassadenelemente wurde nach dem Raumprogramm des vorgeschlagenen Wohn-Gebäudes geplant. Die Transparenz oder Dichte der transluzenten Elemente entsprechen der programmatischen Nutzung der Räume. Aufenthaltsräume wie Wohnzimmer, Schlafzimmer oder Arbeitszimmer wurden mit transparenter Verglasung versehen; Verkehrsflächen, Wohnungseingänge und Nebenräume wurden mit transluzenten Elementen bestückt. An der Straßenseite liegt, nach südwest orientiert, die Hauptfassade. An dieser Seite war der Sonnen- und Schallschutz besonders zu berücksichtigen. An der Nordostseite sowie an der Sheddach-Verglasung sind leichtere transluzente Fassade-Elemente vorgesehen.

Abbildung 27

Anpassung der Formate an einer Vakuumglas-Scheibe, Beispiele Fugenbildung Lichtbetonplatten horizontal Typ A und vertikal Typ B



Quelle: Ocanto

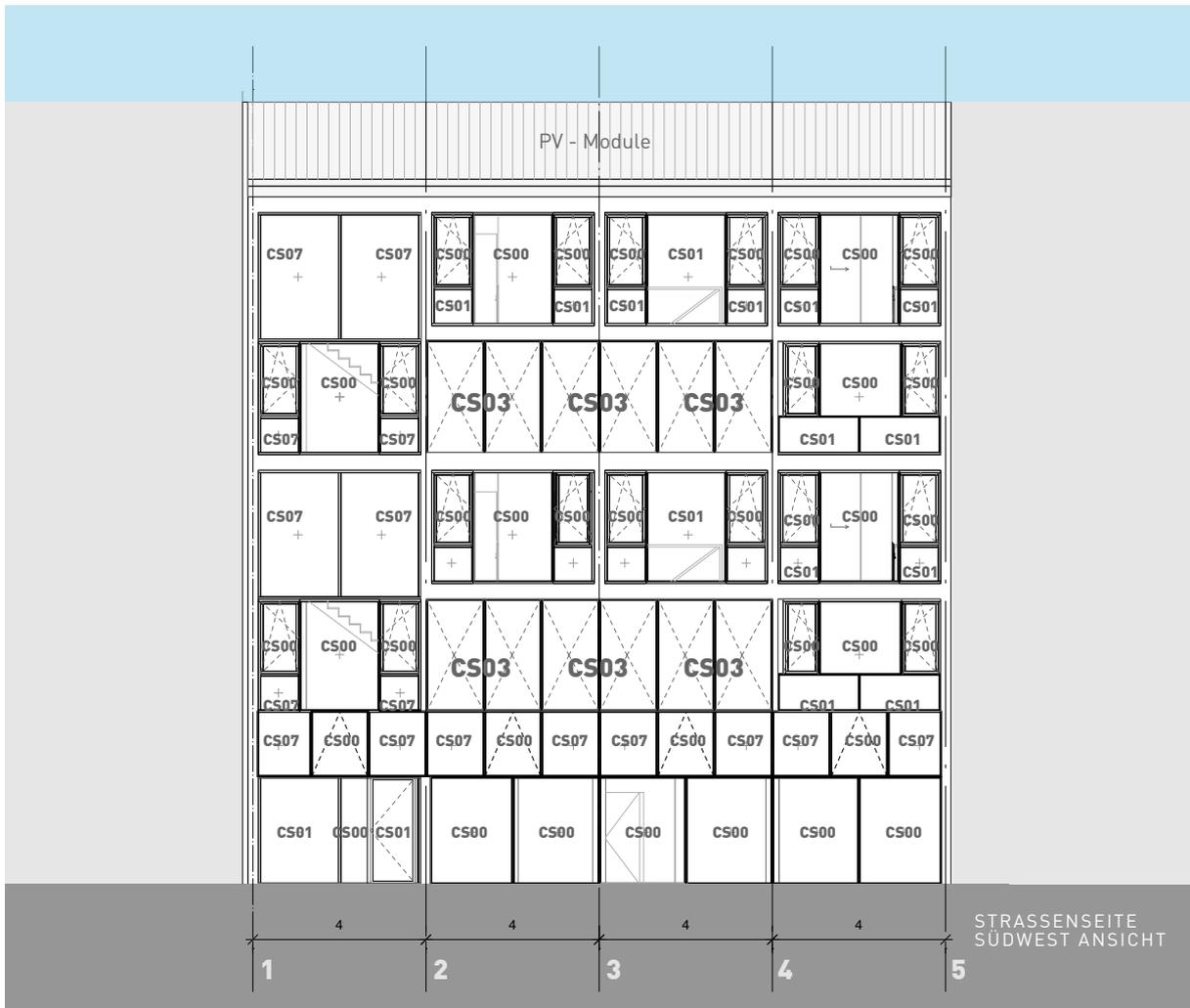
Fassadenelement Typen

Als Grundtypen wurden folgende Fassadenelemente vorgeschlagen:

- 1) Typ CS00: 0a) Festverglasung Maße 1800 mm x 2450 mm
0b) Dreh- Kippfenster Maße 875 mm x 1575 mm
0c) Senk- Klappfenster Maße 1125 mm x 1475 mm
- 2) Typ CS01: 1a) Festverglasung Maße 1800 mm x 2450 mm
1b) Festverglasung Maße 1800 mm x 2875 mm
1c) Festverglasung Maße 875 mm x 800 mm
- 3) Typ CS02: Festverglasung Maße 2500 mm x 2000 mm
- 4) Typ CS03: Drehbares Pivot-Fassadenelement Maße 1250 mm x 2500 mm
- 5) Typ CS07: 7a) Festverglasung Maße 1800 mm x 2875 mm
7b) Festverglasung Maße 800 mm x 875 mm
7c) Festverglasung Maße 1125 mm x 1475 mm
7d) Brüstungs-Element Maße 800 mm x 1800 mm
- 6) Typ CS09, 9a) Festverglasung Maße 2500 mm x 900 mm

Die aufgelisteten Grundtypen wurden im Studienfall-Entwurf eingesetzt. Visualisierungen der Ansichten und Innenräume zeigen das Erscheinungsbild eines Vakuumglas_WALL Gebäudes. Die Maße der Grundtypen entsprechen den Maßen der erwähnten Vakuumglas Hersteller. Somit wurde die Frage zur Einsatzfähigkeit des Vakuumglases unter Berücksichtigung der beschränkten Dimensionen der zur Verfügung stehenden Vakuumglas-Scheiben gelöst. Die Abbildungen 28 bis 32 zeigen das Case Study Gebäude und die Anordnung, Platzierung und Funktion der im Forschungsprojekt entwickelten neuen Fassadenelemente.

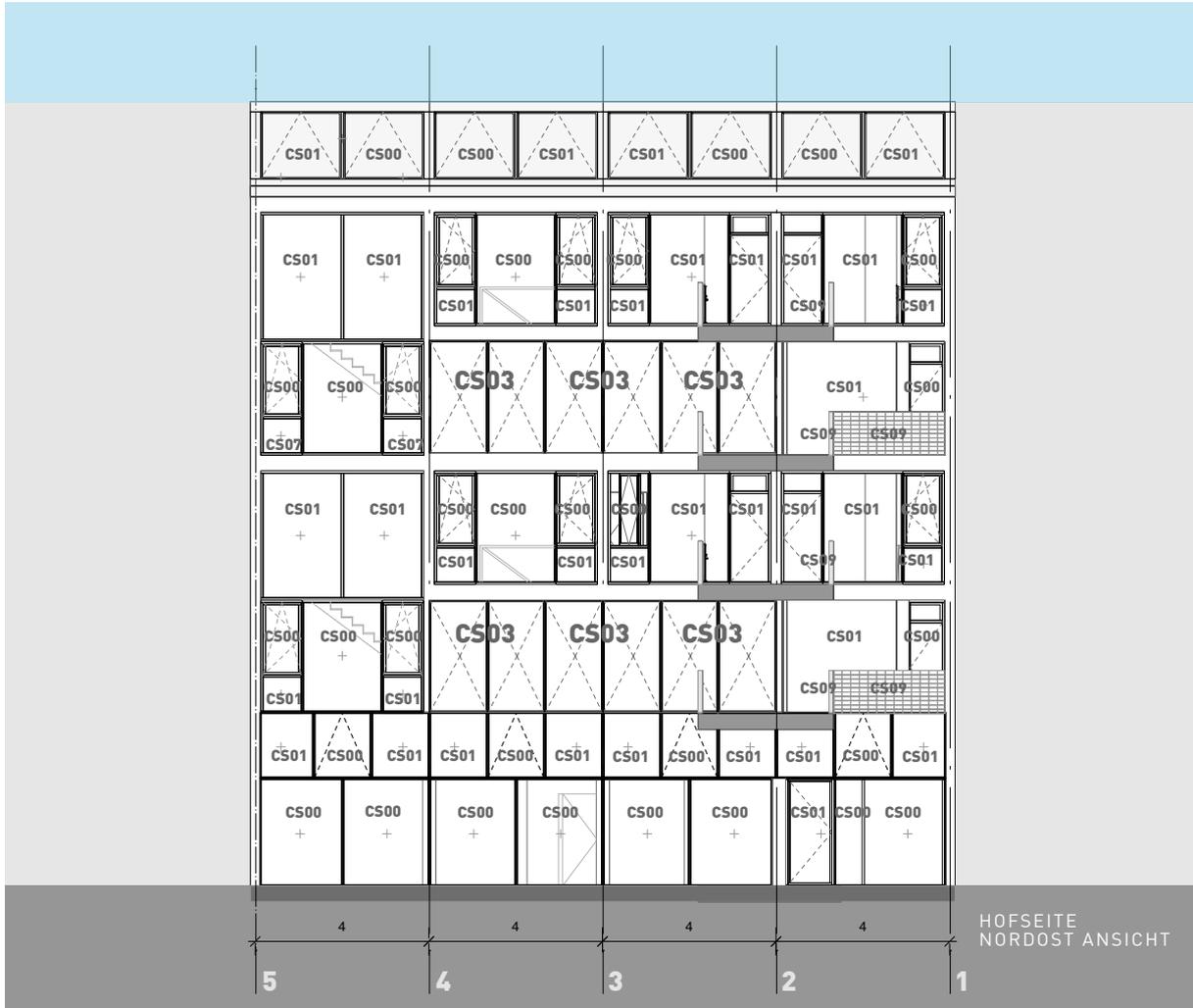
Abbildung 28
Fassadenelement Typen und Eigenschaften, Beispiel Case Study Wohn-Geschäftshaus, Südwest Ansicht



Fassadenelement Typ	Glasaufbau	Zweck	Bedarfsgesteuerte Funktion	Betrieb	Komponenten System	Sichtbarkeit optische Wirkung
CS00 Vakuumglas	M00	visuell und akustisch	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Transluzent Opak
CS01 Vakuumglas + Gussglas, prismastruktur	M01	visuell und akustisch	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv von Außen wirkend	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Transluzent Opak
CS02 Vakuumglas + Schaltbares Glas	M02	visuell und akustisch	Vorbeugen Modulieren Speichern	Aktiv von Innen wirkend	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Transluzent Opak
CS03 Vakuumglas + Lichtbeton	M03	thermischer und akustischer Komfort	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv, drehbar von Innen und Außen wirkend	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Transluzent Opak
CS07 Vakuumglas + Glaskeramik	M07	thermischer und akustischer Komfort	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv, drehbar von Innen und Außen wirkend	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Transluzent Opak
CS09 Vakuumglas + Glasbaustein, Vollglas	M09	Akustischer Komfort	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv	Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Transluzent Opak

Quelle: Ocanto

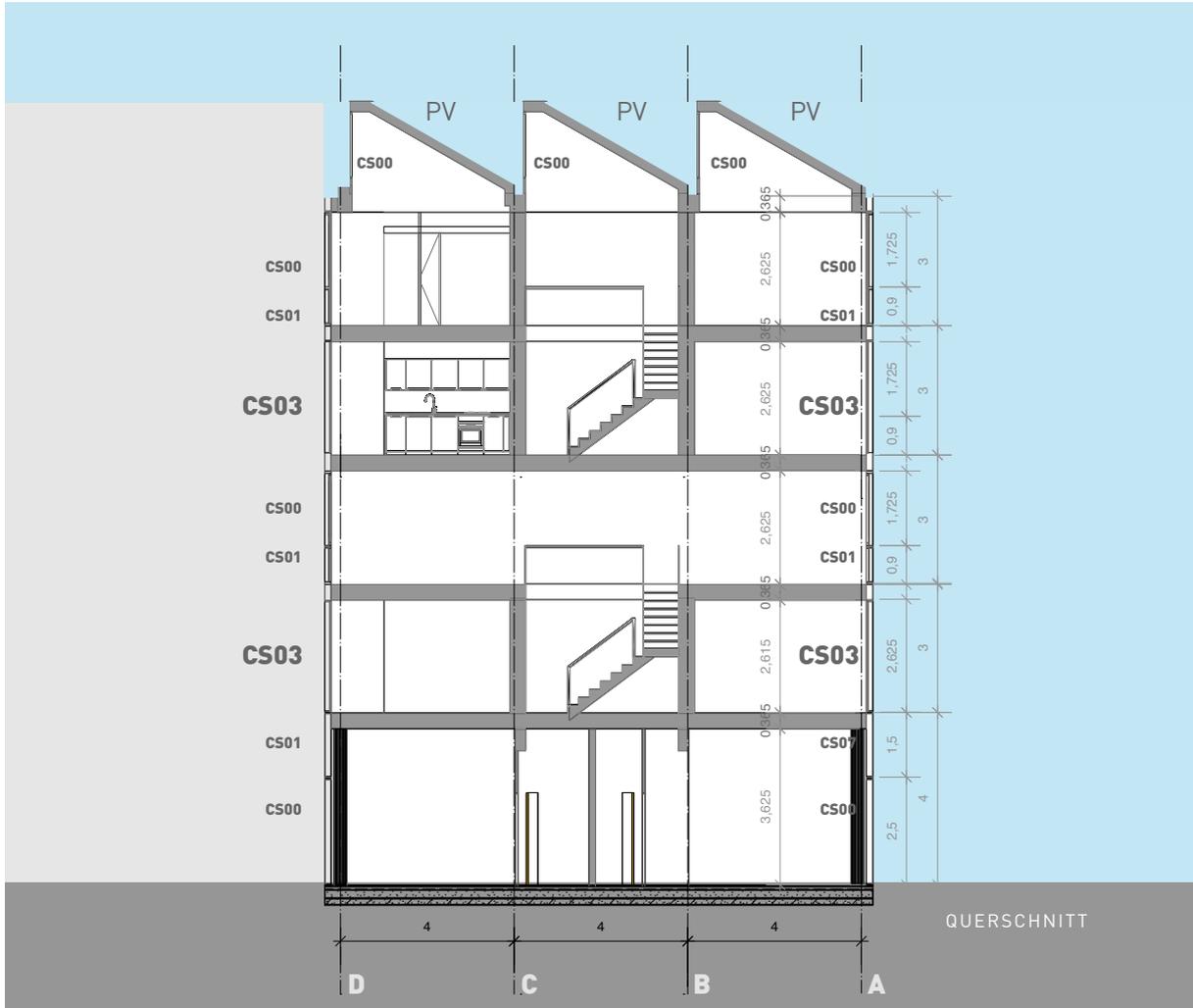
Abbildung 29
Fassadenelement Typen und Eigenschaften, Beispiel Case Study Wohn-Geschäftshaus, Nordost Ansicht



Fassadenelement Typ	Glasaufbau	Zweck	Bedarfsgesteuerte Funktion	Betrieb	Komponenten System	Sichtbarkeit optische Wirkung
CS00 Vakuumglas	M00	visuell und akustisch	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Transluzent Opak
CS01 Vakuumglas + Gussglas, prismastruktur	M01	visuell und akustisch	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv von Außen wirkend	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Transluzent Opak
CS02 Vakuumglas + Schaltbares Glas	M02	visuell und akustisch	Vorbeugen Modulieren Speichern	Aktiv von Innen wirkend	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Transluzent Opak
CS03 Vakuumglas + Lichtbeton	M03	thermischer und akustischer Komfort	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv, drehbar von Innen und Außen wirkend	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Transluzent Opak
CS07 Vakuumglas + Glaskeramik	M07	thermischer und akustischer Komfort	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv, drehbar von Innen und Außen wirkend	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Transluzent Opak
CS09 Vakuumglas + Glasbaustein, Vollglas	M09	Akustischer Komfort	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv	Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Transluzent Opak

Quelle: Ocanto

Abbildung 30
Fassadenelement Typen und Eigenschaften, Beispiel Case Study Wohn-Geschäftshaus, Querschnitt

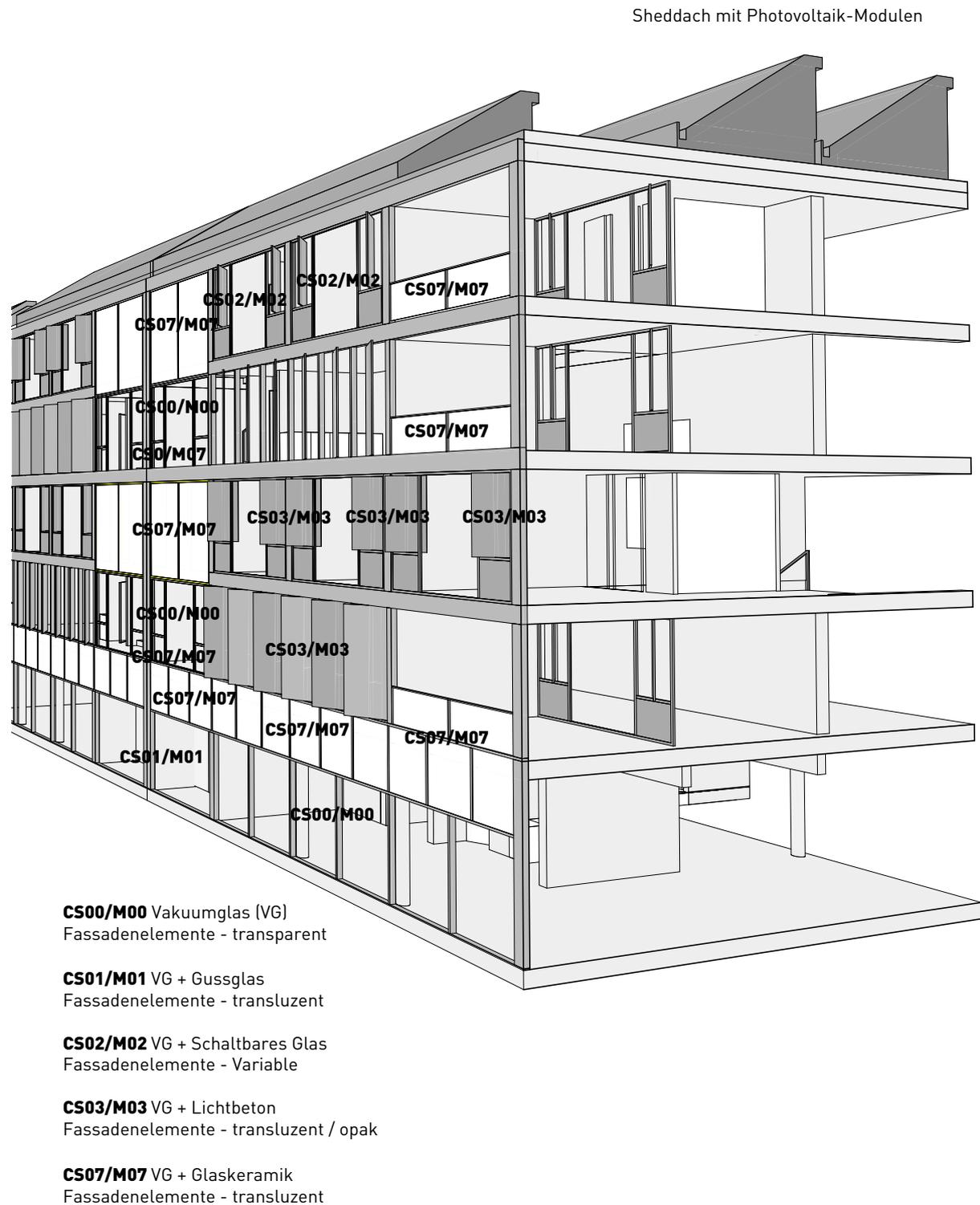


Fassadenelement Typ	Glasaufbau Typ	Zweck	Bedarfsgesteuerte Funktion	Betrieb	Komponenten System	Sichtbarkeit optische Wirkung
CS00 Vakuumglas	M00	Visuell und akustisch	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Translucent Opak
CS01 Vakuumglas + Gussglas, prismastruktur	M01	Visuell und akustisch	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv von Außen wirkend	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Translucent Opak
CS02 Vakuumglas + Schaltbares Glas	M02	Visuell und akustisch	Vorbeugen Modulieren Speichern	Aktiv von Innen wirkend	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Translucent Opak
CS03 Vakuumglas + Lichtbeton	M03	thermischer und akustischer Komfort	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv, drehbar von Innen und Außen wirkend	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Translucent Opak
CS07 Vakuumglas + Glaskeramik	M07	thermischer und akustischer Komfort	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv, drehbar von Innen und Außen wirkend	Sonnenschutz Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Translucent Opak
CS09 Vakuumglas + Glasbaustein, Vollglas	M09	Akustischer Komfort	Vorbeugen Modulieren Speichern	Passiv	Wärmedämmung Schallschutz	Transparent Translucent Opak

Quelle: Ocanto

Abbildung 31

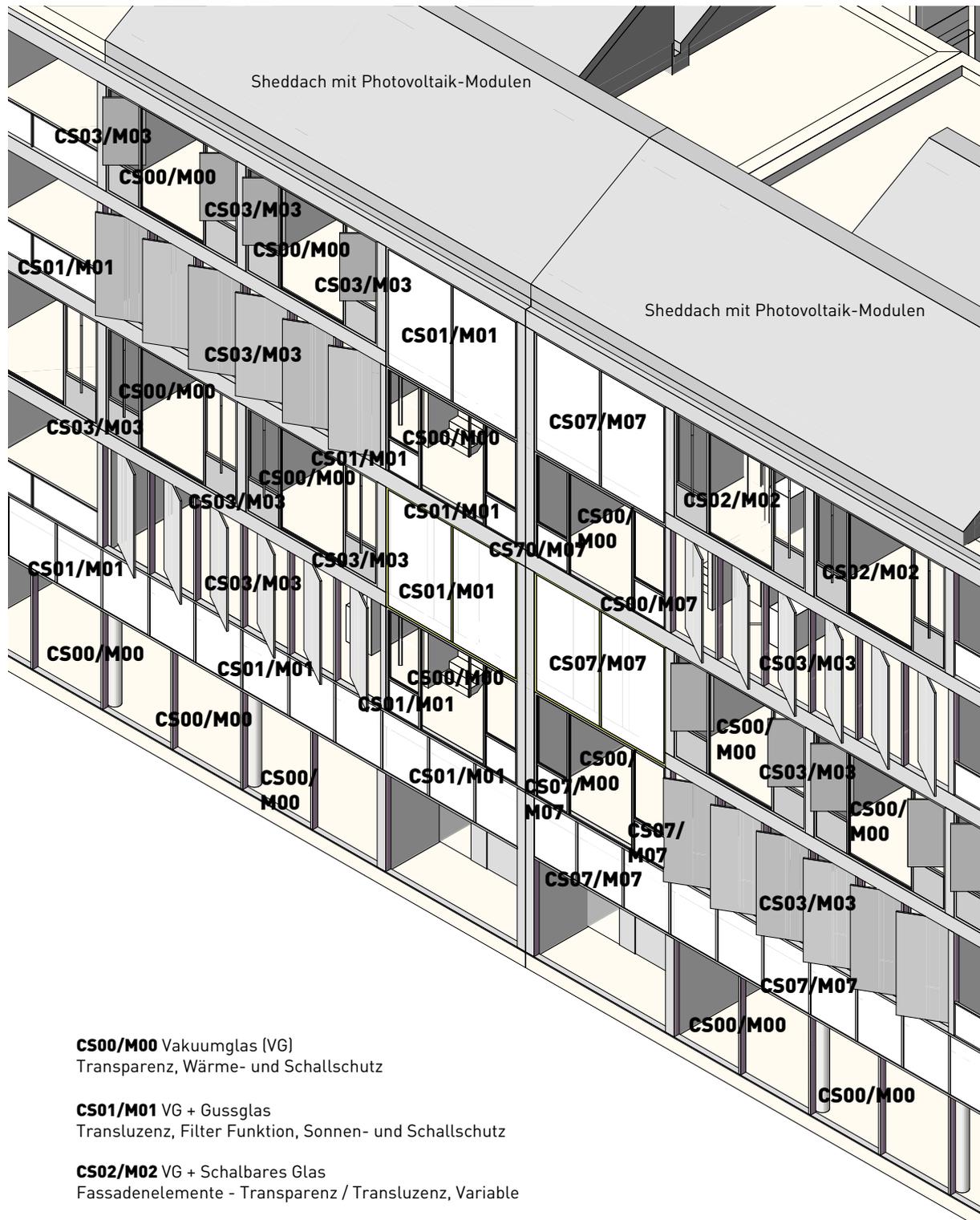
Fassadenelement Typen und Eigenschaften, Beispiel Case Study Wohn-Geschäftshaus, Querschnitt und Perspektive



Quelle: Ocanto

Abbildung 32

Fassadenelement Typen und Eigenschaften, Beispiel Case Study Wohn-Geschäftshaus, Axonometrie Straßenseite



CS00/M00 Vakuumglas (VG)
 Transparenz, Wärme- und Schallschutz

CS01/M01 VG + Gussglas
 Transluzenz, Filter Funktion, Sonnen- und Schallschutz

CS02/M02 VG + Schalbares Glas
 Fassadenelemente - Transparenz / Transluzenz, Variable

CS03/M03 VG + Lichtbeton
 Fassadenelemente - transluzent / opak, Filter und Speicherfunktion

CS07/M07 VG + Glaskeramik
 Transluzenz, Filter Funktion, Wärme- und Schallschutz

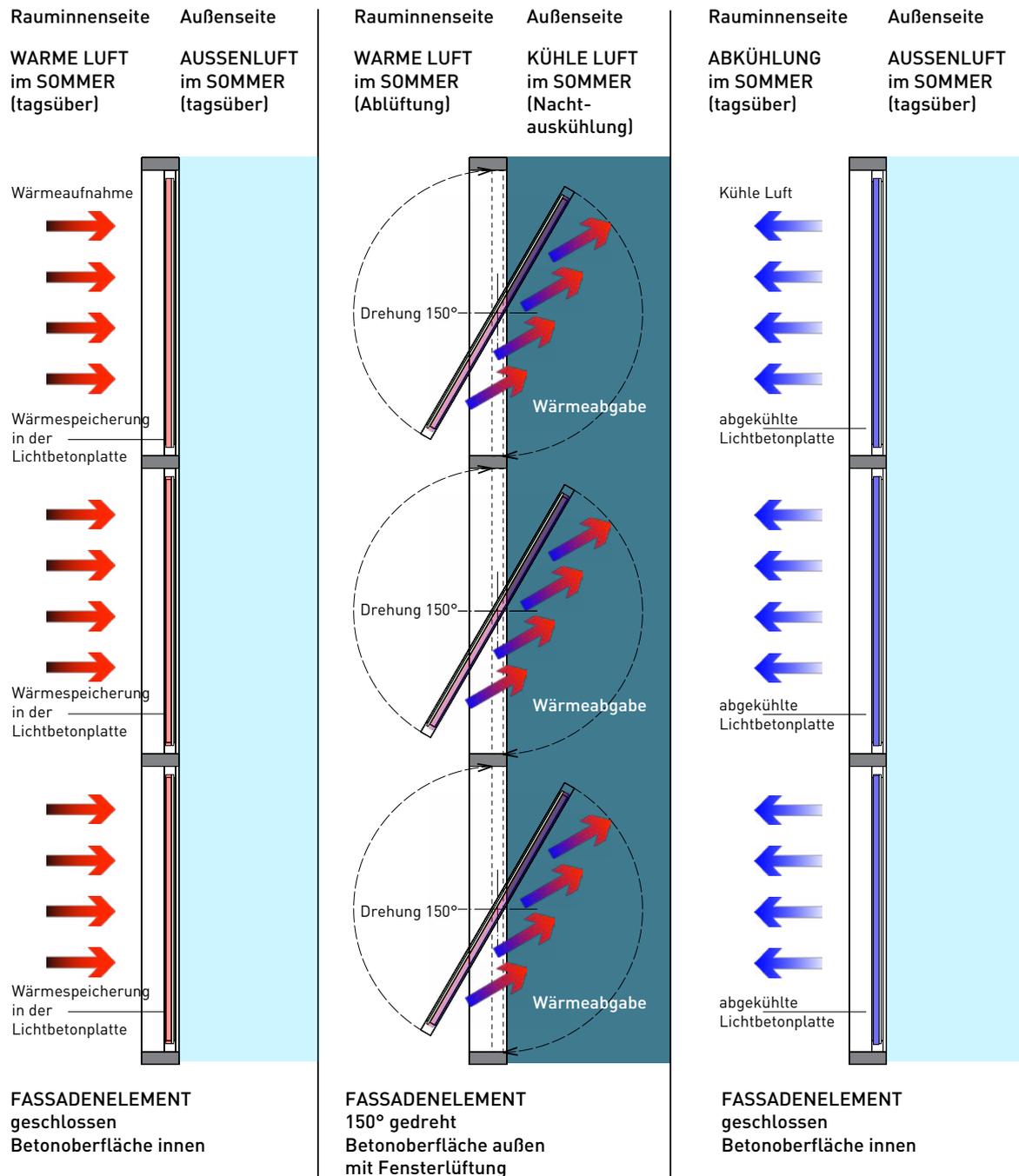
Quelle: Ocanto

Fassadenelement Typ CS03 / M03

Das Fassadenelement CS03 / M03 ist drehbar und erfordert eine detailliertere Funktions-Beschreibung, da dieses Element eine besondere Leistung hervorbringt. Das Element CS03 besteht wie alle anderen aus Vakuumglas und wird mit einer Lichtbetonplatte kombiniert. Auf Grund der Wärme-Speicherfähigkeit des Betons funktioniert dieses Fassadenelement wie eine Art Trombe-Wand.

Abbildung 33

Thermisches Konzept- und Funktionsschema des drehbaren Fassadenelementes CS03 / M03



GRUNDRISS | HORIZONTALSCHNITT FASSADENELEMENT | VAKUUMGLAS + LICHTBETON

Quelle: Ocanto

Die Betonseite des Glasbauelementes ist im Raum an der Innenseite der Verglasung und dem Vakuumglas an der Außenseite platziert. Diese Anordnung des Vakuumglases ist in den kalten Jahreszeiten wegen des Wärmeschutzes der Vakuum-Verglasung in der kalten Witterung günstiger. Die Betonplatte speichert auch die Wärme des beheizten Innenraumes und sorgt so für thermischen Komfort und verbessert die Energieeffizienz des Glasaufbaus passiv durch Phasenverschiebung. In den warmen Jahreszeiten kann der Beton durch Drehung nach Außen kontrolliert für den Komfort des Raumes als Kühl- und Lüftungselement eingesetzt werden (Nachtauskühlung).

Das CS03 Fassadenelement ist grundsätzlich ein geschlossenes Element, keine sogenannte Fensteröffnung, sondern ein Funktionselement der Fassade mit besonderer Leistung. Das CS03 ist Teil einer vorgehängten Fassade in einer Pfosten-Riegel-Konstruktion. Durch die Anpassung dieses Fassadenelementes als drehbarer Rahmen in der Fassadenkonstruktion kann die erwärmte Betonplatte in der Nacht im Sommer an die Außenseite der Fassade gedreht werden, um die in ihr gespeicherte Wärme aus den Innenräumen an die Außenluft wieder abzugeben (Nachtauskühlung). Die über Nacht abgekühlte Betonplatte wird dann morgens wieder in den Raum gedreht und damit wird die Wirkung der kühlen Betonwand thermisch im Innenraum genutzt. Die Innentemperatur wird gesenkt und in Konsequenz ein besseres Raumklima erreicht. Dieser Ansatz sollte im Rahmen eines Monitorings bemessen, ausgewertet und auf seine Funktions- und Leistungsfähigkeit geprüft werden.

Abbildung 34

Case Study Wohn- und Geschäftshaus, Visualisierung 01



Quelle: Ocanto

Abbildung 35
Case Study Wohn- und Geschäftshaus, Visualisierung 02



Quelle: Ocanto

Abbildung 36
Case Study Wohn- und Geschäftshaus, Visualisierung 03



Quelle: Ocanto

6 Versuche

6.1 Glasaufbauten, Testobjekte Konzept 01 und Testobjekte Konzept 02

Die Direkt-Verklebung wurde im Baustoff-Labor der FH-Dortmund, Fachbereich Architektur durchgeführt. An ausgewählten Mustern wurden die Verklebungen durch Labor-Prüfungen untersucht. Die Labor-Untersuchungen sind in drei Phasen unterteilt worden:

Phase 01: Kleinformatige Probekörper, ausgewählte Materialien und 4 mm dickes Floatglas, Abmessungen der Proben: 100 mm x 100 mm. Hierbei wurden zwei Typen von Silikonen verwendet, einen Hot-Melt Silikon Kleber für die Ränder, um die Scheiben miteinander zu verbinden und anschließend wurde die resultierende Kavität (1,5 mm) mit einem 2 - Komponenten Silikon gefüllt. Hierbei konnte die Durchführbarkeit des Klebeprozesses überprüft werden. Nach erfolgreichen Verklebungen wurden dann Probekörper mittlerer Größe angefertigt.

Phase 02: Probekörper mittlerer Größe, ausgewählte Materialien und 10 mm dickes Vakuumglas, Abmessungen der Proben: 300 mm x 100 mm. Zwei Typen von Silikonen wurden hierbei verwendet, einen Hot-Melt Silikon Kleber für die Ränder, um die Scheiben miteinander zu verbinden und anschließend wurde die resultierende Kavität (2,5 mm) mit einem 2 - Komponenten Silikon gefüllt.

Phase 03: Großformatige Probekörper, ausgewählten Materialien und 10 mm dickes Vakuumglas, Abmessung der Proben: 1500 mm x 500 mm. Auch hier wurden zwei Typen von Silikonen verwendet, den Hot-Melt Silikon Kleber für die Ränder, um die Scheiben miteinander zu verbinden und dann wird die resultierende Kavität (ca. 3,5 mm) mit einem 2 - Komponenten Silikon gefüllt.

6.2 Direkt-Verklebung, Testobjekte Serien 01, 02, 03

Die Beschreibung der Testobjekte Konzept 01 ist sehr umfangreich. Es wurden alle vorgesehenen Versuche einschließlich des Exponate- und Demonstratorenbaus durchgeführt.

6.3 Direkt-Verklebung, Adhäsionstest, Testobjekte Serie A - Schertest; Serie B - Alterungstest

Für Verbundglas können neben Prüfmethode zur Beständigkeit DIN EN ISO 12543-3 und der Bestimmung der Folienfeuchte weitere Prüfungen zur Identifikation mechanischer Eigenschaften oder als Qualitätskontrolle durchgeführt werden. Probekörper aus Verbundglas sind Lamine mit zwei Glasplatten und einer Zwischenschicht. Bis auf den Pendelschlag - und Kugelfallversuch sind die Tests nicht standardisiert, so dass abweichende Durchführungen möglich sind.

Schertest (shear test). Im Schertest wird das Verbundglas unter reinem Schub abgeschert. Die technische Schubspannung gilt als Maß für die Adhäsion auf Schub. Die Schertests wurden am Ende des Forschungsprojektes durchgeführt.

Alterungstest Der Alterungstest (künstliche Bewitterung) wurde in Anlehnung an die Norm ETAG 002 § 5.1.4.2.5 (siehe Kapitel 3 Klebstoffe und 3.5 Verträglichkeit) unter genormten Randbedingungen an eigens dafür hergestellten Mustern durchgeführt.

Beschreibung der Probekörper

Probekörper Glaskeramik,

- 3+1 Probekörper für Schertest, Probekörper Typ A (siehe Abb. 37)
 - 5+1 Probekörper für Alterungstest, Probekörper Typ B (siehe Abb. 38)
- 10 Probekörper insgesamt.

Probekörper Glasbausteine,

- 3+1 Probekörper für Schertest, Probekörper Typ A (siehe Abb. 37)
 - 5+1 Probekörper für Alterungstest, Probekörper Typ B (siehe Abb. 38)
- 10 Probekörper insgesamt.

Probekörper Lichtbeton, unbeschichtet,

- 3+1 Probekörper für Schertest, Probekörper Typ A (siehe Abb. 37)
 - 5+1 Probekörper für Alterungstest, Probekörper Typ B (siehe Abb. 38)
- 10 Probekörper insgesamt.

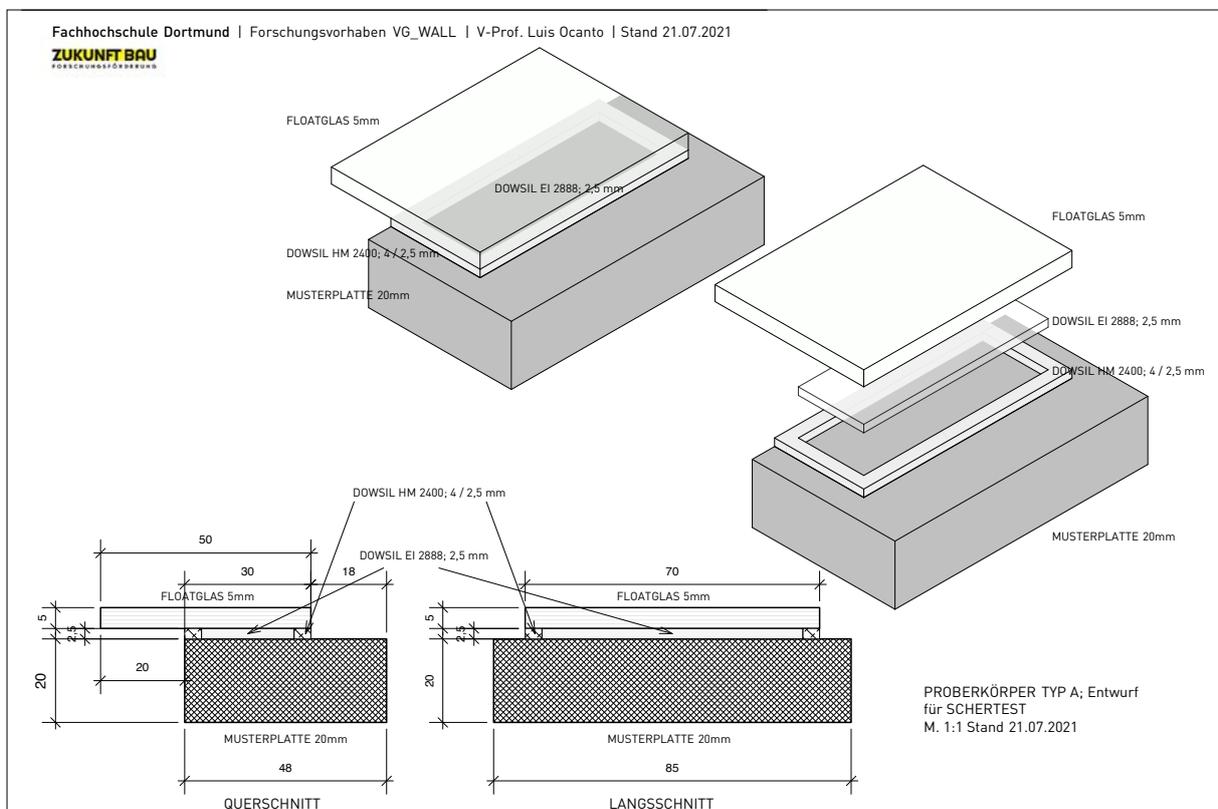
Probekörper Lichtbeton, beschichtet,

- 3+1 Probekörper für Schertest, Probekörper Typ A (siehe Abb. 37)
 - 5+1 Probekörper für Alterungstest, Probekörper Typ B (siehe Abb. 38)
- 10 Probekörper insgesamt.

Plus eins (+1) ist der Referenz-Probekörper bzw. Rückstell-Probekörper.

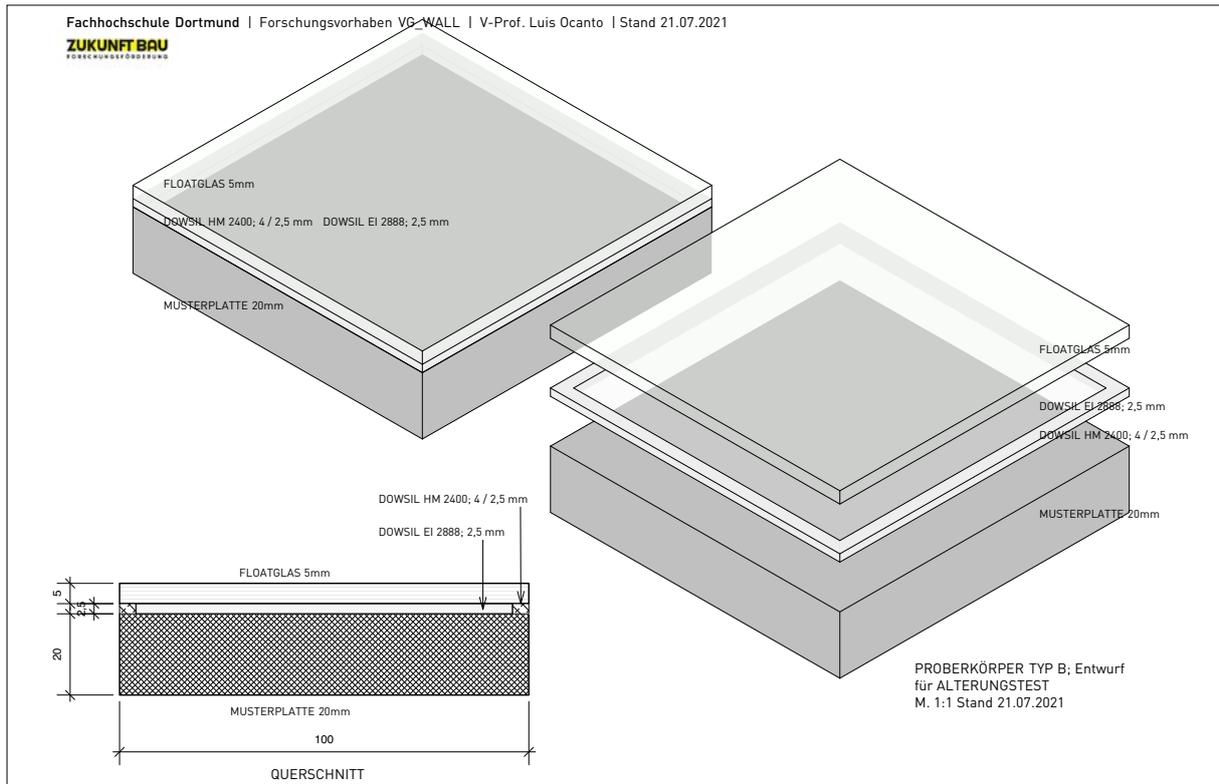
Abbildung 37

Zeichnung Probekörper Typ A für Schertest



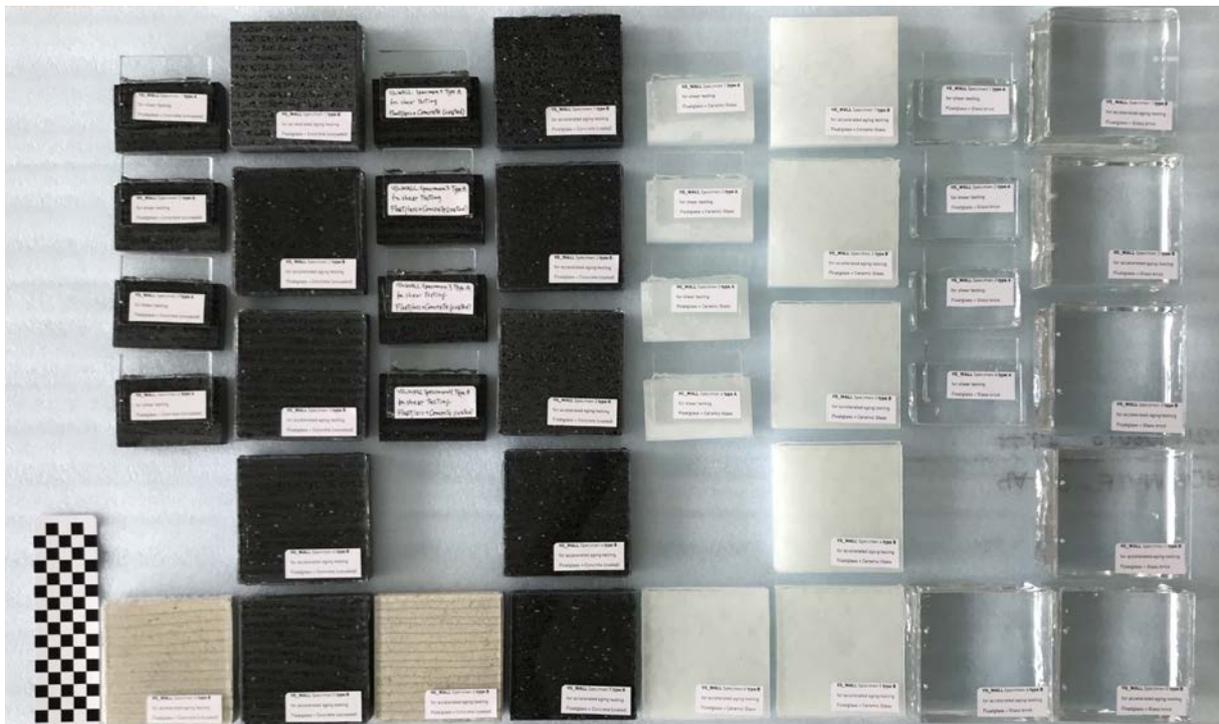
Quelle: Ocanto

Abbildung 38
Zeichnung Probekörper Typ B für Alterungstest



Quelle: Ocanto

Abbildung 39
Übersicht gefertigte Probekörper Typ A und Typ B



Quelle: Ocanto

6.4 Lineare Verklebung und Dauerhaftigkeit des Randverbundes

Testobjekte Konzept 02 Linien-Verklebung

Nach den Forschungsgesprächen mit Fa. DOW und Fa. Saint-Gobain-Research evaluierten wir das Konzept der Linien-Verklebung mit SZR, Produkt Swisspacer Air. Es wurde dabei die Abstandsleiste mit einem Druckventil ausgestattet. Eine partielle Druckanpassung über die Ventile reduziert einerseits die Druckdifferenz und die damit verbundenen Klimalasten erheblich und ermöglicht andererseits den Feuchteintrag zu begrenzen um einen „trockenen“ Scheibenzwischenraum über einen langen Zeitraum zu erhalten. Dadurch lassen sich im Scheibenzwischenraum weiterhin soft coatings einsetzen um die Wind- und Sturmkräfte abzuleiten und die Verteilung der Windlasten auf die Einzelscheiben zu gewährleisten. Es kann auf die Gasfüllung verzichtet werden. Die so entwickelten Glasaufbauten mit den vorgesehen SZR sind das Konzept für weitere Untersuchungen mit dem Ziel einer sauberen Rückbaubarkeit der Systeme zu erreichen.

Die Probekörper für die Linien-Verklebung haben eine Dimension vom: 750 mm x 750 mm. Diese Größe wurde nach der Kapazität des Labor-Prüfgerätes der Firma Saint Gobain-Research bestimmt. Die Vakuum-Glas-scheiben und die Material-Platten werden bei einem spezialisierten Glasverarbeiter verklebt bzw. montiert. Der geplante Glasaufbau mit schaltbarer Glasbeschichtung ist in Absprache mit Sage Glas USA aus logistischen Gründen leider nicht durchführbar. Die Versuche sollten in USA stattfinden, da in Europa leider kein SGG Sage Glas produziert wird.

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen Laboruntersuchungen an Prüfkörpern durchgeführt werden. Es handelt sich hierbei um eine orientierende Laborprüfung in Anlehnung an die in DIN EN 1279 Teil 2 und Teil 3 beschriebenen Klimawechsel-Zyklen mit anschließender Konstant-Lagerung. Das Vakuumglas selbst wird im einzelnen nicht spezifisch geprüft. Die Prüfung des üblichen Randverbundes im System mit organischen Dichtstoffen bei denen einzelne Gläser miteinander kraftschlüssig und gasdicht verbunden werden, soll erweitert werden, so dass auch wie in unserem Forschungsvorhaben verschiedenartige transluzente und transparente Materialien im Randverbund auf Beanspruchung und Energieverluste untersucht werden können. Unabhängig von den gewählten Materialien geht es hauptsächlich um die Prüfung des Verhaltens des Randverbunds als Hybrid.

Ziel der Laboruntersuchung:

- Ermittlung der mechanischen Belastung und des energetischen Verhaltens des Randverbundes infolge von Klimalasten für das Vakuumglas im Verbund mit transluzenten Platten als mehrschichtiges Isolierglas als Bauelement für Fassaden in dauerhafter Beanspruchung durch die Klimawechsel-Zyklen.
- Dichtigkeit des druckentspannten Systems aus Vakuumglas mit transluzenten Platten im Randverbund in der neu entwickelten Einbausituation im System.

Beschreibung der Probekörper

Drei Prüfserien mit folgenden Glasaufbauten bzw. Prüfkörpern sollen näher untersucht werden. Jede Serie besteht aus 5 Probekörpern.

Glasaufbau Serie 1:

Vakuumglas 10,25 mm (VG) + SZR Swisspacer mit Ventil Air ohne Gasfüllung und Glaskeramikplatte 20 mm-Mustergröße nach EN 1279-2: 352 mm x 502 mm
Gesamtstärke: 42,25 mm
Konstruktion: 10,25 – 12 – 20

Abstandshalter: SWS Ultimate 12, Material: Warmedge
Primärdichtstoff: Polyisobutylene
Sekundärdichtstoff: Warmedge Silikon DOW 3364
Beschichtung: keine
besondere Merkmale: Swisspacer Ultimate Air mit Ventil

Glasaufbau Serie 2:

Vakuumglas 10,25 mm (VG) + SZR Swisspacer mit Ventil Air ohne Gasfüllung und Lichtbetonplatte 20 mm,
Mustergröße nach EN 1279-2: 352 mm x 502 mm
Gesamtstärke: 42,25 mm
Konstruktion: 10,25 – 12 – 20
Abstandshalter: SWS Ultimate 12, Material: Warmedge
Primärdichtstoff: Polyisobutylene
Sekundärdichtstoff: Warmedge Silikon DOW 3364
Beschichtung: keine
besondere Merkmale: Swisspacer Ultimate Air mit Ventil

Glasaufbau Serie 3:

Vakuumglas 10,25 mm (VG) + SZR Swisspacer mit Ventil Air ohne Gasfüllung und Gussglas 6 mm
Mustergröße nach EN 1279-2: 352 mm x 502 mm
Gesamtstärke: 28,25 mm
Konstruktion: 10,25 – 12 – 6
Abstandshalter: SWS Ultimate 12, Material: Warmedge
Primärdichtstoff: Polyisobutylene
Sekundärdichtstoff: Warmedge Silikon DOW 3364
Beschichtung: keine
besondere Merkmale: Swisspacer Ultimate Air mit Ventil.

Anmerkungen zu Laborversuchen Konzept 02

Die Prüfung nach DIN EN 1279-2 ermittelt weder die mechanische Belastung noch das energetische Verhalten des Randverbundes. Die Prüfung ermittelt lediglich die Zubeladung von Wasser im Trockenmittel während der in der Norm beschriebenen Klima-Wechsel-Zyklen, mehr kann in dieser Prüfung nicht durchgeführt werden.

Das zweite Ziel: die Dichtigkeit des Randverbundes wird wie unter 2. Ziel beschrieben nur indirekt für Wasser überprüft. Andere Dichtigkeiten können nicht untersucht werden.

Hinsichtlich der Probekörper mit der Lichtbetonplatte wird darauf hingewiesen, dass über die Oberfläche der Platte und auch durch das Material selbst vermutlich Wasserdampf eingetragen werden kann. Es kann dann wahrscheinlich keine Aussage über die Dauerhaftigkeit des Randverbundes gemacht werden. Die Lichtbetonplatten sind nicht beschichtet, eine Prüfung mit beschichteten Oberflächen sollte zum Vergleich auch geprüft werden.

Die 5 Proben pro Serie werden folgendermaßen aufgeteilt: 2 Proben der Trockenmittelbeladung zu Beginn der Prüfung zu ermitteln, 2 Proben je Serie in die Klima-Wechselprüfung zu geben und ein Rückstellmuster (+1) aufzubewahren.

7 Ergebnisse

7.1 Ergebnisse Bauphysik

Um Tauwasseranfall zu vermeiden und eine optimale Führung der Isothermen in der Konstruktion zu gewährleisten, muss unter anderem die Einbaulage, Glaseinstand, Außen- und Innendichtung der Verglasung näher betrachtet werden. Denn um Tauwasseranfall vorzubeugen sollte auf keinem Teil der Oberfläche von Fensterprofilen oder Glasflächen eine Temperatur auftreten, die $< 10\text{ °C}$ ist. Um auch dem Problem von Schimmelbildung aus dem Wege zu gehen, ist es außerdem vorteilhaft, wenn keine Temperaturen $< 13\text{ °C}$ auf den Innenoberflächen auftreten. Der kritische Bereich für die geringste Oberflächentemperatur auf Profilen ist i.d.R. bei der Glasinnendichtung im Übergang zum Glas im Rahmen-Eckbereich.

Aus diesem Grund wurden einige Isothermen-Berechnungen mit der Software Flixo vorgenommen, bei denen mit unterschiedlichen Einbaulagen der Verglasung experimentiert wurde. Über die sich dabei einstellende Oberflächentemperatur / Feuchte wird das Risiko von Tauwasserbildung und Schimmelpilzbefall ermittelt. Als Ergebnis aus diesen Berechnungen sollen Zusammenhänge abgeleitet werden, um die optimale Einbaulage bestimmen zu können. Die Erkenntnisse aus diesen Berechnungen werden die Konstruktionsvorschläge optimieren und verbessern.

Erkenntnisse aus den Untersuchungen:

Die ersten Ergebnisse (01), siehe Abb. 40, der untersuchten Konstruktionen zeigen eine relativ schlechte Performance der vorgeschlagenen Dichtungen. Die Problematik des Randverbundes ist mit den vorgesehenen Maßnahmen nicht zufriedenstellend gelöst. Bei dem Aufbau mit SZR (Scheibenzwischenraum) bzw. Abstandhalter sind die Wärme- und Feuchteschutzwerte erreicht.

Für die Erklärung der Defizite an den Innenoberflächen-Temperaturen ist die Lage des wärmeleitenden Silikons entscheidend. Die Silikonlage ist parallel an dem VG platziert, wo die Temperaturen niedrig sind, woraus eine Wärmebrücke bzw. eine Störung des Isothermenverlaufes resultiert. Es wurden konzeptionelle Korrekturen an den Konstruktionen vorgenommen, die Dichtungen mit wärmeleitenden oder wärmeschützenden Qualitäten wurden mit herkömmlichen EPDM-Dichtungen kombiniert. Die Silikondichtungen wurden als Beschichtung lotrecht an den EPDM-Dichtungen angebracht.

Die weiteren Ergebnisse (02) sind wesentlich besser, siehe Abb. 41. Die neue Konzeption der Dichtungen und der Einsatz auch an den Abstandhaltern zeigen optimale Ergebnisse. Die Aufbauten mit nur VG oder VG in Kombination mit Gussglas sollen nach dem gleichen Prinzip ebenfalls noch optimiert werden. Hierbei ist eine Verbreiterung des Glaseinstandes mit Sicherheit eine geeignete Maßnahme um die θ_{si} (Innenoberflächentemperatur) zu erhöhen und den Temperaturfaktor f_{Rsi} auf die Mindestwerte der DIN 4108-2 (Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Beiblatt 2: Wärmebrücken) oder besser zu bringen.

Abbildung 40
FEM-Simulationen erste Ergebnisse

VG_WALL Ergebnisse 01 Fassade-System Pfosten-Riegel & Structural Glazing RAICO THERM+ A-I Vakuumglas $U_g = 0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$ Randverbund = 9 mm		Material DICHTUNG Außen λ [W/m·K]	GLAS - Einstand in mm	Material DÄMM- BLOCK λ [W/m·K]	Material DICHTUNG Innen λ [W/m·K]	Temperatur Factor f_{Rsi} - Wert	Θ_{si} Innen- raumoberfläche Temperatur Außen θ_e : -5°C
REFERENZ VG_W_R_PF56_M00 Vakuumglas pur		Warm Edge Silikon $\lambda = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$	13	Aerogel- Platte BASF Slentite® $\lambda = 0,0171 \text{ W/m}^2\text{K}$	Wärmeleitendes Silikon $\lambda = 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ EPDM $\lambda = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,65	11,3
Aufbau 01 Pfosten-Riegel VG_W_R_PF56_M01 Prismaglas + Vakuumglas		Warm Edge Silikon $\lambda = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$	13	Aerogel- Platte BASF Slentite® $\lambda = 0,0171 \text{ W/m}^2\text{K}$	Wärmeleitendes Silikon $\lambda = 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ EPDM $\lambda = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,62	10,6
Aufbau 02 Pfosten-Riegel VG_W_R_PF56_M02 Schaltbares Glas + SZR + Vakuumglas		Warm Edge Silikon $\lambda = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$	13	Aerogel- Platte BASF Slentite® $\lambda = 0,0171 \text{ W/m}^2\text{K}$	Wärmeleitendes Silikon $\lambda = 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ EPDM $\lambda = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,78	14,6
Aufbau 03 Pfosten-Riegel VG_W_R_PF56_M03 Vakuumglas + Lichtbeton		Warm Edge Silikon $\lambda = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$	13	Aerogel- Platte BASF Slentite® $\lambda = 0,0171 \text{ W/m}^2\text{K}$	Wärmeleitendes Silikon $\lambda = 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ EPDM $\lambda = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,79	14,9
Aufbau 04 Pfosten-Riegel VG_W_R_PF56_M04 Profilbauglas + Vakuumglas		Warm Edge Silikon $\lambda = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$	13	Aerogel- Platte BASF Slentite® $\lambda = 0,0171 \text{ W/m}^2\text{K}$	Wärmeleitendes Silikon $\lambda = 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ EPDM $\lambda = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,59	9,9
Aufbau 05 Pfosten-Riegel VG_W_R_PF56_M07 Glaskeramik + Vakuumglas		Warm Edge Silikon $\lambda = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$	13	Aerogel- Platte BASF Slentite® $\lambda = 0,0171 \text{ W/m}^2\text{K}$	Wärmeleitendes Silikon $\lambda = 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ EPDM $\lambda = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,59	9,8
Aufbau 02 Structural Glazing VG_W_R_SG50_M02 Schaltbares Glas + SZR + Vakuumglas		Warm Edge Silikon $\lambda = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$	12	Aerogel- Platte BASF Slentite® $\lambda = 0,0171 \text{ W/m}^2\text{K}$	Wärmeleitendes Silikon $\lambda = 5,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ EPDM $\lambda = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,59	9,8
Aufbau 03 Pfosten-Riegel VG_W_R_SG50_M03 Vakuumglas + Lichtbeton		Warm Edge Silikon $\lambda = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$	12	Aerogel- Platte BASF Slentite® $\lambda = 0,0171 \text{ W/m}^2\text{K}$	Wärmeleitendes Silikon $\lambda = 5,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ EPDM $\lambda = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,71 ⁵	12,9

warm edge Silikon Wärmeleitendes Silikon Wärmedämmung

Quelle: Ocanto

Abbildung 41
FEM-Simulationen zweite Ergebnisse

VG_WALL Ergebnisse 02 Fassade-System Pfosten-Riegel & Structural Glazing RAICO THERM+ A-I Vakuumglas U = 0,42 W/m²K Randverbund = 9 mm		Material DICHTUNG Außen λ [W/m²K]	GLAS - Einstand in mm	Material DÄMM- BLOCK λ [W/m²K]	Material DICHTUNG Außen λ [W/m²K]	Temperaturfaktor f _{Rsi} - Wert	θ _{si} Innen- Raumoberfläche Temperatur Außen θ _e : -5° C
REFERENZ 01 VG_W_R_PF56_CTxn 3-fach Verglasung Verglasung: Saint-Gobain Climatop XN Triple-Glazing: 36mm 4 / 14 / 14 / 12 Argon SZR: Swisspacer Ultimate Box 2, 6.5mm		Warm Edge Silikon λ = 0,19 W/m²K	15	PE-Dämmblock λ = 0,040 W/m²K	Wärmeleitendes Silikon λ = 2,0 W/m²K EPDM λ = 0,25 W/m²K	0,88	17,1
REFERENZ 02 Pfosten-Riegel VG_W_R_PF56_M00 Vakuumglas pur		Warm Edge Silikon λ = 0,19 W/m²K EPDM λ = 0,25 W/m²K	13	Aerogel- Platte BASF Slentite® λ = 0,0171 W/m²K	Wärmeleitendes Silikon λ = 2,0 W/m²K EPDM λ = 0,25 W/m²K	0,69	12,3
Aufbau 01 Pfosten-Riegel VG_W_R_PF56_M01 Prismaglas + Vakuumglas		Warm Edge Silikon λ = 0,19 W/m²K EPDM λ = 0,25 W/m²K	13	Aerogel- Platte BASF Slentite® λ = 0,0171 W/m²K	Wärmeleitendes Silikon λ = 2,0 W/m²K EPDM λ = 0,25 W/m²K	0,66	11,6
Aufbau 02a Pfosten-Riegel VG_W_R_PF56_M02 Schaltbares Glas + SZR + Vakuumglas		Warm Edge Silikon λ = 0,19 W/m²K	13	EPDM Dämm- block λ = 0,05 W/m²K Swisspacer Ultimate Box 2 λ = 0,14 W/m²K	Wärmeleitendes Silikon λ = 2,0 W/m²K EPDM λ = 0,25 W/m²K	0,83	15,8
Aufbau 02b Structural Glazing VG_W_R_SG50_M02 Schaltbares Glas + SZR + Vakuumglas mit Fuge		Warm Edge Silikon λ = 0,19 W/m²K	13	Aerogel-Platte BASF Slentite® λ = 0,017 W/m²K Swisspacer Ultimate Box 2 λ = 0,14 W/m²K	Wärmeleitendes Silikon λ = 2,0 W/m²K EPDM λ = 0,25 W/m²K	0,77	14,3
Aufbau 02b Structural Glazing VG_W_R_SG50_M02 Schaltbares Glas + SZR + VG ohne Fuge		Warm Edge Silikon λ = 0,19 W/m²K	13	Aerogel-Platte BASF Slentite® λ = 0,017 W/m²K Swisspacer Ultimate Box 2 λ = 0,14 W/m²K	Wärmeleitendes Silikon λ = 2,0 W/m²K EPDM λ = 0,25 W/m²K	0,81 ⁵	15,4
Aufbau 03 Structural Glazing VG_W_R_SG50_M03 Vakuumglas + Lichtbeton mit Fuge		Warm Edge Silikon λ = 0,19 W/m²K	12	Aerogel- Platte BASF Slentite® λ = 0,0171 W/m²K	Wärmeleitendes Silikon λ = 2,0 W/m²K EPDM λ = 0,25 W/m²K	0,78	14,5

warm edge Silikon ■ Wärmeleitendes Silikon ■ Wärmedämmung ■

Quelle: Ocanto

7.2 Labortest zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit der geklebten Konstruktionen

Um die Brauchbarkeit der ausgewählten Glasaufbauten beurteilen zu können, wurden Labortests vorgesehen und durchgeführt. Diese Labortests wurden in Anlehnung an die ETAG 001- Teil 1 Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen durchgeführt. Die im Forschungsprojekt verwendeten Materialien mußten spezielle Eigenschaften besitzen und so behandelt sein, dass innerhalb der vorgesehenen Gesamt-Nutzungsdauer von ca. ca. 25 Jahren keine Gefahren oder Schäden entstehen. Die geklebten Glasaufbauten wurden unter alltäglichen, normalen Randbedingungen geprüft, wie z.B. die Einwirkung von Wasser, Wasserdampf, Sonneneinstrahlung, und Temperaturen, die die Glasaufbauten von innen oder außen beeinflussen können. Durch eine künstliche Alterung im Labor werden die Glas-Konstruktionen durch solche Einflüsse erprobt. Ziel solcher Versuche ist es, den Einfluß der künstlichen Alterung (Bewitterung) auf die mechanische Festigkeit der Verklebung zu untersuchen und Erkenntnisse zur Brauchtauglichkeit zu erhalten (ETAG 002-1, § 5.1.4.2).

Labortest Vorbereitung

Es gibt sowohl große Prüfkörper (Typ B (100 x 100 mm, siehe Kap. 6 ,Versuche, je 4 x 6 Stück) nur für die Prüfung der Alterung als auch kleine Prüfkörper Typ A (45 x 85 mm, siehe Kap. 6 Versuche, je 4 x 4 Stück) für die Alterungs- und Scherkraftprüfung

Prüfkörper:

- 1. Glaskeramik - keramisches Glas (weißliches Aussehen)
- 2. Glasbaustein - Glasziegel (gegossener Glasbaustein, transparent)
- 3. Lichtbeton, Beton, beschichtet (dunkelgrau, intensiv durch die Beschichtung)
- 4. Lichtbeton, Beton, unbeschichtet (dunkelgrau, heller als die beschichtete Variante)

Von jeder Sorte und jedem Untergrund wurde eine Probe als Referenz ohne Alterung beiseite gelegt. Alle anderen, 4 x 5 Stücke der großen Muster (B) und 4 x 3 der kleinen Muster (A) sind unter gleichen Bedingungen auf Alterung geprüft worden.

Alterungsbedingungen:

Klimakammer bei 80°C />80% rel. Feuchte (~95%) für 3 Wochen.

Prüfung (nur Typ A - kleine Stücke):

Scherprüfung wird nach >24h Konditionierung bei RT sorgfältig durchgeführt.

Alterung Laborprobe Typ B

Eckdaten der Laborproben und Datum der Vorbereitung:

Die Laborproben wurden in der 33. KW und 34. KW im Chemielabor des Fachbereichs Architektur hergestellt.

Vom 30.08 bis zum 14.09.2021 ruhten die gefertigten Laborproben, um eine ungestörte Aushärtung der Dichtstoffe zu gewährleisten. Die Proben wurden anschließend in das HPB (High Performance Building) Laboratory Dow Seneffe (Belgien) gesendet. Dort wurden die Laborproben unter Laborbedingungen vom 03.11 bis zum 06.12. 2021 in der Klimakammer eingesetzt und geprüft.

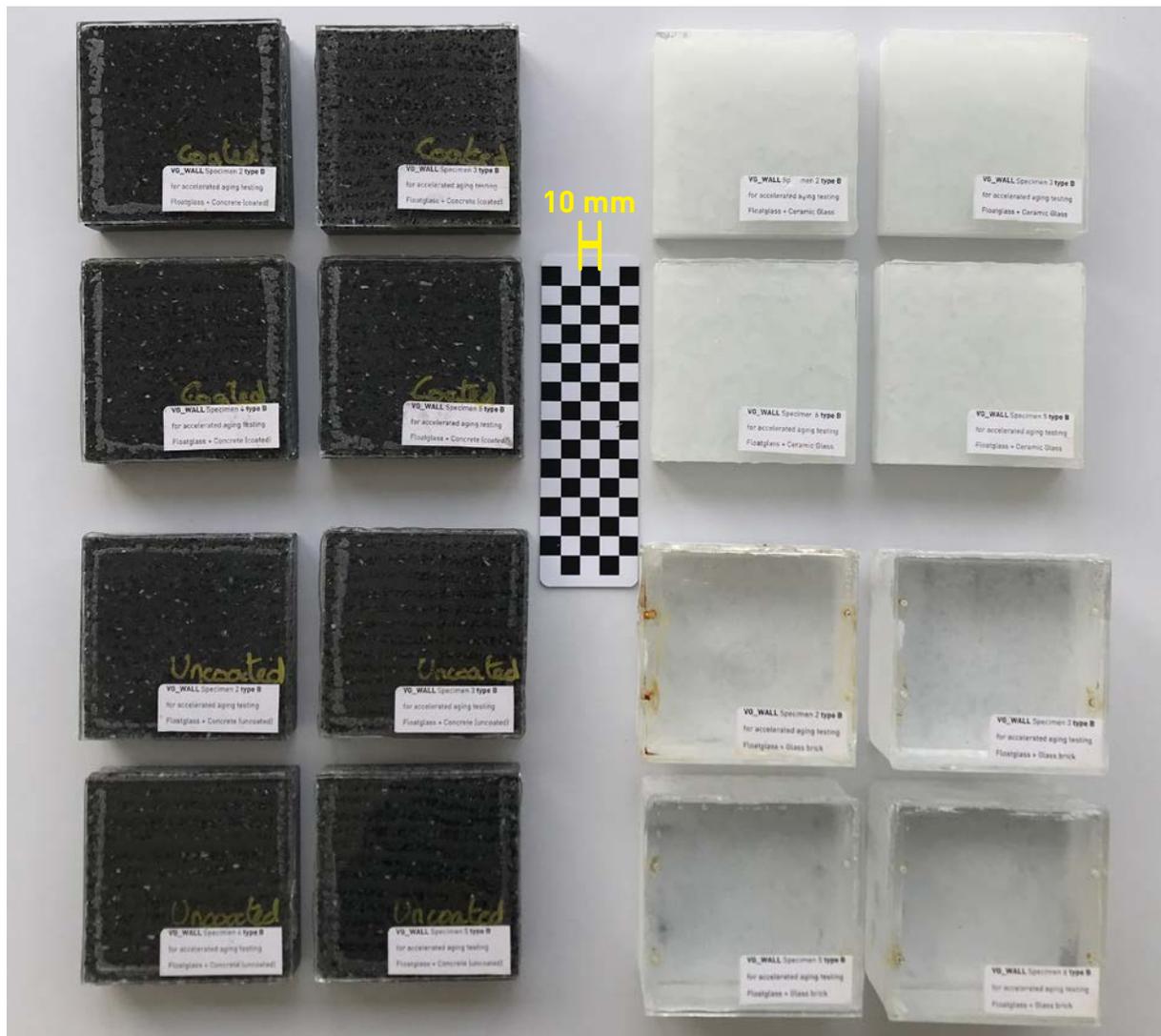
Labor Bedingungen: 23°C bei 50 % relativer Feuchte.

Alterungstest: 3 Wochen (vom 03.11 bis zum 06.12. 2021) in der Klimakammer unter 80°C / 95% relativer Feuchte. Kleb- und Dichtstoffe: DOW Hot Melt Silikon 2400, Dichtstoff; DOW EI 2888 Silikon, Füllstoff.

Labor Techniker: Steve Pottiez

Abbildung 42

Übersicht der Laborproben nach dem Alterungstest



Quelle: Ocanto

Ergebnisse der Laborproben nach den Bewitterungstests in der Klimakammer:

Die Proben haben je nach Substrat und Klebematerial unterschiedlich reagiert (siehe Abb. 42). Die Auswertung der einzelnen Substrate werden nach folgenden ETAG 002-1 Kriterien beurteilt:

- A: Verfärbung des hellen oder dunklen Dichtstoffes
- B: Adhäsion des Dichtstoffes auf der Glasoberfläche

- C: Adhäsion des Dichtstoffes auf dem Komplementär - Material
- D: Riss- oder Runzelbildung auf der Dichtstoff-Oberfläche
- E: Öl- Film-Ablagerungen auf der Dichtstoff-Oberfläche

Lichtbeton unbeschichtet / Floatglas

Zu A: Es ist keine Verfärbung des Dichtstoffes festzustellen, das Silikon erscheint immer noch klar und transparent.

Zu B: Der Kleb- und Dichtstoff DS HM 2400 wurde an den Rändern appliziert, die Klebestellen an den Rändern weisen eingetretene Feuchtigkeit auf, Wassertropfen sind durch die Poren des Betons eingedrungen und im Raum zwischen Dichtstoff und Beton geblieben. Die Adhäsion des Dichtstoffes auf das Floatglas scheint nicht vollständig zu sein.

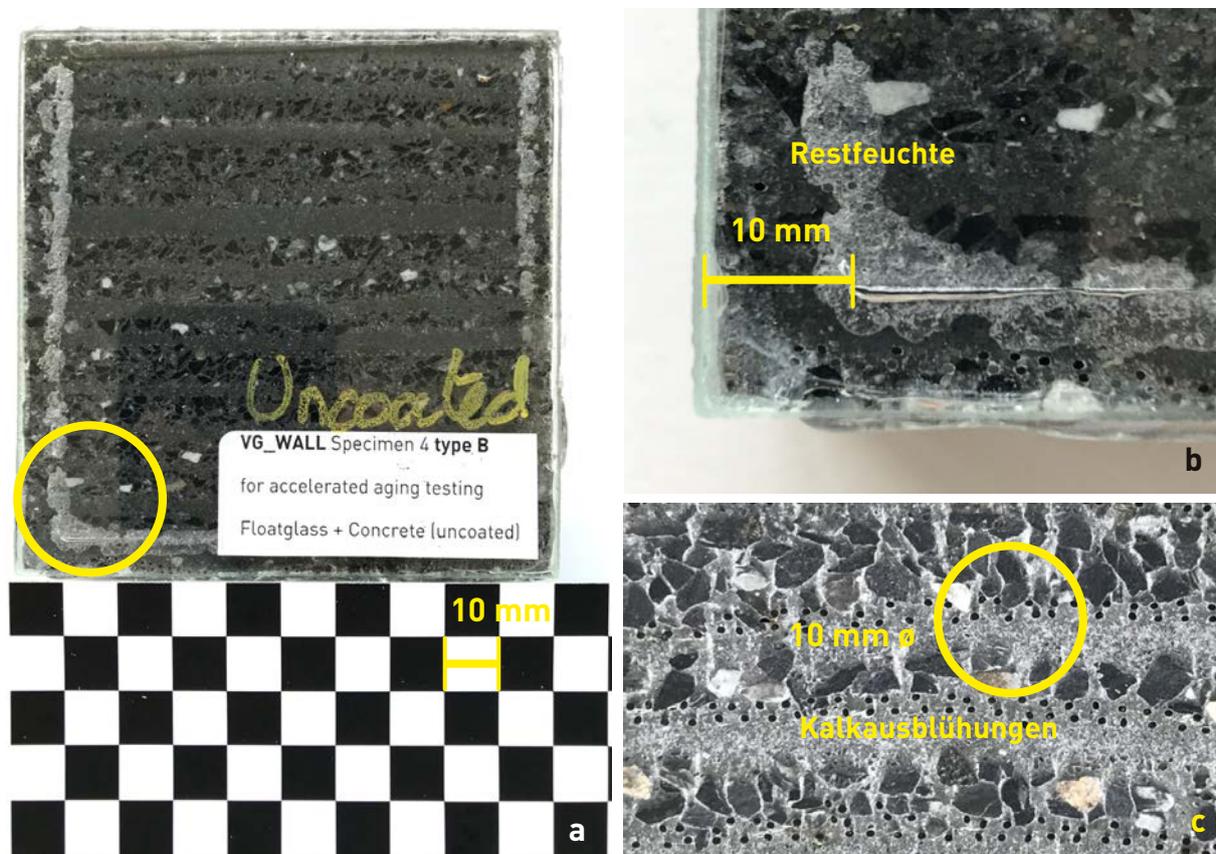
Zu C: Die Adhäsion des Dichtstoffes auf Beton bleibt unverändert bzw. 100%ig intakt.

Zu D: Keine Riß- oder Runzelbildung auf der Dichtstoff-Oberfläche

Zu E: Keine Öl- Film-Ablagerungen auf der Dichtstoff-Oberfläche.

Abbildung 43

Laborproben Lichtbeton, a) unbeschichtet / Floatglas, b) Vergrößerung der Ecke links unten vom Muster, Detail: eingetretene Feuchtigkeit in dem Dichtstoff, c) Rückseite der Lichtbeton-Probe: zum Teil verwitterte Oberfläche



Quelle: Ocanto

Lichtbeton beschichtet / Floatglas

Hierbei wurden die Lichtbeton Platten zusätzlich allseitig mit flüssigem Silikon DS El 2888 beschichtet. Damit sollten die Micro-Poren der Betonoberfläche geschlossen werden, um eine höhere Dichtigkeit des Betons in der feuchten Umgebung zu erreichen.

Zu A: Es ist keine Verfärbung des Dichtstoffes festzustellen, das Silikon erscheint immer noch klar und transparent.

Zu B: Der Kleb- und Dichtstoff DS HM 2400 wurde an den Rändern appliziert, die Klebestellen im Randbereich weisen Feuchtigkeit auf, Wassertropfen sind durch die Micro-Poren des Beton eingedrungen und im Zwischenraum zwischen Dichtstoff und Beton geblieben. Die Adhäsion des Dichtstoffes auf der Betonoberfläche scheint nicht vollständig zu sein.

Zu C: Die Adhäsion des Dichtstoffes auf dem Beton bleibt unverändert bzw. 100%ig intakt. Der Silikon-Film hat auf der Beton-Oberfläche gut gehaftet.

Zu D: Keine Riss- oder Runzelbildung auf der Dichtstoff-Oberfläche

Zu E: Keine Öl- Film-Ablagerung auf der Dichtstoff-Oberfläche.

Abbildung 44

Laborproben Lichtbeton, a) beschichtet / Floatglas, b) Vergrößerung Ecke rechts oben: Feuchtigkeit an dem Dichtstoff c) Rückseite der Lichtbeton-Probe, beschichtete Oberfläche nach dem Alterungstest unverändert



Quelle: Ocanto

Glaskeramik / Floatglas

Zu A: Es ist keine Verfärbung des Dichtstoffes festzustellen, das Silikon erscheint immer noch klar und transparent.

Zu B: Die Adhäsion des Dichtstoffes auf das Floatglas scheint vollständig zu sein.

Zu C: Der Kleb- und Dichtstoff DS HM 2400 wurde an den Rändern der Glaskeramik-Platte appliziert. Die Adhäsion des Dichtstoffes auf Glaskeramik bleibt unverändert bzw. 100%ig intakt.

Zu D: Keine Riß- oder Runzelbildung auf der Dichtstoff-Oberfläche

Zu E: Keine Öl- Film-Ablagerung auf der Dichtstoff-Oberfläche.

Abbildung 45

Laborproben a) Glaskeramik / Floatglas, b) Vergrößerung Ecke links unten, Detail
c) Rückseite der Glaskeramik-Platte, Oberfläche nach dem Alterungstest unverändert



Quelle: Ocanto

Glasbausteine / Floatglas

Die Laborproben aus Glasbaustein und Floatglas wurden mit Abstandshaltern verbunden. Der Dichtstoff ist auch hier DS HM 2400. Es handelt sich hier um ein Hilfsmittel bzw. Abstandshalter aus Kunststoff, um die Kavität zwischen Glasbaustein und Floatglas zu gewährleisten. Die verwendeten Abstandshalter, kleine Kunststoff-Röhrchen, sind 1,5 mm hoch und haben 1,5 mm \varnothing . Aufgrund der unebenen Oberfläche des Glasbausteins sind diese bei dem Klebevorgang notwendig, um eine gute Adhäsion zu erhalten. Die Abstandshalter, 4 Stück insgesamt auf der Probe, wurden mit Cyanacrylat auf dem Glasbaustein bzw. Gußglas fixiert. An den Rändern wurde DS HM 2400 Dichtstoff appliziert und anschließend das Floatglas aufgelegt und angepresst. Wie bei allen Laborproben wurde nach 48 Std. Aushärtung des Dichtstoffes die Kavität mit DS El 2888 (Flüssiges Silikon) gefüllt.

Zu A: Es ist keine Verfärbung des Dichtstoffes festzustellen, das Silikon erscheint immer noch klar und transparent, aber die Stellen an denen die Abstandshalter mit Cyanacrylat geklebt wurden, sind gelb-braun verfärbt. Cyanacrylat und Silikon vertragen sich hier nicht und es ist eine chemische Reaktion bei Feuchtigkeitseintritt entstanden.

Zu B: Der Kleb- und Dichtstoff DS HM 2400 wurde an den Rändern appliziert. Die Adhäsion des Dichtstoffes auf das Floatglas scheint vollständig zu sein.

Zu C: Die Adhäsion des Dichtstoffes auf dem Glasbaustein bleibt unverändert bzw. 100%ig intakt.

Zu D: Keine Riß- oder Runzelbildung auf der Dichtstoff-Oberfläche

Zu E: Keine Öl- Film-Ablagerung auf der Dichtstoff-Oberfläche.

Abbildung 46

Laborproben Glasbaustein / Floatglas; Links: Vorderseite Laborprobe Floatglas, Oberfläche unverändert, Rechts: Kalkausblühungen auf der Oberfläche der Rückseite der Laborprobe, teilweise durch die Bewitterung verkalkt



Quelle: Ocanto

Abbildung 47

Laborprobe Glasbaustein / Floatglas links: Verfärbung an den Abstandshaltern, rechts: Vergrößerung Seitenansicht: Detail Abstandshalter Verfärbungen und die verwitterte Gußglas-Oberfläche



Quelle: Ocanto

Schlussfolgerungen zu den Laborproben Typ B, bei künstlicher Bewitterung, Aussagen zur Alterung

Alle Laborprüfungen sind zum größten Teil positiv verlaufen. Einige Details im Klebeprozess können durch die gewonnenen Erkenntnisse noch verbessert werden. Die geprüften Laborproben zeigen, abgesehen von den Glasbaustein-Proben und deren punktuellen Stellen am Abstandshalter keine Verfärbungen. Nach den Beurteilungskriterien der ETAG 002-1, siehe Tabelle 4 Seite 29 bekämen die applizierten Dichtstoffe ein „N“ für None zertifiziert, bzw. keine Verfärbungen des Dichtstoffes und damit sind die Klebungen für alle Anwendungen in Fassadensystemen geeignet. Es gibt kleine punktuellen Fehlstellen an den Lichtbeton-Proben, ob beschichtet oder unbeschichtet. Der Lichtbeton oder der Baustoff Beton ist an seinen Oberflächen porös. Er hat Micro-Poren an den Oberflächen und im Inneren des Materials. Die Lichtbeton-Proben wurden künstlich in einer sehr feuchten Umgebung von 95% relativer Feuchte unter 80° C Temperatur gesetzt. Wassermoleküle sind in der Testzeit durch Poren eingedrungen. Kleine Luftporen an der Betonoberfläche sorgten dafür, dass der Dichtstoff hier nicht richtig anhaften konnte, siehe Abb. 43 u. Abb. 44. Kondensat sammelte sich minimal an diesen Stellen. Das Glas ist 100%ig dicht und die Wassermoleküle können nur durch Austrocknung bzw. langsame Diffusion wieder die Betonoberfläche erreichen. Eine fehlerhafte Applizierung des Dichtstoffes könnte hierfür eine Ursache sein. In jedem Fall wäre der Versuch mit einer hydrophobierten Betonoberfläche besser, um das Eindringen von Feuchtigkeit über den Beton zu minimieren und eine bessere Applizierung des Dichtstoffes wäre gewährleistet. Die mit Silikon beschichtete Laborprobe zeigte ebenfalls die fehlerhaften Stellen wie die unbeschichteten. Eine andere Maßnahme oder Strategie sollte hier untersucht werden, um den Feuchtigkeits-Eintritt über Microporen lösen zu können. Die verwendeten Glasbausteine im Projekt sind keine gerade geschnittenen Glasquader, es handelt sich hier um Gußglas-Teile mit unebenen Oberflächen. Die Glasbausteine werden folgendermaßen produziert: Das flüssige Glas wird in Metallformen gegossen, wenn diese erkaltet sind werden sie aus den Formen genommen. Um die Steine leichter aus den Formen lösen zu können wird ein Trennmittel auf die Metallformen aufgetragen. Dieses Trennmittel ist Silikon basiert, trotz Reinigung der Glasoberflächen bleiben Rückstände bzw. ein minimaler Silikon-Film auf der Glasoberfläche zurück. Dieser Silikon-Film, unsichtbar und nicht haptisch spürbar, hat bei dem Bewitterungs-Versuch reagiert. Die glatte und glänzende Oberfläche der Glasbausteine ist stumpf und spröde geworden. Als Folge sind hier kleine Kalkausblühungen entstanden. Floatglas wird auch aus flüssigem Glas hergestellt, die Floatglasplatten, die an den Substraten geklebt wurden, blieben aber unverändert, sind klar und transparent, nur kleine Spuren von Feuchtigkeit sind nach 3-wöchigem Klimaversuch in feuchter Umgebung entstanden.

Alterung Laborprobe Typ A Restfestigkeit nach künstlicher Alterung; Schertest, Zug u. Bruch

Eckdaten der Laborproben. Datum der Vorbereitung:

Die Laborproben wurden zwischen der 33. KW und 34. KW im Chemielabor des Fachbereichs Architektur hergestellt. Vom 30.08 bis zum 14.09.2021 ruhten die Proben, um eine ungestörte Aushärtung des Dichtstoffes zu gewährleisten. Die Proben wurden in das HPB (High performance Building) Laboratory Dow Seneffe (Belgien) gesendet. Dort wurden die Laborproben vom 03.11 bis zum 06.12.2021 in die Klimakammer gesetzt. Nach 24 Std. - am 07.12.2021 wurde dann der Shear-Test durchgeführt.

Labor Bedingungen: 23°C bei 50 % relative Feuchte.

Alterungstest 3 - Wochen (03.11 - 06.12.2021) in der Klimakammer unter 80°C / 95% relativer Feuchte.

Kleb- und Dichtstoffe: DOW Hot Melt Silikon 2400, Dichtstoff; DOW EI 2888 Silikon, Füllstoff.

Labor Techniker: Steve Pottiez

Abbildung 48
Übersicht der Laborproben Typ A nach Alterungstest



Quelle: HPB-Laboratory DOW - Seneffe, Belgien

Laborproben A, Restfestigkeit nach künstliche Alterung – Schertest

Für die Shear Test bestimmten Laborproben vom Typ A soll eine zusätzliche Erklärung zu ihrer Herstellung abgegeben werden. Im Kapitel 6 Versuche werden die Laborproben mit Dimensionen und Bestandteilen beschrieben, aber nicht wie die Teile zusammengefügt wurden. Um die Shear Test-Ergebnisse zu verstehen ist der Herstellungsprozess der Proben sehr wichtig.

Die Substrate aus verschiedenen Materialien Beton, Glas und Glaskeramik wurden mit Floatglas verbunden. Die Verbindung wird auf einer kleinen Fläche von 2100 mm^2 ($70 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$) hergestellt. Diese Fläche wurde mit einem Dichtstoffstrang (DS HM 2400) von 4 mm Durchmesser umschlossen und nachträglich mit flüssigem Silikon (DS El 2888) gefüllt. Um die Kavität zwischen den Platten zu gewährleisten wurden Abstandshalter (1,5 mm Durchmesser und Höhe) auf die Probe geklebt, in diesem Fall mit einem Tropfen Cyanacrylat, um eine feste und schnelle Klebung vornehmen zu können. Die Abstandshalter wurden angebracht, um die notwendige Stabilität der Glasplatten bei der Verfüllung des Dichtstoffes zu gewährleisten. Nachdem die Laborproben fertig geklebt und abgefüllt waren, wurden alle Klebekomponenten klar und transparent, fest und nicht verschiebbar. Es entstanden in den kleinen Zwischenräumen die idealen Bedingungen des Produktes für den Labortest. Nach 3-wöchigem Versuch in der Klimakammer unter der feucht-warmen Umgebung (95% rel. Feuchte und 80°C Temperatur) hat leider das Cyanacrylat reagiert und eine unreine fast vollflächige gelbe Verfärbung des Dichtstoffs verursacht. Bei den Lichtbeton- und Glaskeramikproben hat die Verbindung gehalten. Beim Gußglas hat die Verbindung nicht gehalten. Das Cyanacrylat mit den Resten der Beschichtung aus Silikon-Trennmittel auf der Gußglasprobe reagierte und hat den Löseprozess beschleunigt. Die Gußglas bzw. Glasbausteinteile konnten in Konsequenz nicht im Shear Test geprüft werden. Siehe Abb. 48 und 49.

Abbildung 49

Laborproben Typ A nach 3 Wochen in der Klimakammer bei künstlicher Bewitterung. Links: Laborproben Glaskeramik mit Verfärbungen. Rechts: Laborproben Glasbausteine (Gußglas) Teile gelöst, verfärbter Dichtstoff.

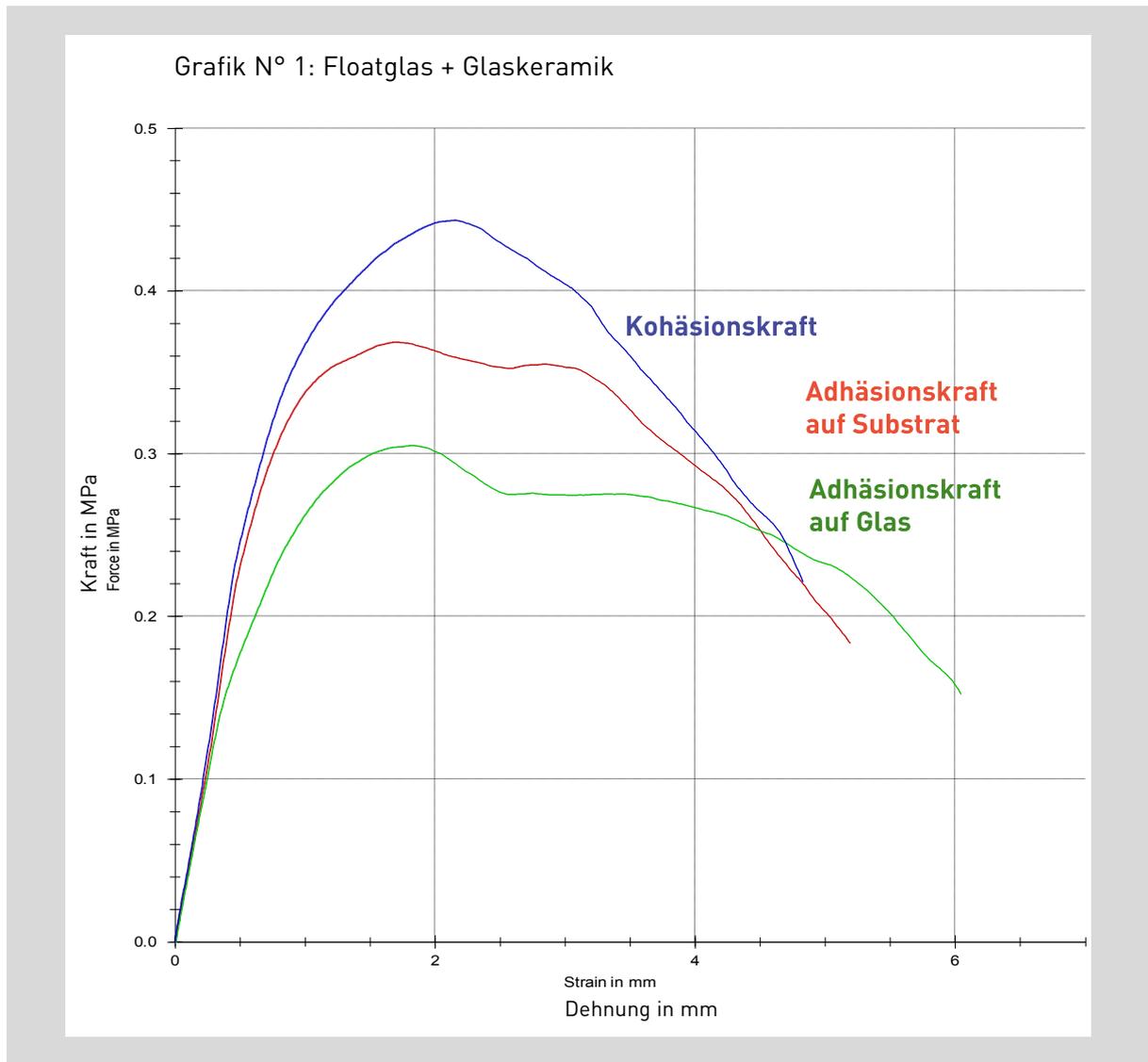


Quelle: HPB-Laboratory DOW - Seneffe, Belgien

Der Schertest wurde mit den Lichtbeton-Laborproben, beschichtet und unbeschichtet sowie mit den Glaskeramik-Laborproben durchgeführt. Im Schertest wird ein Verbundglas unter reinem Schub abgeschert. Die technische Schubspannung gilt als Maß für die Adhäsion auf Schub (SCHNEIDER, 2001). In den Abbildungen 50 u. 51 werden die Abscherkraft und die Dehnung der Klebstoffe der geprüften Labormuster dargestellt.

Abbildung 50

Grafik des Verlaufs der Abscherkraft und Dehnung des Dichtstoffes, Laborprobe Glaskeramik



Quelle: HPB-Laboratory DOW - Seneffe, Belgien

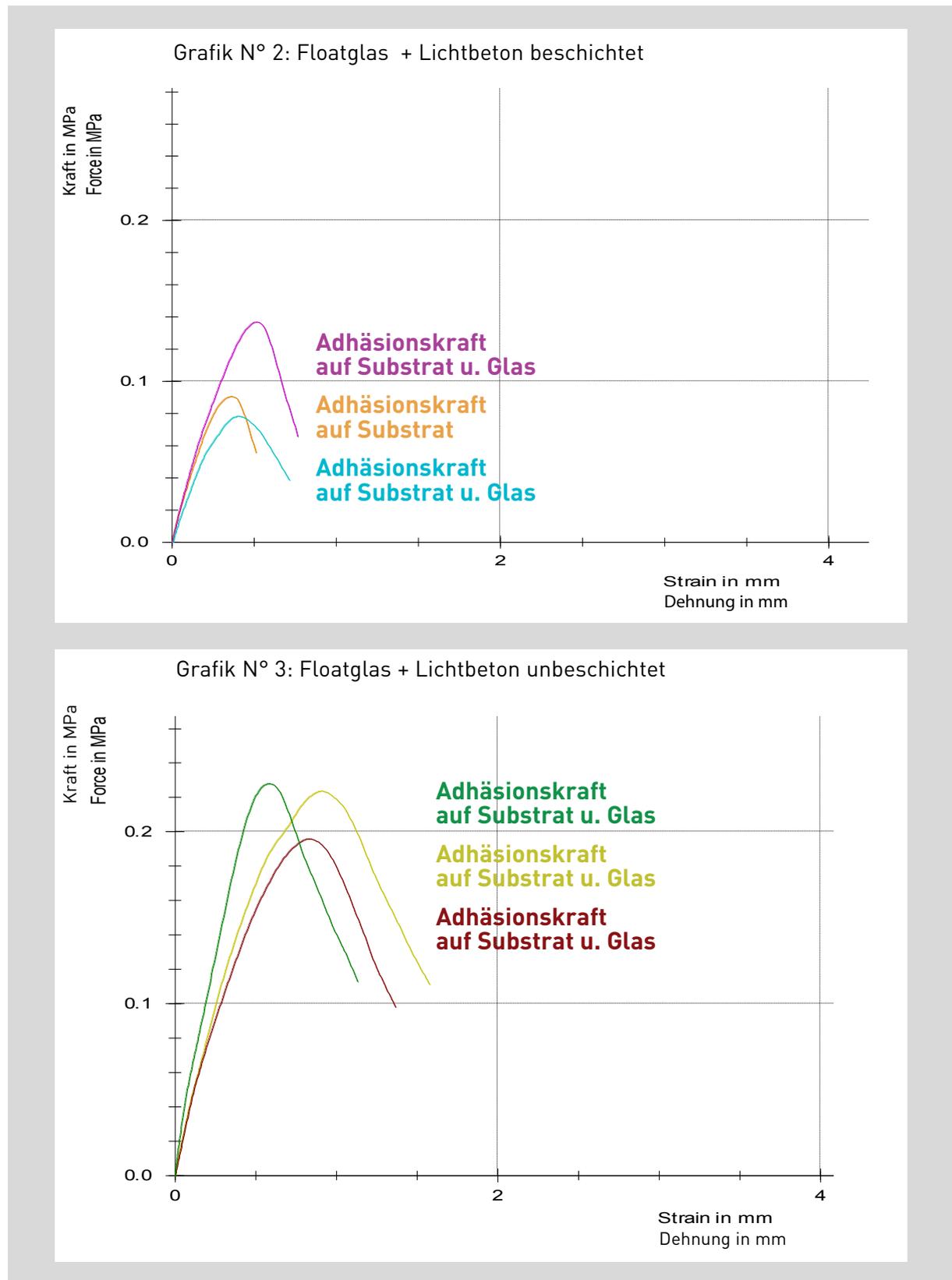
Die Glaskeramik-Laborproben haben in dem Test eine relativ hohe Kohäsionskraft gezeigt. Es handelt sich hier um zwei Oberflächen von zwei fast identischen Materialien Floatglas und Glaskeramik. Es resultiert eine hohe Anziehungskraft zwischen den Molekülen des gleichen Typs. Die Adhäsionskraft erreicht eine Dehnung bis zu 6 mm bei 0,2 Mpa (Megapascal in Bar) bevor die Verbindung komplett versagt.

Interessant ist: Bei den Lichtbeton-Laborproben ist festzustellen wie gleiche Materialien mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen auch ein ganz unterschiedliches Verhalten bei den Shear Tests zeigen. Die beschichteten Lichtbeton-Labormuster haben bei niedriger Abscherkraft auch eine niedrige Adhäsion und Kohäsionskraft. Bei 0,08 Mpa versagt die Klebeverbindung. Die unbeschichteten Lichtbeton-Laborproben leisteten mehr Widerstand, bei 0,23 Mpa und einer Dehnung von 0,6 mm versagt die Klebeverbindung.

Die Abbildung 51 zeigt den Versuchs-Verlauf der Lichtbeton-Laborproben, diese wurden gegenüber gestellt, um das Klebeverhalten von gleichen Materialien mit unterschiedlichen Oberflächen-Behandlungen vergleichen zu können.

Abbildung 51

Graphik des Verlaufs der Abscherkraft und Dehnung des Dichtstoffes, Laborproben: Lichtbeton beschichtet und Lichtbeton unbeschichtet



Quelle: HPB Laboratory DOW - Senefte, Belgien

Tabelle 8

Zusammenfassung der Abscherkraft-Werte und die Versagensart der unterschiedlichen Laborproben Teilprüfung Shear Test

Art der Substrate (Typ A)	Kraft max. (MPa)	Versagen Art in % (AF, CF)
Floatglas + Glaskeramik	0,37	100% AF on glass
	0,31	100% AF substrate
	0,44	100% CF
Floatglas + Lichtbeton (beschichtet)	0,09	100% AF on substrate
	0,14	100% AF on substrate +100% AF on glass
	0,08	100% AF on substrate +100% AF on glass
Floatglas + Lichtbeton (unbeschichtet)	0,22	100% AF on substrate +100% AF on glass
	0,20	100% AF on substrate +100% AF on glass
	0,23	100% AF on substrate +100% AF on glass

Abkürzungen: AF: Adhesion Force (Adhäsionskraft); CF: Cohesion Force (Kohäsionskraft)

Quelle: HPB Laboratory DOW - Seneffe, Belgien

Schlussfolgerungen

Bei der Auswertung der Ergebnisse wurde nochmals klar, wie komplex das Kleben von Bauteilen für Fassaden mit den hohen Anforderungen ist. Die Verträglichkeit der verwendeten Klebstoffe mit den Materialien spielt hierbei eine wichtige Rolle für ihre erfolgreiche Verklebung. Die Verwendung von Cyanacrylat wenn auch nur punktuell als Hilfsmittel erwies sich als Störfaktor bei den Dichtstoffen unter den Klimakammer-Bedingungen durch Reaktion mit der Feuchtigkeit.

Bei den Laborproben Typ B wurde das Cyanacrylat nur beim Gußglas verwendet, deshalb sind die Glaskeramik und Lichtbetonproben nicht von der Reaktion betroffen. Mit dem Lichtbeton-Labormuster Typ B ist ein anderes Problem entstanden: Die Restfeuchte im Beton hat sich an Stellen gesammelt, wo der Dichtstoff nicht richtig appliziert wurde. Die Ursachen a) nicht richtig gereinigte Substrat-Oberfläche (Lichtbeton, unbeschichtet), b) die Beschichtung mit flüssigem Silikon auf der Substrat-Oberfläche (Lichtbeton, beschichtet) hat die Adhäsion des Dichtstoffes gestört. In beiden Fällen ist Feuchteintritt festgestellt worden. Bei einer Umgebung mit 95% rel. Feuchte und einer Temperatur von 80° C sollte bei einem porösen Material wie Beton die Oberflächen so behandelt werden, dass diese Feuchte abweisend sind z.B. durch Hydrophobierung. Hierbei werden die oberflächennahen, kapillarsaugenden Poren von Beton gegen das Eindringen von Wasser ggf. mit einhergehender Schadstoffbelastung, wie z.B. Chlorid, imprägniert. Die Diffusion von Wasserdampf über den Wandquerschnitt bleibt jedoch bestehen, also das Austreten von Restfeuchte des Betons auf der Oberfläche, kann sehr wahrscheinlich nicht ganz vermieden werden. Ein sorgfältiger, lückenloser Auftrag des Dichtstoffes auf die Substrat-Oberfläche ist auf jeden Fall notwendig um mögliche Klebe-Fehlstellen zu vermeiden.

Die Laborproben Typ A, die für den Shear Test bestimmt wurden, haben die fehlende Verträglichkeit des verwendeten Cyanacrylats auf dem Substrat, siehe Gußglas-Teile, deutlich gemacht. Die Laborproben Glaskeramik konnten im Gegensatz zu den Gußglas-Proben im Shear Test geprüft werden. Die Glaskeramik-Laborproben zeigten die besten Ergebnisse des Shear Tests, siehe Tabelle 8 oben. Der Test zeigt eine gute Kohäsion zwischen dem Substrat Glaskeramik und dem Floatglas.

Bei den Gußglas-Laborproben Typ A hat die Klebung in der Klimakammer versagt, hierbei beeinflusste die Wirkung des Cyanacrylats mit dem Silikon-Trennmittel, das notwendig bei der Herstellung des Gußglases ist, die Testergebnisse. Alle Glasoberflächen in diesem Forschungsprojekt wurden sorgfältig mit Isopropanol gereinigt. Diese Isopropanol-Reinigung hat aber bei den Gußglas-Teilen leider nicht ausgereicht und durch kleinste Rückstände des Trennmittels zu einer schlechten Adhäsion der Klebeflächen geführt.

Unter den gegebenen Randbedingungen wurde das gesetzte Ziel noch nicht ganz erreicht. Forschung ist immer nur eine Etappe zum Sieg und durch neue Erkenntnisse können Optimierungen im Detail im Klebprozess vorgenommen werden.

Die Ergebnisse der Shear Tests sind positiv zu bewerten, da Adhäsion u. Kohäsion immer im Verhältnis zur gesamten Fläche des Bauteils zu sehen ist. Es ist zu erwarten, dass aufgrund der Ergebnisse der Prüfungen an den kleinen Probekörpern und bei Eliminierung der vorhandenen Einflüsse von Cyanacrylat und Trennmittel sich in der Realität die größeren geklebten Fassadenbauteile bautechnisch normgerecht verhalten werden, da mehr Klebefläche sich positiv auf Abscherkraft und Dehnung auswirkt.

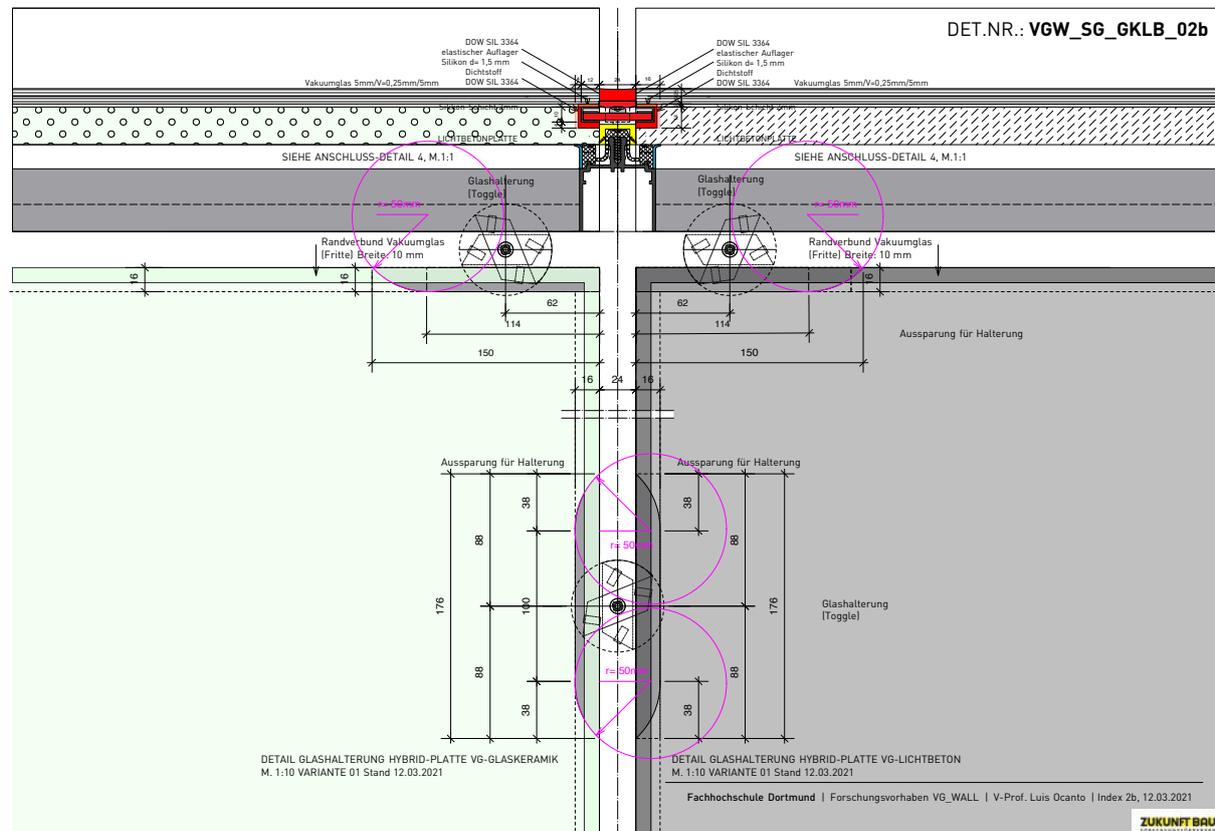
7.3 Demonstratoren und Exponate

Demonstrator Glasaufbauten im Fassadensystem RAICO Therm+ A-I Structural Glazing

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Demonstratoren und Exponate der Glasaufbauten in dem Fassadensystem RAICO Therm+ A-I Pfosten-Riegel und Structural Glazing eingebaut. Die Planung wurde im Frühjahr gezeichnet und mit dem Projektpartner der Partnerfirmen besprochen. Anschließend wurden die Platten der unterschiedlichen Materialien in den Werkstätten der Partnerfirmen vorbereitet. Der Demonstrator der Structural Glazing Version wurde als Diptychon konzipiert, ein Rahmenteil, das zwei erdachte Glasaufbauten trägt, Vakuumglas laminiert auf Glaskeramik und Vakuumglas laminiert auf Lichtbeton. Das wichtigste an diesem Demonstrator war die Bearbeitung der Steinplatten, um die notwendigen Aussparungen an den Stellen, wo die Halterung des Toogle-Befestigungssystems vorgesehen ist, zu fertigen. Siehe Abb. 52 u. Abb. 53.

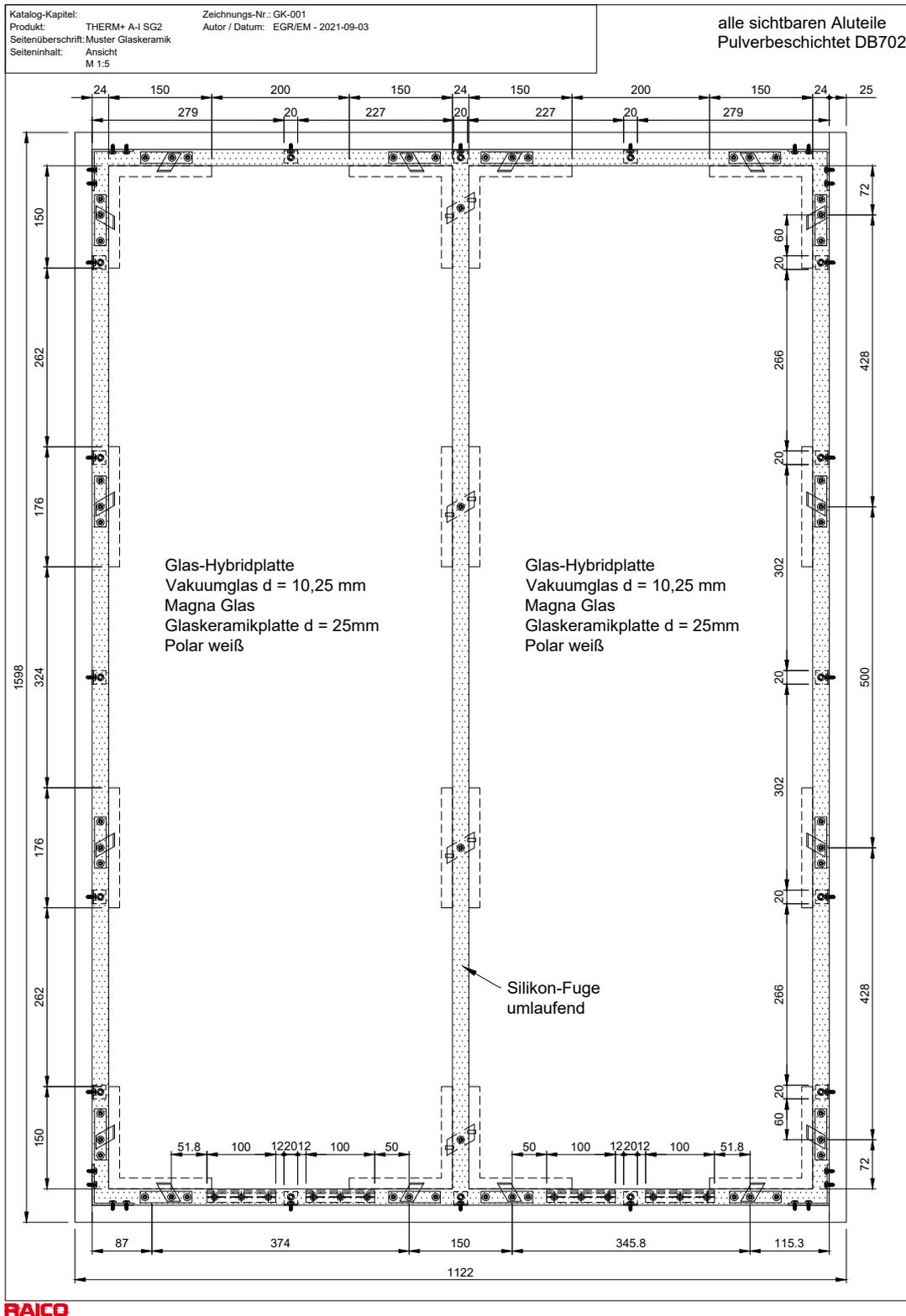
Abbildung 52

Detailplanung des Demonstrators, Aussparungen an den Steinplatten und Toogle-System Befestigung



Quelle: Ocanto

Abbildung 54
Ausführungsplanung, Werkzeugzeichnung des Demonstrators Structural Glazing



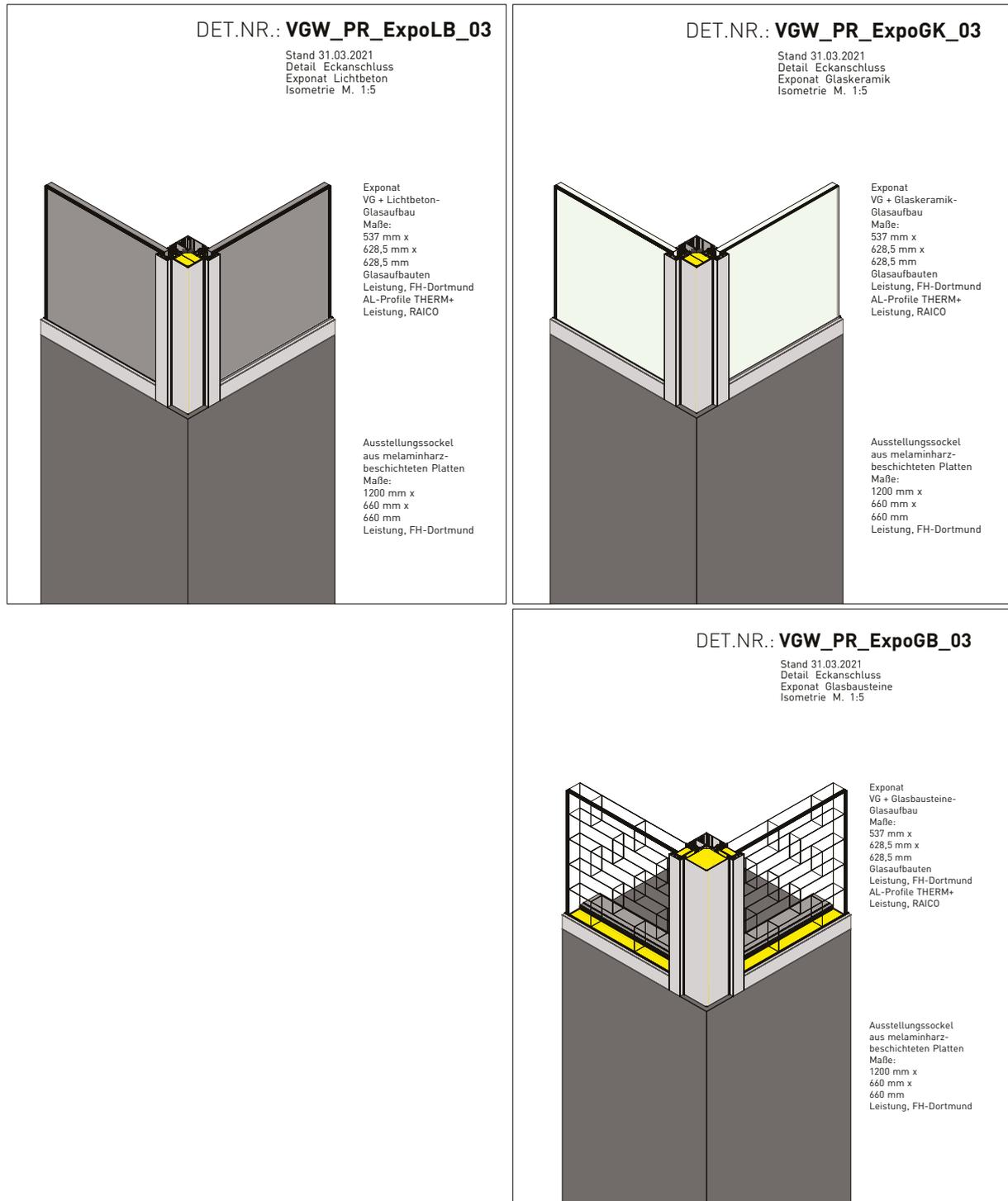
Quelle: RAICO

Demonstrator Glasaufbauten im Fassadensystem RAICO Therm+ A-I Pfosten-Riegel

Es wurden drei weitere Demonstratoren geplant und sind zur Ausführung vorbereitet worden. Es handelt sich um eine 90° Eckkonstruktion mit Glasaufbauten Vakuumglas laminiert mit: 1.) Lichtbeton, 2 Teile hell und dunkel, 2.) Glasbausteine 2 Teile, 3.) Gußglas - Prismaglas 2 Teile. S. Abb. 55 u. 56

Abbildung 55

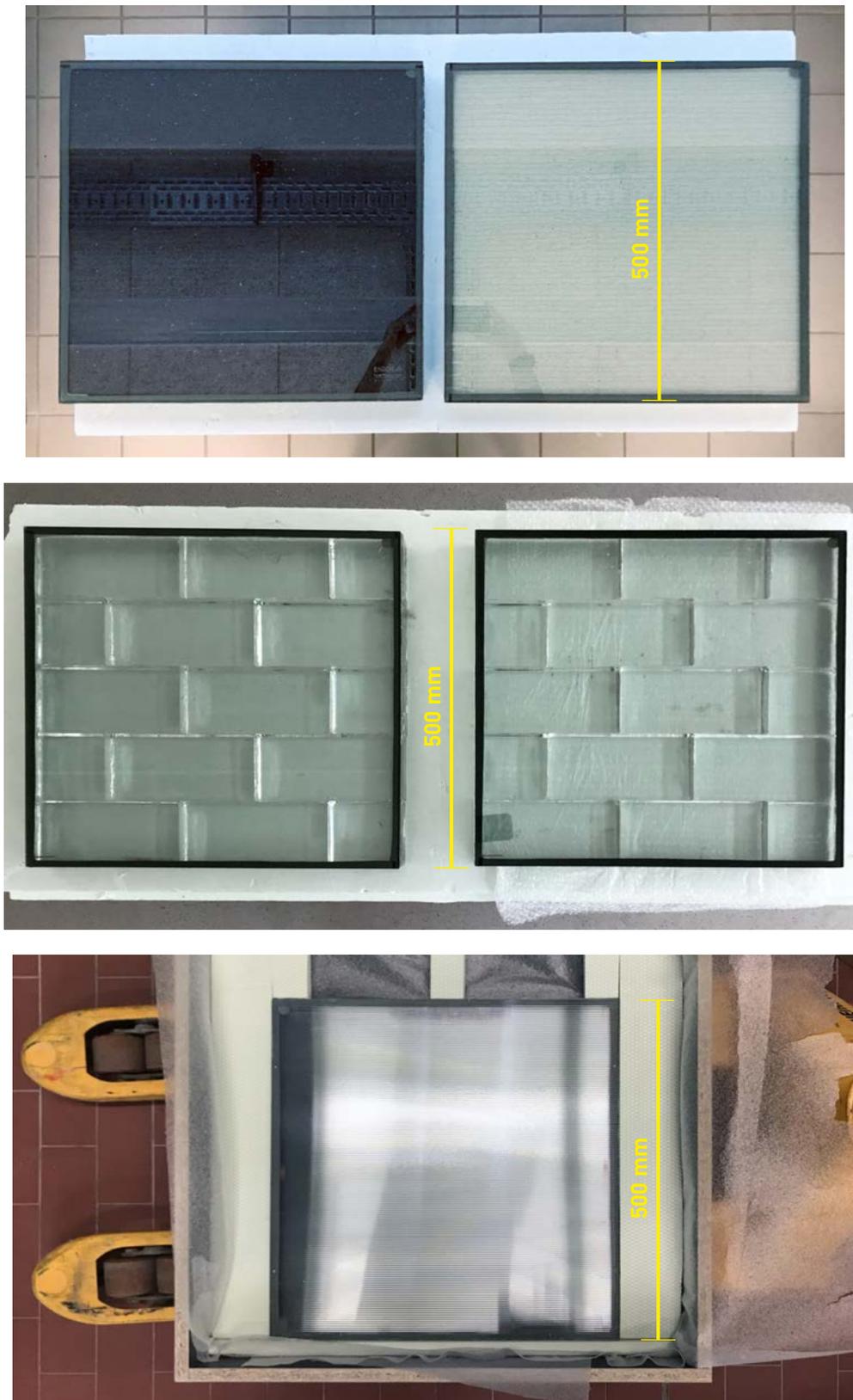
Isometrische Darstellung der Eck-Demonstratoren in Pfosten-Riegel Konstruktion



Quelle: Ocanto

Abbildung 57

Laminierte Glasaufbauten 500 mm x 500 mm, oben: Vakuumglas + Lichtbeton, mitte: Vakuumglas + Glasbausteine, unten: Vakuumglas + Gußglas



Quelle: Ocanto

Abbildung 58

Laminierte Glasaufbauten 500 mm x 1500 mm Vakuumglas + Glaskeramik



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 59

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Structural Glazing, Glasaufbauten VG + Glaskeramik 500 mm x 1500 mm,
Ansicht vorne: Außenansicht Wetterseite



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 60

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Structural Glazing, Glasaufbauten VG + Glaskeramik 500 mm x 1500 mm,
Ansicht hinten: Innenansicht bzw. Innenraum



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 61

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Structural Glazing, Glasaufbauten VG + Glaskeramik 500 mm x 1500 mm,
rechts: Ansicht vorne, außen, links: Ansicht hinten, innen



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 62

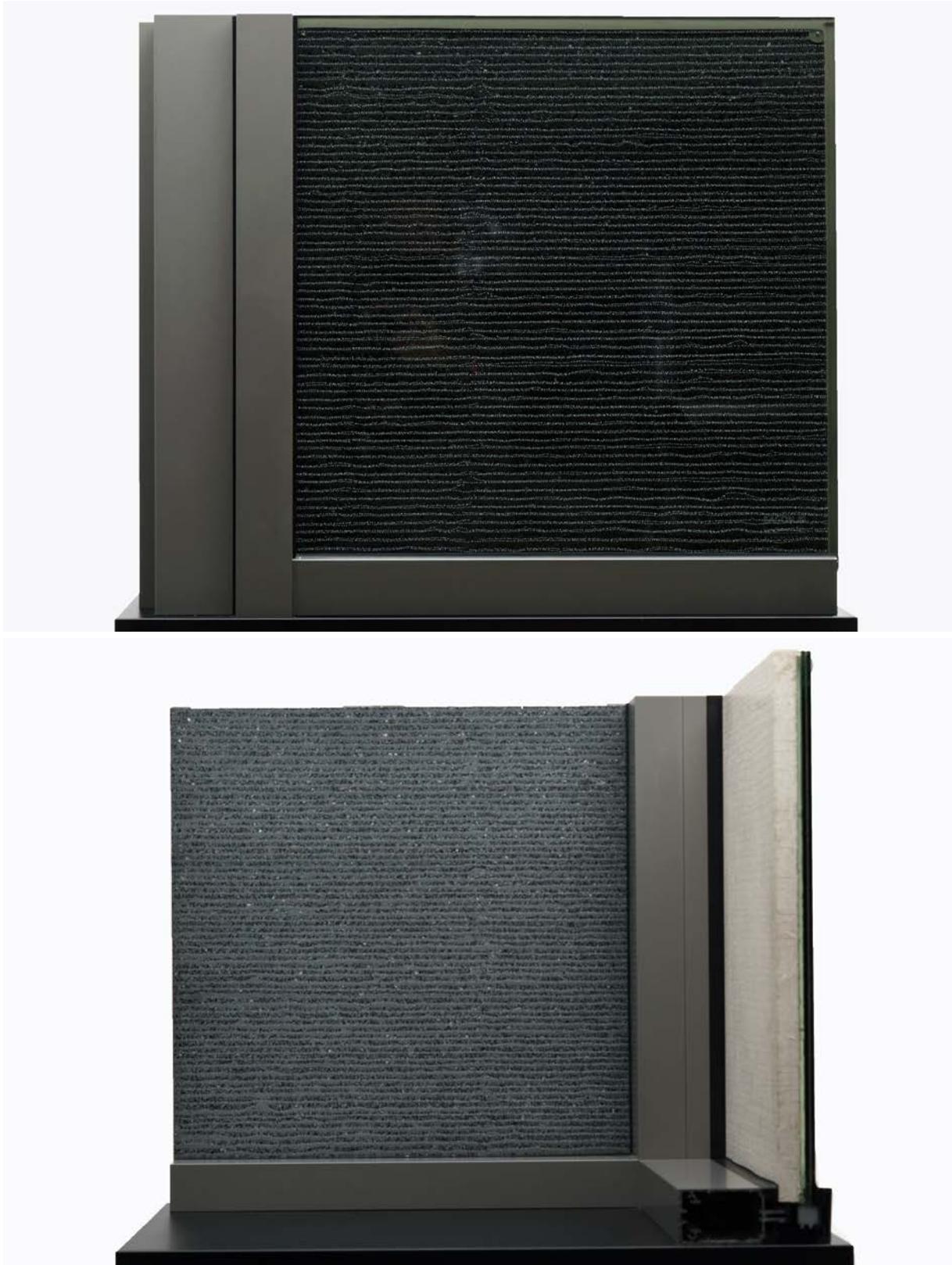
Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Structural Glazing, Glasaufbauten VG + Glaskeramik 500 mm x 1500 mm,
Ansicht vorne: außen mit Schattenbild



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 63

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel, Eckausbildung, Glasaufbau VG + Lichtbeton Dunkel 500 mm x 500 mm, oben: Außenansicht, unten: Innenansicht



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 64

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel, Eckausbildung, Glasaufbau VG + Lichtbeton Hell 500 mm x 500 mm,
oben: Außenansicht, unten: Innenansicht



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 65

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel, Eckausbildung, Glasaufbauten VG + Glasbausteine 500 mm x 500 mm, oben: Außenansicht, unten: Innenansicht



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 66

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel, Eckausbildung, Glasaufbauten VG + Gussglas 500 mm x 500 mm,
oben: Außenansicht, unten: Innenansicht



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 67

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel Eckausbildung, Glasaufbauten VG + Lichtbeton Hell und Dunkel 500 mm x 500 mm, oben: Außenansicht, unten: Innenansicht



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 68

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel Eckausbildung, Glasaufbauten VG + Glasbausteine 500 mm x 500 mm, oben: Außenansicht, unten: Innenansicht



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 69

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel Eckausbildung, VG + Gussglas 500 mm x 500 mm, oben: Außenansicht, unten: Innenansicht



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 70

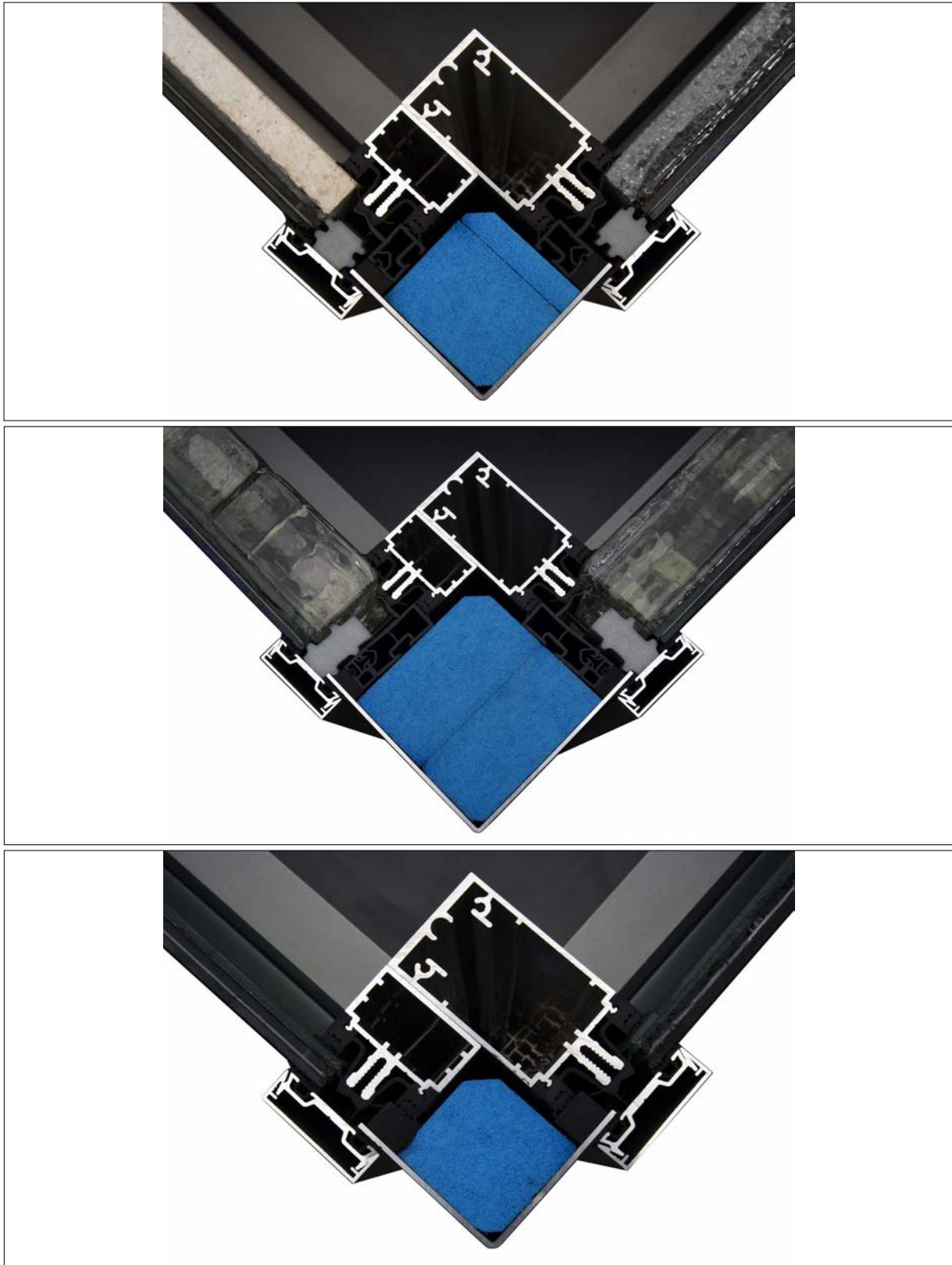
Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel Eckausbildung paarweise, oben: VG + Gussglas / VG + Lichtbeton, mitte: VG + Lichtbeton / VG + Glasbausteine, unten: VG + Gussglas / VG + Glasbausteine



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 71

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel Eckausbildung, Konstruktions-Details, oben: Lichtbeton-Glasaufbauten, mitte: VG + Glasbausteine, unten: VG + Gussglas



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

Abbildung 72

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel untere Anschluss-Konstruktions-Details, oben: VG + Gussglas, mitte: VG + Lichtbeton, unten: VG + Glasbausteine



Fotografie Gabrielle Marl FHDO

8 Wirtschaftlichkeit

Die Einschätzung der Wirtschaftlichkeit ist schwierig, aber zählt man alle Vorteile in der Wertschöpfungskette zusammen sind VG-basierte Fassaden- und Fenster-Systeme im Vorteil. Die derzeitige Preisdifferenz von Vakuumglas zum Mehrscheiben-Isolierglas ist bei den aktuellen Marktpreisen nicht sehr groß, siehe Tab. 9 und Tab 10. Allerdings bei importiertem Vakuumglas aus Asien werden zusätzlich Frachtkosten von ca. 2.000,00 €/T berechnet. Je nach Volumen und Größe der Bestellung wird es teuer oder günstiger. Frachtkosten und Lieferschwierigkeiten können z.Zt. noch einen Nachteil bei Auswahl von Vakuumglas in der Planung darstellen, vor allem bei der Realisierung von Neubau-Projekten. Auf Grund der Vorteile von Vakuumglas kann die Entscheidung für diese Art der Verglasung in Bestands-Projekten leichter ausfallen. Dies ist die Sicht der Glasindustrie bzw. der Hersteller wie AGC, die die Vermarktung und Verkauf des Vakuumglases überwiegend an Sanierungs-Projekten fokussieren.

Tabelle 9

Kostenbeispiel aus der Praxis von Isolierverglasungen bei unterschiedlichen Ug-Werten in €/m² (2021)

Verglasung / Ausführung	Preis
Zweifach-Glas, 4/16/4 Ug-Wert 1,0	60 €/m ² bis 65 €/m ²
Dreifach-Glas, 4/12/4/12/4 Ug-Wert 0,7	105 €/m ² bis 110 €/m ²
Dreifach-Glas, 4/16/8 Ug-Wert 1,0	130 €/m ² bis 135 €/m ²

Die hier dargestellten Kosten beziehen sich auf die Preise (brutto) für verschiedene Glasarten, stellen allerdings lediglich Richtpreise dar. Die Kosten für das entsprechende Glas können von Anbieter zu Anbieter auch leicht variieren.

Quelle: kostencheck.de/isolierglas-eur-m²

Tabelle 10

Kosten von Vakuumglas der Hersteller Eagon und AGC bei unterschiedlichen Ug-Werten in €/m² (2021)

Verglasung / Ausführung	Preis
Eagon VG, TL5/V/T5 Ug-Wert 0,52	140 €/m ²
Eagon VG, TL5/V/T5 Ug-Wert 0,38	150 €/m ²
AGC-Fineo, 4,5/V/4,5 Ug-Wert 0,70	ca. 120 €/m ²

Quelle: Ocanto

Genauere Herstellungskosten der im Projekt erdachten Glasaufbauten lassen sich nur schwer schätzen. Produktionskosten von nicht bis zum Ende aller Produktionsketten entwickelten Prototypen lassen sich zur Zeit noch nicht glaubhaft erstellen. Um die notwendigen Herstellungskosten abschätzen zu können sind nicht nur die für die Erstellung von Baukosten pro m² oder m³ Fassadenfläche notwendigen Eckpunkte wie Produktion, Transport und Montage zu beachten, sondern auch die zukünftige Entwicklung von Industrie und Produktionsverfahren, sowie die Rahmenbedingungen des Immobilienmarktes, des zu erwartenden Zinsniveaus und die aktuelle Gesetzgebung zur Energieeinsparung. Diese variablen Faktoren überschreiten die Möglichkeiten der Berechnung zukünftiger realer Baukosten im Rahmen dieses Forschungsprojektes.

Im Bezug auf die Einschätzung der Herstellkosten und der Entwicklungszeit zur Produktionsreife der Glasaufbauten soll eine Betrachtung von den Fixkosten unter anderem erfolgen. Aussagen auf die Wirtschaftlichkeit basieren immer auf einer Analyse aktueller Baukosten. Bei einer Kostenermittlung der Glasaufbauten reichen allein die Vakuumglas-Kosten nicht aus, hinzu kommen noch die Kosten des ausgewählten zusätzlichen Materials, des Transports und der Montage. Diese Kosten variieren je nach Materialtyp, Gußglas-Prismaglas ist z.B. viel günstiger als Glaskeramik oder Lichtbeton, die Glasbausteine liegen durch aufwendigere Produktion

auch in einer höheren Preisklasse. Für eine serielle Produktion der Glasbauteile, der Konstruktions-Fertigung und die Abbildung ihrer monetären Vorteile gegenüber herkömmlichen Glasfassaden ist jedoch noch weitere Entwicklungsarbeit notwendig. Es gilt in diesem Zusammenhang die Wandstärken, Elementformate und die Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Materialien zu vergleichen und erörtern sowie ggf. zu verbessern. Das gesamte Zusammenspiel der gesetzten Faktoren je nach Typ des Bauvorhabens im Neubau oder Bestand muss hierzu bestimmt werden. Die Herstellung oder Sanierung einer Curtain-Wall-Fassade wird auf jeden Fall günstiger sein als die Herstellung einer massiven Fassade mit herkömmlichen Baumaterialien. Auch der Vorteil der Herstellungs- und Montagezeit ist bei Trocken- und Konstruktions-Leichtbau bei serieller Produktion und Fertigung der Fassadenelemente beachtlich. Wenn man den Gesamtnutzen für Gebäude und Mensch betrachtet, bewerten dies führende Architekten- und Fassaden-Planungs-Gruppen sowie die Industrie eindeutig positiv.

8.1 Baupraktische Anschlussfähigkeit

Der Fokus zu einer baupraktischen Anschlussfähigkeit war ein wichtiger Aspekt in diesem Forschungsprojekt. Die Auswahl eines geeigneten Fassadensystems, das leistungsfähig und flexibel nicht nur die hohen Fassadenanforderungen erfüllt, sondern auch die Adaptabilität und Integration diverser Glasaufbauten mit VG im System ermöglicht, war ein übergeordnetes Projektziel. Bei dem Fassaden-System RAICO Therm+ A-I, des Projektpartners RAICO wurden solche Ansprüche erfüllt, es konnten die erdachten Glasaufbauten in Pfosten-Riegel- und Structural-Glazing Systemvarianten gut angepasst werden. Das baukonstruktive Prinzip des Pfosten-Riegel und Structural-Glazing Fassadensystems Therm+ A-I lässt sich auch auf fast alle herkömmliche Pfosten-Riegel- und SGG Fassaden-Systeme übertragen. Damit ist der Einsatz der neu entwickelten Glasaufbauten in Pfosten-Riegel- und SGG Fassaden-Systeme bei Neubau und Sanierung nahezu universell. Auch ist die Erstellung von Fassaden mit den neuen VG-Wall-Elementen gegenüber herkömmlichen Isolierglas-Elementen im Montageprozess nahezu gleich.

Die Projektpartner der transparenten und transluzenten Materialien: Fuchs Design (Gußglas, Glasbausteine), Lucem (Lichtbeton) und Magna Glas (Glaskeramik) haben die Lösung der Wärmeschutz-Problematik ihrer Materialien zum Einsatz in Pfosten-Riegel-Fassadensysteme begrüßt und das Forschungsprojekt Vakuumglas konnte hierfür die vorliegenden Lösungsmöglichkeiten entwickeln. Das Thema Laminierung hat insbesondere die Partner Fuchs Design und Magna Glas interessiert. Fuchs Design führte hierzu mehrere Versuche zur Laminierung der Glasbausteine mit Isolierverglasung bei der Fa. sedak mit Folien durch, die sehr aufwendig und kostenintensiv waren. Um die unregelmässigen Oberflächen der Glasbausteine mit dem Floatglas zu verbinden werden bis zu 4 Folien-Schichten gebraucht. Deshalb wurde auch eine Alternative zur Folien-Laminierung, die Klebung mit Gußsilikon, im Forschungsprojekt gefunden.

Der Partner Magna Glas hat ein Fassaden-Projekt in Großbritannien mit Glaskeramik-Scheiben realisiert, die an Isolierglas-Scheiben linear geklebt wurden. Es wurde hierzu eine Alternative gesucht und so ein Forschungs- und Entwicklungspartner zur Verklebung von Glaskeramik mit Vakuumglas im Forschungsprojekt Vakuumglas_Wall gefunden.

Der Partner DOW ist immer auf der Suche nach Innovationen um einen möglichen Einsatz seiner Produkte im Bauwesen zu generieren. Das flüssige Silikon Dow Sil EI-2888, im Projekt als Gießsilikon verwendet, wurde primär für die Verkapselung von Leiterplatten für LED-Beleuchtung und Solarpaneele entwickelt. Bei ersten Meetings im Projekt war dieses Produkt für die Laminierung des Vakuumglases mit den erdachten Glasaufbauten mit unterschiedlichen transparenten und transluzenten Materialien vorgeschlagen worden.

Das Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL entwickelte sich im Laufe der Vertiefung mit der Forschungsaufgabe in ein Forschungs- u. Entwicklungs-Projekt von großem Nutzen für alle am Projekt Beteiligten und ermöglicht wirtschaftlich die zukünftige Verwendung unterschiedlichster Materialien in Verbindung mit VG zur Adaption in herkömmliche Fassaden-Konstruktionen im Neubau und besonders auch im Bestand.

9 Fazit, Ausblick

Der Einsatz des Vakuumglases als Wärmeschutz bzw. „transparente Wärmedämmung“ ist eine effiziente, intelligente und zugleich ästhetische Maßnahme, um transparente und transluzente Materialien wärmetechnisch an Fassaden energetisch zu optimieren. Diese Materialien, die auf Grund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit den Mindestanforderungen des Gebäude-Energiegesetzes (GEG) nicht entsprechen, werden so verbessert, um einen effizienten Einsatz an Gebäudehüllen zu leisten. Die im Forschungsprojekt untersuchten und gebauten Konstruktionsmodelle mit Vakuumglas führen zu einer viel versprechenden Zukunft des Vakuumglases. Durch Demonstrationsbauten bleiben noch die Grenzen der Modelle und der Systeme in der Praxis zu erproben und zu untersuchen. Ein Thema das im Forschungsprojekt auch berücksichtigt wurde, ist der Rückbau der eingesetzten Bauteile und Baustoffe von den Konstruktionsmodellen mit Vakuumglas. Die Anforderungen an den Rückbau und die Wiederverwertbarkeit vom Glas im Verbund setzen sich aus logistischen, technischen und wirtschaftlichen Faktoren sowie Qualitätsanforderungen zusammen. Eine konkrete Aussage zur Wiederverwertbarkeit und zum Rückbau ist z.Zt. nur bedingt möglich und wird i.d.R. im Einzelfall entschieden. Zu den Forschungen soll eine passende Antwort mit den Projektpartnern zu diesem Thema weiter entwickelt werden.

Alle schon im Bericht genannten Vorteile der neuen VG-Fassaden-Systeme zeigen, dass sie einen Beitrag zur Erreichung der von der EU und der Bundesregierung gesetzten Ziele zur Energie- und CO₂-Einsparung leisten können. Hierbei ist der gute winterliche und besonders auch der sommerliche Wärmeschutz gerade in Zeiten des Klimawandels mit den zu erwartenden Extrem-Wettersituationen für die enorme Einsparung von Heiz- bzw. Kühl-Energie des neu entwickelten Fassadensystems von großer Bedeutung. Die Möglichkeit der Nutzung von passiver Solargewinnung und Nachtauskühlung zur Verbesserung des Komforts in den Innenräumen kann über drehbare Flügel des VG-Wall-Systems problemlos ohne großen Mehraufwand erreicht werden.

Gerade der Einsatz des neuen VG-Wall-Systems in Bestandsgebäuden kann die Problematik der nachträglichen Dämmung bei geringer Bautiefe lösen. Die vorhandenen Gebäude des Industriezeitalters der 50iger bis 80iger Jahre mit ihrer typischen Architektur der Moderne bieten durch die neuen, energieeffizienten Glasbau-Systeme eine Vielfalt an Gestaltungsmöglichkeiten bei gleichzeitigem Erhalt ihrer einstigen Ästhetik. Der Einsatz der neuen Fassadenelemente in bestehenden Pfosten- und Riegelsysteme nutzt das vorhandene Potenzial durch geringes Gewicht und Bautiefe und ermöglicht so auch die Umnutzung nicht mehr benötigter Bürogebäude zu Wohngebäuden mit sehr guter Tageslichtnutzung durch die eingesetzten transparenten und transluzenten Materialien bei hohem thermischem Komfort in den Innenräumen. Bei denkmalgeschützten Gebäuden können Fassaden mit den typischen Glasbaustein- oder Industrie-/Gussglas-Fassaden ohne Veränderung ihres Erscheinungsbildes Instand gesetzt und energetisch ertüchtigt werden. Durch digitale Planung und Vorfertigung der VG-Elemente bei problemloser Montage können Gebäude innerhalb kürzester Bauzeit gebaut oder saniert werden. In diesem Forschungsprojekt Vakuumglas_WALL sind alle Grundlagen für den zukünftigen Einsatz der neuen Glasbausysteme im Klebeverfahren als transparente Fassadenelemente erarbeitet worden.

Im nächsten Schritt sollte mit den beteiligten Projektpartnern ein Monitoring, als Konsequenz und Folge dieses Forschungsprojektes, erfolgen und erste Fassaden im grösseren Stiel (wenn auch erstmals nur mit einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) mit allen notwendigen Nachweisen von den Herstellern) umgesetzt werden um die neu entwickelten Fassadensysteme praktisch anzuwenden, um Erfahrungen bei Produktion, Konstruktion und Montage der Bauelemente zu erhalten und ihre Vorteile in Wirtschaftlichkeit, Variantenvielfalt und Ästhetik bekannt zu machen. Eine zukünftige Preissenkung der Vakuumglas-WALL-Bausysteme ist zu erwarten, da zukünftig die Errichtung von Produktionsstätten der Komponenten in Deutschland und der EU entstehen werden. Viele Bauträger, Kommunen und Gemeinden (wie z.B. die Stadt Dortmund) sind bereit Pilot-Bauprojekte in Zeiten des Struktur- und Klimawandels, besonders bei der Sanierung und Umnutzung von Bestandsgebäuden des Industriezeitalters, zu unterstützen. Durch Anpassung und die Flexibilität des Vakuumglas_WALL Systems mit verschiedensten Materialien können neue Fassaden des 21. Jahrhunderts mit unterschiedlichen Oberflächen, Strukturen und Transparenz architektonisch ästhetisch im Stadtbild sowohl im Neubau als auch im Bestand digital geplant und realisiert werden.

10 Mitwirkende

Autor

Ocanto-Arciniegas, Luis (Fachhochschule Dortmund)

Weitere Mitwirkende

Maurer, Paul-Andreas (Fachhochschule Dortmund)

Horn, Daniel (Fachhochschule Dortmund)

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

Dow Europe GmbH (Standort Seneffe, Belgien)
Dow Silicones Deutschland GmbH (Standort Wiesbaden)
Rheingaustraße 34
65201 Wiesbaden

Fuchs Design GmbH
Kempener Landstr. 1
47647 Kerken

LUCEM GmbH
Philipstraße 8
52068 Aachen

MAGNA Glaskeramik GmbH
Straße der Einheit 18
06179 Teuchental

RAICO Bautechnik GmbH
Gewerbegebiet Nord 2
87772 Pfaffenhausen

Fachliche Betreuung

Daniel Wöffen
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

11 Kurzbiographie



Luis Ocanto-Arciniegas

Luis Ocanto ist Forscher im Fachbereich Architektur an der Fachhochschule Dortmund. Seine Forschung konzentriert sich auf innovative Baumaterialien und neue Bauverfahren. Seine Forschungsinteressen liegen insbesondere im Bereich der energieeffizienten und nachhaltigen Leistung der Gebäudehülle. Seit 2009 leitet Luis Ocanto zahlreiche Forschungsprojekte am Fachbereich Material- und Bautechnik mit dem Schwerpunkt Vakuumglas-anwendung. Luis Ocanto stammt aus Caracas, Venezuela und studierte Architektur an der Universidad Central de Venezuela, Caracas, Kunststudium an der Kunstakademie Düsseldorf und Master of Engineering an der Technischen Hochschule Köln.

12 Verzeichnisse

12.1 Literaturverzeichnis

Beijing Synergy Vacuum Glazing Technology Co., LTD.: World Pioneer of Vacuum Glazing. Produktinformation, Stand 2015

Bielefeld, B; El Khouli: Entwurfsidee, Birkhäuser Verlag, Basel • Boston • Berlin 2007

Collins, R.E.; Fischer-Cripps, A.C.; Tang, J.-Z.: Transparent evacuated insulation. In: Solar Energy 49 (5), S. 333–350, 1992

Glaser, Siegfried et al.: Vakuum-Isolierglas (VIG) Forschungsbericht BMWi, Projektträger PtJ, Förderkennzeichen 0327366 A bis G, 2007

Glaser, Siegfried et al.: Hochwärmedämmende Fenster- und Fassadensysteme (HWFF) Forschungsbericht BMWi, Projektträger PtJ, Förderkennzeichen 0327654 Abis H, 2011

Glaser, Siegfried et al.: Produktionstechniken für Vakuum-Isolierglas (ProVIG) / Forschungsbericht BMWi, Projektträger PtJ, Förderkennzeichen 0327419 A bis G, 2012

Hegger, Manfred; Auch-Schwelk, Volker; Fuchs, Matthias; Rosenkranz, Thorsten: Baustoff Atlas, Hrsg. Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München 2005

Hegger, Manfred; Drexler, Hans; Zeumer, Martin: Materialität, Birkhäuser Verlag, Basel • Boston • Berlin 2007

Hoffmann, Sandra: Klartext! Gebäudeenergiegesetz GEG, Sonderpublikation der GEG Baupraxis, Hrsg. Forum Verlag Herkert GmbH, Merching 2020

Hohenstein, Helmut: Vakuum Glass Status Report - Energy efficient building skins with Vacuum Glass Marktstudie, Marl 2017

Hohenstein, Helmut: Historische Entwicklung, Marktsituation und Anwendungen von Vakuumglas (VG); tätigen und -bedarf zur Weiterentwicklung, insbesondere für Fassaden- und Fenstersysteme für das Forschungsprojekt „VG-Fassade“ erstellter Statusbericht, Marl 2019

Huber, Konrad; Lieb, Karin: Fachartikel Gebäude Energieberater Ausgabe 04 / 2019

Kaltenbach, Frank. (Hrsg.): Transluzente Materialien, Glas, Kunststoff, Metall; Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München 2004

Krippner, Roland; Musso, Florian: Fassadenöffnungen, Birkhäuser Verlag, Basel • Boston • Berlin 2008

Moussavi, Farshid; Kubo, Michael (Hrsg.) The Function of Ornament: Studio at Harvard University Graduate School of Design, Spring 2006; Actar Verlag, Barcelona 2006

PILKINGTON Deutschland AG: Pilkington Spacia Vakuumverglasung. Produktinformation, Stand 2014

PILKINGTON Deutschland AG: unveröffentlichte Kommunikationsschrift, Stand 2015

Rose, A; Sack, Norbert; Nothacker, Klemens; Gassmann: Recycling von Flachglas im Bauwesen – Analyse des Ist-Zustandes und Ableitung von Handlungsempfehlungen, Forschungsbericht F3202 Forschungsinitiative ZukunftBAU, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2020

Schneider, Jens; Kuntsche, Johannes; Schula, Sebastian; Schneider, Frank; Wörner, Johann-Dietrich, 2001, 2016: Glasbau - Grundlagen • Berechnung • Konstruktion, 2. Auflage Berlin-Heidelberg: Springer Verlag

Schittich, Christian; Staib, Gerald; Balkow, Dieter; Schuler, Matthias; Sobek, Werner: Glasbau Atlas, Hrsg. Institut für internationale Architektur-Dokumentation, zweite Auflage München 2006

Siebert, Geralt; Siebert, Barbara: Baudetails - Hochbau - Sonderedition Bauen mit Glas, 1. Auflage WEKA MEDIA GmbH & CO. KG. Augsburg 2020

Simko, T.M.; Beck, F.A., Collins, R.E., Arasthed, D.: Edge conduction in Vacuum Glazing. In: THERMAL ENVELOPES VI (Heat Transfer in Fenestration II - Principles), S. 601–611, 1994

12.2 Normen und Richtlinien

SCHETTLER-KÖHLER, H.P.: Die neue Energieeinsparverordnung. 2. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin Wien Zürich 2014

DIN 1055-4: 2005-03 Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten

DIN 4108-2: 2013-02 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

DIN 4108-3: 2014-11 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung

DIN 5034-1 Tageslicht in Innenräume - Teil 1: Begriffe und Mindestanforderungen

DIN 5034-2 Tageslicht in Innenräume - Teil 2: Grundlagen

DIN 5034-1 Tageslicht in Innenräume - Teil 3: Berechnungen

DIN EN 410 Glas im Bauwesen. Bestimmung der lichttechnischen- und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen: Deutsche Fassung EN 410: 2011

DIN EN 1279-1: 2018-10 Glas im Bauwesen - Mehrscheiben - Isolierglas - Teil 1: Allgemeines, Systembeschreibung, Austausch-Regeln

DIN EN 1279-2: 2018-10 Glas im Bauwesen - Mehrscheiben - Isolierglas - Teil 2: Langzeitprüfverfahren und Anforderungen bezüglich Feuchtigkeits- Aufnahme; Deutsche Fassung EN 1279-2:2018

DIN EN ISO 13788: 2013-05 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren

DIN 18008-1 Glas im Bauwesen. Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen

DIN EN ISO 6946: 2008-04 Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren

ETAG 002 - Teil 1: Gestützte und ungestützte Systeme. Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für Geklebte Glaskonstruktionen (Structural Sealant Glazing Systems - SSGS)

ISO 19916-1: 2018 Glas in building - Vacuum insulating glass - Part 1: Basic specification of products and evaluation methods for thermal and sound insulation performance

ISO 19916-3: 2018 Glas in building - Vacuum insulating glass - Part 3: Test methods for evaluation of performance under temperature differences

12.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1

Wärmetransporte im Vakuumglas

Abbildung 2

VG - Detail einer Scheibe, Links: Abstandshalter, Getter und Evakuierungsventil unter Abdeckkappe, Synergy. Mitte: Getter in der Eagon VG-Scheibe, Rechts: Evakuierungsventil, Flächenbündig an der Eagon VG-Scheibe

Abbildung 3

Schnitt durch eine Edelgas gefüllte Dreifach-Verglasung 4/12/4124 der Firma Pilkington (links), Randverbund Abstandshalter in 20-facher Vergrößerung (rechts)

Abbildung 4

Seitenansicht eines VG 4/0,15/4 der Firma Synergy in 20-facher (links) und 200 facher (rechts) Vergrößerung

Abbildung 5

Isothermenvergleich einer Dreifach- und einer Vakuumverglasung

Abbildung 6

Zusammenhang zwischen Pillar und Wärmeleitfähigkeit

Abbildung 7

Ringförmiger Pillar von Synergy u. Eagon, Links: Vorderseite mit Aussparung zur besseren Vakuumierung, Rechts: Rückseite

Abbildung 8

Zusammenhang zwischen Low-E-Beschichtung und Wärmeleitfähigkeit des Vakuumglases

Abbildung 9

Zusammenhang von Wärmeübertragung durch Strahlung und Wärmeleitung vom Pillar sowie U-Wert der jeweiligen Low-E-Vakuumverglasung

Abbildung 10

Übersicht ausgewählter Materialien

Abbildung 11

Auswirkungen des Stoffaustausches, nach ift-Richtlinie DI-01

Abbildung 12

Klebephasen beim Klebekonzept - direkt Verklebung: a) Klebstoff am den Rand applizieren (hier VG-Scheibe), b) geklebte Teile, c) Klebstoff am Rand applizieren (hier Glasbausteine), d) Kavität mit Gießsilikon befüllen (hier Lichtbeton-Teil)

Abbildung 13

Glasaufbauten: Zusammensetzung und Funktion Modell 01 und Modell 05

Abbildung 14

Zusammensetzung Glasaufbauten, Funktion Sichtschutz, lineare Verklebung: Modell 02, 04, u. 06

Abbildung 15

Zusammensetzung Glasaufbauten, Funktion Sichtschutz, Lichtfilter, direkte Verklebung: Modell 03, Modell 07

Abbildung 16

Zusammensetzung Glasaufbauten, Funktion tragend, direkte Verklebung: Modell 08, Modell 09

Abbildung 17

VG Aufbauten: Struktur und Leistungen, Auswahl

Abbildung 18

Fassadensystem Raico Therm+ A-I Pfosten-Riegel: Baukonstruktive Maßnahmen für die Untersuchung. Vergleich mit herkömmlicher 3-fach Verglasung

Abbildung 19

Fassadensystem Raico Therm+ A-I , Structural Glazing Baukonstruktive Maßnahmen für die Untersuchung. Vergleich mit herkömmlicher 3-fach Verglasung

Abbildung 20

Glasaufbau M03 - Vakuumglas + Lichtbeton in Structural Glazing Konstruktion, Visualisierung

Abbildung 21

Glasaufbau M07 - Vakuumglas + Glaskeramik in Structural Glazing Konstruktion, Visualisierung

Abbildung 22

Glasaufbau M04 - Vakuumglas + Profilbauglas in Pfosten-Riegel-Konstruktion, Visualisierung

Abbildung 23

Glasaufbau M04 - Vakuumglas + Profilbauglas in Pfosten-Riegel-Konstruktion, Detail - Visualisierung

Abbildung 24

Glasaufbau M09 - Vakuumglas + Glasbausteine in Pfosten-Riegel-Konstruktion, Visualisierung

Abbildung 25

Glasaufbau M03 - Vakuumglas + Lichtbeton in Structural-Glazing-Konstruktion, externer Punkthalter, Studie

Abbildung 26

Fassaden System Therm+ A-I und SG mit Aufbauten

Abbildung 27

Anpassung der Formate an einer Vakuumglas-Scheibe, Beispiele Fugenbildung Lichtbetonplatten horizontal Typ A und vertikal Typ B

Abbildung 28

Fassadenelement Typen und Eigenschaften, Beispiel Case Study Wohn-Geschäftshaus, Südwest Ansicht

Abbildung 29

Fassadenelement Typen und Eigenschaften, Beispiel Case Study Wohn-Geschäftshaus, Nordost Ansicht

Abbildung 30

Fassadenelement Typen und Eigenschaften, Beispiel Case Study Wohn-Geschäftshaus, Querschnitt

Abbildung 31

Fassadenelement Typen und Eigenschaften, Beispiel Case Study Wohn-Geschäftshaus, Querschnitt und Perspektive

Abbildung 32

Fassadenelement Typen und Eigenschaften, Beispiel Case Study Wohn-Geschäftshaus, Axonometrie Straßenseite

Abbildung 33

Thermisches Konzept- und Funktionsschema des drehbaren Fassadenelementes CS03 / M03

Abbildung 34

Case Study Wohn- und Geschäftshaus, Visualisierung 01

Abbildung 35

Case Study Wohn- und Geschäftshaus, Visualisierung 02

Abbildung 36

Case Study Wohn- und Geschäftshaus, Visualisierung 03

Abbildung 37

Zeichnung Probekörper Typ A für Schertest

Abbildung 38

Zeichnung Probekörper Typ B für Alterungstest

Abbildung 39

Übersicht gefertigte Probekörper Typ A und Typ B

Abbildung 40

FEM-Simulationen erste Ergebnisse

Abbildung 41

FEM-Simulationen zweite Ergebnisse

Abbildung 42

Übersicht der Laborproben nach Alterungstest

Abbildung 43

Laborproben Lichtbeton, a) unbeschichtet / Floatglas, b) Vergrößerung der Ecke links unten vom Muster, Detail: eingetretene Feuchtigkeit in dem Dichtstoff, c) Rückseite der Lichtbeton-Probe: zum Teil verwitterte Oberfläche

Abbildung 44

Laborproben Lichtbeton, a) beschichtet / Floatglas, b) Vergrößerung Ecke rechts oben: Feuchtigkeit an dem Dichtstoff, c) Rückseite der Lichtbeton-Probe, beschichtete Oberfläche nach dem Alterungstest unverändert

Abbildung 45

Laborproben a) Glaskeramik / Floatglas, b) Vergrößerung Ecke links unten, Detail c) Rückseite der Glaskeramik-Platte, Oberfläche nach dem Alterungstest unverändert

Abbildung 46

Laborproben Glasbaustein / Floatglas; Links: Vorderseite Laborprobe Floatglas, Oberfläche unverändert, Rechts: Kalkausblühungen auf der Oberfläche der Rückseite der Laborprobe, teilweise durch die Bewitterung verkalkt

Abbildung 47

Laborprobe Glasbaustein / Floatglas links: Verfärbung an den Abstandshaltern, rechts: Vergrößerung Seitenansicht: Detail Abstandshalter Verfärbungen und die verwitterte Gußglas-Oberfläche

Abbildung 48

Übersicht der Laborproben Typ A nach Alterungstest

Abbildung 50

Grafik des Verlaufs der Abscherkraft und Dehnung des Dichtstoffes, Laborprobe Glaskeramik

Abbildung 51

Grafik des Verlaufs der Abscherkraft und Dehnung des Dichtstoffes, Laborproben: Lichtbeton beschichtet und Lichtbeton unbeschichtet

Abbildung 52

Detailplanung des Demonstrators, Aussparungen an den Steinplatten und Toogle-System Befestigung

Abbildung 53

Entwurfsplanung des Demonstrator RAICO Therm+ 50 A-I mit Glasaufbauten aus Glaskeramik

Abbildung 54

Ausführungsplanung, Werkzeichnung des Demonstrators Structural Glazing

Abbildung 55

Isometrische Darstellung der Eck-Demonstratoren in Pfosten-Riegel Konstruktion

Abbildung 56

Ausführungsplanung, Werkzeichnungen Details: oben: VG + Glaskeramik in Structural Glazing Konstruktion, mitte: VG + Lichtbeton in Pfosten-Riegel Eckkonstruktion, unten: VG + Glasbausteine in Pfosten-Riegel Eckkonstruktion

Abbildung 57

Laminierte Glasaufbauten 500 mm x 500 mm, oben: Vakuumglas + Lichtbeton, mitte: Vakuumglas + Glasbausteine, unten: Vakuumglas + Gußglas

Abbildung 58

Laminierte Glasaufbauten 500 mm x 1500 mm Vakuumglas + Glaskeramik

Abbildung 59

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Structural Glazing, Glasaufbauten 500 mm x 1500 mm Vakuumglas + Glaskeramik, Ansicht vorne: Außenansicht Wetterseite

Abbildung 60

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Structural Glazing, Glasaufbauten 500 mm x 1500 mm Vakuumglas + Glaskeramik, Ansicht hinten: Innenansicht bzw. Innenraum

Abbildung 61

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Structural Glazing, Glasaufbauten 500 mm x 1500 mm Vakuumglas + Glaskeramik, rechts: Ansicht vorne, links: Ansicht hinten

Abbildung 62

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Structural Glazing, Glasaufbauten 500 mm x 1500 mm Vakuumglas + Glaskeramik, Ansicht vorne außen: mit Schattenbild

Abbildung 63

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel, Eckausbildung, Glasaufbau VG + Lichtbeton Dunkel 500 mm x 500 mm, oben: Außenansicht, unten: Innenansicht

Abbildung 64

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel, Eckausbildung, Glasaufbau VG + Lichtbeton Hell 500 mm x 500 mm, oben: Außenansicht, unten: Innenansicht

Abbildung 65

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel, Eckausbildung, Glasaufbauten VG + Glasbausteine 500 mm x 500 mm, oben: Außenansicht, unten: Innenansicht

Abbildung 66

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel, Eckausbildung, Glasaufbauten VG + Gussglas 500 mm x 500 mm oben: Außenansicht, unten: Innenansicht

Abbildung 67

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel Eckausbildung, Glasaufbauten VG + Lichtbeton Hell und Dunkel 500 mm x 500 mm, oben: Außenansicht, unten: Innenansicht

Abbildung 68

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel Eckausbildung Glasaufbauten VG + Glasbausteine 500 mm x 500 mm, oben: Außenansicht, unten: Innenansicht

Abbildung 69

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel Eckausbildung, VG + Gussglas 500 mm x 500 mm, oben: Außenansicht, unten: Innenansicht

Abbildung 70

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel Eckausbildung paarweise, oben: VG + Gussglas / VG + Lichtbeton, mitte: VG + Lichtbeton / VG + Glasbausteine, unten: VG + Gussglas / VG + Glasbausteine

Abbildung 71

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel Eckausbildung, Konstruktions-Details, oben: Lichtbeton Glasaufbauten, mitte: VG + Glasbausteine, unten: VG + Gussglas

Abbildung 72

Demonstrator RAICO Therm+ A-I, Pfosten-Riegel untere Anschluss-Konstruktions-Details, oben: VG + Gussglas, mitte: VG + Lichtbeton, unten: VG + Glasbausteine

12.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1

Eigenschaften Vakuumglas Eagon1 u. Eagon 2, Angaben des Herstellers

Tabelle 2

Eigenschaften Vakuumglas FINEO AGC-Interpane, Angaben des Herstellers

Tabelle 3

Vakuumglas Eagon 2 und FINEO 10 im Vergleich. Angaben der Hersteller

Tabelle 4

Beurteilungskriterien ETAG 002 § 5.1.4.2.5

Tabelle 5

Eigenschaften Vakuumglas EAGON

Tabelle 6

Eigenschaften der verwendeten Materialien

Tabelle 7

Baukonstruktive Maßnahmen Kriterien und Parameter zur Untersuchung

Tabelle 8

Zusammenfassung der Abscherkraft-Werte und die Versagens-Art der unterschiedlichen Laborproben Teilprüfung Shear-Test

Tabelle 9

Kostenbeispiel aus der Praxis von Isolierverglasungen bei unterschiedlichen Ug-Werten in €/m² (2021)

Tabelle 10

Kosten von Vakuumglas der Hersteller Eagon und AGC-Interpane bei unterschiedlichen Ug-Werten in €/m² (2021)

12.5 Publikationsliste

Orange, Forschungsmagazin der FH-Dortmund, Ausgabe 01/2021

„Gebäude mit Vakuumglas energetisch sanieren“ S. 20 - 25. ISSN 1 862-4642

PowerSkin, Conference Proceedings: April 9th 2021; VG-WALL, Use of Vacuum Glas (VG) in the Implementation of Transparent and Translucent Exterior Wall System with very High Thermal Insulation. S. 93 - 108
Auer, Thomas; Knaack, Ulrich; Schneider, Jens (Hrsgg). TU-Delft Open, Delft 2021. ISBN - 10: 9463664068; ISBN - 13: 978-9463664066

Metropole Ruhr - Nachhaltige Baustoffe

<https://metropole.ruhr/en/transformation/nachhaltiges-bauen-und-wohnen/nachhaltige-baustoffe>

12.6 Veranstaltungsliste

12. Projektetage der Bauforschung, 03. - 05.06.2019, im BBSR, Bonn

15. Projektetage der Bauforschung, 29./30.06. - 01.07.2020, BBSR, Bonn

PowerSkin Conference, 09.04.2021, TU-München, München

4. Tag der Forschung, Fachhochschule Dortmund, Fachbereich Architektur 19.11.2021, Tagung und Workshop.

11. Workshop „Nachhaltige und intelligente Gebäude“, Veranstalter: Öko-Zentrum NRW, Kompetenznetzwerk Umweltwirtschaft NRW, IHK-Dortmund, 19.05.2022, im Westfälischer Industrieklub Dortmund

13 Anlage

Abschlussbericht zum Projekt Vakuumglas_WALL, Dr. Helmut Hohenstein, 15.9.2021