

Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

Technische Universität Wien
Institut für Architekturwissenschaften
Abteilung für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau
o. Univ. Prof. Dipl. Dipl.-Ing. Wolfgang Winter

**Entwicklung und Bemessung
von statisch wirksamen
Holz-Glas-Verbundkonstruktionen
zum Einsatz im Fassadenbereich**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
an der Technischen Universität Wien

betreut von
o. Univ. Prof. Dipl. Dipl.-Ing. Wolfgang Winter

eingereicht von
Dipl.-Ing. Georg Neubauer

Wien, Jänner 2011

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter an der Holzforschung Austria in Wien. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Kompetenzzentrum Holzindustrie Kind“ wurden die Experimente an den Kleinproben und den großformatigen HGV-Wandscheiben sowie den Fassadenprototypen durchgeführt.

An erster Stelle gilt mein Dank Univ.-Prof. DDI Wolfgang Winter der das Fachthema „Verklebung von Holz und Glas“ an der TU-Wien seit langer Zeit fördert. Für die kompetente Unterstützung beim Erstellen dieser Arbeit sowie bei der Begutachtung möchte ich mich herzlich bedanken.

Für die Durchführung der Zweitbegutachtung möchte ich mich bei Univ.-Prof. DI Dr.techn. Andreas Kolbitsch besonders bedanken.

Mein weiterer Dank gilt Dipl. (HTL) Ing. Peter Schober für die Realisierung der praktischen Versuche sowie seine Unterstützung – auch über meine Tätigkeit an der Holzforschung Austria hinaus.

Univ.-Prof.i.R. Dr.-Ing. Heinrich Kreuzinger sowie Prof. Dr.-Ing. Peter Niedermaier gilt mein besonderer Dank für die fruchtbaren Diskussionen und Anregungen sowie die fachliche Unterstützung.

Bei den Firmen Eckelt Glas, Otto Chemie, Sika, Gaulhofer, Hrachowina und Katzbeck bedanke ich mich für die Beteiligung an dieser Forschungsarbeit.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern Elisabeth und Bernd ohne die ich nie soweit gekommen wäre.

Bei meiner Frau Margot möchte ich mich für die eigentliche Grundlage solcher Arbeiten bedanken – Geduld, Verständnis und Rückhalt. Danke!

Kurzfassung

Die Weiterentwicklung von Klebstoffen und die daraus resultierende gleichbleibende Qualität dieser Füge­technik hat in den letzten Jahren neue Möglichkeiten der Verbindung von Holz und Glas ergeben. Ein Trend weg von der einfachen Montageklebung auf der Baustelle hin zu qualitativ hochwertigen Klebeverbindungen in der Fabrik kann z.B. in der Verklebung von Glasscheiben in Holzfenstern seit einiger Zeit bereits beobachtet werden

Den hochwertigen und homogenen Klebstoffverbindungen wurden in der Vergangenheit nur wenig statische Fähigkeiten zugetraut. So wurden Klebstoffe im Glasbau maximal zum Abtrag von Glasgewicht oder Windkräften herangezogen. Dass in dieser Füge­technik jedoch noch mehr Potential schlummert, zeigen zahlreiche vorangegangene Forschungsprojekte.

Aufbauend auf eine vorangegangene Dissertation, in welcher erfolgreich an orientierenden Versuchen gezeigt wurde, dass eine sinnvolle Anwendung von Holz-Glas-Verbundbauteilen zur Realisierung der Gebäudeaussteifung im Holzhausbau möglich ist, setzt diese Arbeit einen Schwerpunkt auf die tatsächliche Realisierung und Bemessung solcher Holz-Glas-Verbundelemente.

Der erste Abschnitt des experimentellen Teils befasst sich mit der Klebstoffverbindung selbst und untersucht zwei unterschiedliche Klebstoffarten. Es wird die Belastungsrichtung, Belastungsdauer, Geometrie der Klebefuge sowie Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf das Tragverhalten von Holz-Glas-Klebstoffverbindungen untersucht.

Weiters wird das im Vorgängerprojekt entwickelte Prototypen-Tragsystem in ein bauphysikalisch funktionsfähiges Fassadensystem übergeführt wobei nicht nur Aspekte der Luft- und Schlagregendichtheit, Widerstand gegen Windbelastungen und Differenzklimaten untersucht werden sondern auch eine Optimierung der Produktions- und Montagetechnik durchgeführt wird.

Anschließend wird die statische Leistungsfähigkeit an zahlreichen Großelementen durch Wandscheibenuntersuchungen ermittelt und gibt Auskunft über lokale und globale Verformungen im System unter Belastung sowie der Versagensart.

Im theoretischen Teil der Arbeit werden zwei Rechenmodelle (analytisch und numerisch) gegenübergestellt um eine Prognose der Tragfähigkeit und Verformbarkeit von Holz-Glas-Verbundelementen zu ermöglichen. Durch die gesammelten Grundlagen aus dem experimentellen Teilen der Arbeit wird ein mögliches Bemessungskonzept erarbeitet.

Anhand von typischen Gebäudegeometrien des Einfamilienhausbaus wird das Bemessungskonzept angewendet und eine Einsetzbarkeit von HGV-Elementen zur Übertragung von Lasten aus dem Gebäude evaluiert.

Im Abschluss der Arbeit werden die gewonnenen Erkenntnisse an Hand von realen Prototypen-Bauwerken umgesetzt und bilden die Grundlage für die Serienfertigung von HGV-Elementen sowie die Möglichkeit eines längerfristigen Monitorings von Holz-Glas-Verbundelementen.

Abstract

In the last years new possibilities of connecting wood and glass have arisen due to the further development of adhesives and the resultant high quality of this joining technology. The trend has moved on from the simple in-site-gluing to high quality in-plant-gluing. One has been able to observe this trend for quite a while, for example, in the bonding of glass panes in wooden-framed windows.

In the past, high-quality, homogenous adhesives were thought to have little statically strengths. Thus, adhesives in glass constructions were mainly used for the load transmission of the weight of the glass or the wind impact. On the contrary, it can now be seen that this joining technology shows much more potential, as already proved in numerous, previous publications.

This paper is based on a preceding project which showed in first-cut experiments that the use of wood-glass-compounds to stiffen wooden frame-houses makes sense. In this publication we will emphasize the actual realization and dimensioning of such wood-glass-compounds.

The experimental part of this paper deals with the glue connection itself by investigating two different glue types. The load direction, load duration and geometry of the gluing joint are investigated, as well as the consequences of environmental influences on the load bearing behavior of glued wood-glass-connections.

Furthermore, the development of a functional façade-system in building physics is done, based on the prototype structural system already developed in the preceding project. For this one investigated several aspects as, for instance resistance to air flow, driving rain, wind load and climate differences. An optimization of production and assembling technology is done.

The static resistance of numerous large specimens is investigated via fracture test, showing local and global deformations in the system under stress, as well as the type of collapse.

Two models (analytic und numerical) are calculated and compared in the theoretical part of the paper to predict the load bearing capacity and the deformation of wood-glass-compounds. A concept for the dimensioning is elaborated using the data collected in the experimental part of the paper.

The design concept is applied to the geometry of a typical single-family house, and the use of wood-glass-compounds to bear loads out of the building is evaluated.

The conclusions gathered are then applied to real prototype buildings. They are the basis for serial production of wood-glass-compounds, offering the possibility for long-term monitoring.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	3
Kurzfassung	5
Abstract.....	7
Inhaltsverzeichnis.....	9
1 Einleitung	13
1.1 Problemstellung	13
1.2 Zielsetzung.....	15
1.3 Abgrenzung.....	17
2 Stand der Technik	19
2.1 Fügepartner des Verbundbauteils	19
2.1.1 Holz.....	19
2.1.2 Glas	21
2.1.3 Klebstoff	24
2.2 Kleben im Holzbau	26
2.2.1 Starres Kleben im Holzbau.....	26
2.2.2 Elastisches Kleben im Holzbau	27
2.2.3 Status Quo im elastischen Klebeverbund	28
2.3 Lastabtragung im Hochbau	30
2.4 Aussteifende Wandscheiben in Holz-Glas-Verbundbauweise	32
2.4.1 Arbeit von HAMM	32
2.4.2 Arbeit von NIEDERMAIER	33
2.4.3 Arbeit von EDL.....	34
3 Struktur der Forschungsarbeit	36

4	Experimentelle Untersuchungen.....	38
4.1	Leistungsfähigkeit der Klebstoffuge.....	38
4.1.1	Methodik	38
4.1.1.1	Belastungsrichtungen der Klebstoffuge	39
4.1.1.2	Belastungsdauer der Klebstoffuge.....	39
4.1.1.3	Geometrie der Klebefuge	42
4.1.1.4	Umwelteinflüsse	43
4.1.2	Ergebnisse	43
4.1.2.1	Silikon A.....	43
4.1.2.2	Silikon B.....	60
4.1.2.3	Acrylat.....	71
4.1.2.4	Zusammenfassung.....	86
4.2	Optimierung der Prototypenentwicklung.....	91
4.2.1	Methodik	91
4.2.1.1	Luftdurchlässigkeit	93
4.2.1.2	Schlagregendichtheit.....	94
4.2.1.3	Windwiderstand.....	94
4.2.1.4	Differenzklima	94
4.2.2	Ergebnisse	95
4.2.2.1	Fassadenprototypen	95
4.2.2.2	Leistungsfähigkeit der Fassadenkomponenten / Zusammenfassung.....	140
4.2.2.3	Koppelleiste aus Alternativmaterialien.....	142
4.3	Ermittlung der statischen Leistungsfähigkeit von HGV-Elementen	152
4.3.1	Methodik	152
4.3.1.1	Herstellung der HGV-Elemente	152
4.3.1.2	Untersuchungsmethode am Großelement.....	154
4.3.2	Ergebnisse	161
4.3.2.1	Silikon A.....	161
4.3.2.2	Acrylat.....	167
4.3.2.3	Zusammenfassung.....	169

5	Bemessungsmodelle zur Prognose der Tragfähigkeit und Verformbarkeit.....	170
5.1	Methodik	170
5.2	Ergebnisse	171
5.2.1	Rechenmodelle zur Prognose der Spannungen und Verformungen im Wandscheibenelement.....	172
5.2.1.1	Numerisches Modell nach Finite Elemente Methode.....	172
5.2.1.2	Analytisches Modell (statisch unbestimmtes Federmodell) nach Kreuzinger / Niedermaier	180
5.2.1.3	Vergleich der beiden Rechenmodelle.....	184
5.2.1.4	Vergleich mit den realen Wandscheibenuntersuchungen	184
5.2.1.5	Bemessungsvorschlag	185
5.2.1.6	Musterstatiken.....	192
5.2.1.7	Vergleich der Klebstoffe mit den Musterstatiken.....	200
6	Technische Umsetzung.....	203
6.1	Forschungsgebäude Arsenalgelände	204
6.2	Einfamilienhaus Eichgraben	208
7	Resumée und Ausblick.....	222
7.1	Resumée.....	222
7.2	Ausblick.....	225
8	Verzeichnisse	226
8.1	Literaturverzeichnis	226
8.2	Tabellenverzeichnis.....	229
8.3	Abbildungsverzeichnis.....	230
8.4	Diagrammverzeichnis.....	234
	Curriculum Vitae.....	237

1 Einleitung

1.1 **Problemstellung**

Die aktuelle Diskussion um den Klimawandel und die damit verbundene, notwendige Reduktion von CO₂-Emissionen fordert vor allem bei der Konzeption von modernen Gebäuden ein Umdenken im Umgang mit den primären Energieträgern.

Der Einsatz von Glas in der Gebäudehülle bietet hier eine einzigartige Eigenschaft. Durch die selektive Transparenz können große solare Wärmegevinne erzielt werden, welche einen großen Anteil an der Energiebilanz eines Gebäudes ausmachen [FRA]. Moderne Passivhäuser machen sich diesen „Glashauseffekt“ zu Nutze und benötigen außer der solaren Energiezufuhr durch die großen Glasflächen kein konventionelles Heizsystem mit fossilen Energieträgern mehr [OIB2].

Weiters entspricht der Einsatz transparenter Gebäudehüllen dem momentanen Zeitgeist der Architektur. Ganze Hausfronten sollen durchsichtig gestaltet werden, um die Wohnräume mehr und mehr mit deren Umfeld verschmelzen zu lassen.

Die großen Glasflächen führen unter anderem auch zu technischen Herausforderungen im Bereich des Tragverhaltens eines Gebäudes. Wandbauteile sind in einem Gebäude nicht nur für die Ableitung vertikaler Kräfte wie zum Beispiel Eigengewicht, Nutzlasten und Schnee verantwortlich, sie gewährleisten auch die Stabilität des Gebäudes gegen horizontale Einwirkungen wie zum Beispiel Wind und Erdbebenlasten. Wird eine Wand über weite Teile oder gar zur Gänze durch eine Glasfassade ersetzt, so können vertikale Lasten über Unterzüge und Stützensysteme abgetragen werden. Eine gebäudeaussteifende Wirkung zum Abtragen von Horizontalkräften ist jedoch nicht mehr gegeben. Entfällt so eine gesamte Gebäudeseite, so entsteht eine ungünstige Exzentrizität zwischen Scheibenschwerpunkt und resultierendem Windangriff, was zusätzliche Torsionsbeanspruchungen auf die verbleibenden Wandscheiben bewirkt.

Sollen verglaste Gebäudefronten noch eine Gebäudeaussteifung übernehmen, so entstehen aufwendige und teure Konstruktionen aus biegesteifen Rahmenkonstruktionen oder sichtbaren Lösungen mit optischer Beeinträchtigung wie zum Beispiel Windrispen.

Geklebte Glasfassaden werden bereits seit langer Zeit eingesetzt und entsprechen dem Stand der Technik [OIB1]. Bei diesen Lösungen übernimmt das Glas jedoch keine statisch tragende Funktion im Gebäude, sondern dient lediglich als Gebäudehülle.

Der Schluss liegt nahe, dem hochwertigen Werkstoff Glas eine tragende Funktion im Gebäude zuzusprechen und die Scheibentragwirkung der Glasfassaden zur Gebäudeaussteifung zu nutzen. Glas weist eine hohe Druckfestigkeit bei gleichzeitiger Sprödigkeit und geringer Zugfestigkeit auf [THI]. Die Glasscheiben müssen also auf eine schonende Art und Weise mit dem Gebäude verbunden werden um Spannungsspitzen zu

vermeiden und eine gleichmäßige Kräfteinleitung von der Gebäudetragsstruktur in die Glasscheibe und umgekehrt zu gewährleisten. Nur so kann die hohe Leistungsfähigkeit des Glases genutzt werden.

In der Vergangenheit haben sich bereits Forschungsprojekte mit der Aktivierung der Scheibentragfähigkeit von Glas beschäftigt. So wurden Grundlagen für die Wandscheibe aus Glas und den Biegeträger mit Glassteg durch Hamm [HAM], Kreher [KREH], Niedermaier [NIE], Weinand [WEI] sowie Edl [EDL] erarbeitet. Wichtige Grundlagen wurden hierbei geschaffen und einzelne Prototypen-Gebäude konnten daraus resultieren.

Die vorangegangenen Projekte zeigen, dass mittels umlaufender Verklebung der Glasscheibe ein schonender Lasteintrag in diese erreicht werden kann, um die Leistungsfähigkeit des Glassubstrates hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit optimal zu nutzen. Im HFA-Vorgängerprojekt [SCH] wurde ein Tragsystem entwickelt, in welchem eine umlaufende Koppelleiste auf alle vier Glasränder geklebt wird. Die Verklebung kann hochqualitativ im Werk geschehen. Die Koppelleiste wird dann vor Ort in die Tragstruktur verschraubt (siehe Abbildung 1). Das Scheibensystem ist damit austauschbar. Die Koppelleiste kann mit einer Verzahnung ausgeführt werden, um eine schmalere Ansichtsbreite zwischen zwei Glasscheiben zu ermöglichen [HFA1].

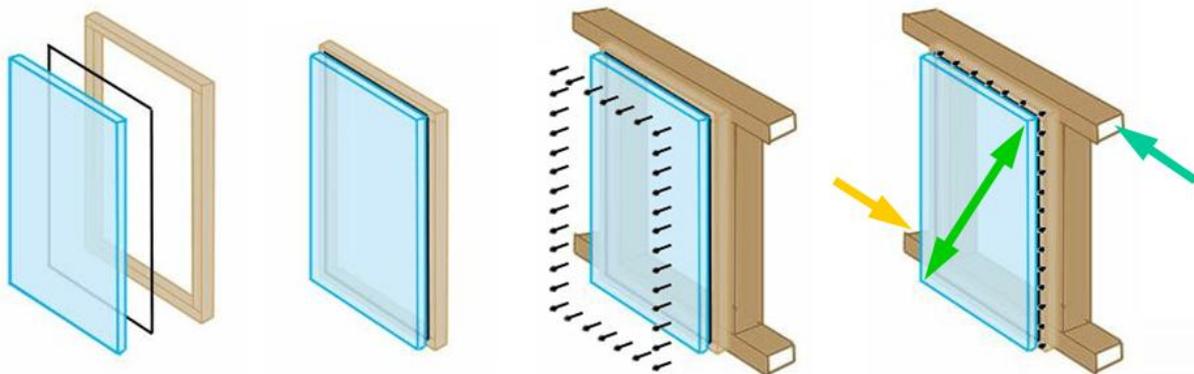


Abbildung 1: Grundprinzip des, von der HFA entwickelten, Holz-Glas-Verbundelements zur Gebäudeaussteifung

Zur Entwicklung eines serienreifen Tragsystems sind jedoch Fragestellungen wie die Beurteilung der Robustheit, Verhalten unter Langzeitbelastung aber auch die rechnerische Prognose der Tragfähigkeit und Verformbarkeit solcher Tragsysteme von wesentlicher Bedeutung, damit eine wirtschaftliche Nutzung gewährleistet wird. Des Weiteren müssen die bauphysikalischen Randbedingungen untersucht werden, um die Grundlagen für die Nutzbarkeit von Holz-Glas-Verbundelementen (kurz: HGV-Elementen) als Außenwandkonstruktionen zu schaffen.

1.2 Zielsetzung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „Kompetenzzentrum Holzindustrie Kind“. An der Holzforschung Austria wurden die Experimente an den Kleinproben und den großformatigen HGV-Wandscheiben sowie den Fassadenprototypen durchgeführt.

Aufbauend auf den Ergebnissen des Vorgängerprojekts [SCH] soll ein praktisch anwendbares, statisch berechenbares, wirtschaftlich herstell- und montierbares, baurechtlich vertretbares Wandscheiben-Element aus Holz und Glas im statisch wirksamen Verbund durch Verklebung entwickelt werden.

Voraussetzung zum Erreichen dieser Ziele ist die Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen in folgenden Kerngebieten:

- **Erarbeitung experimenteller Grundlagen**
 - **Leistungsfähigkeit der Klebstoffuge**

Anhand von Untersuchungen an **Kleinproben** (Verbindung Glas – Klebstoff – Holzsubstrat) sollen Erkenntnisse über das Verhalten der untersuchten Klebstoffe im Hinblick auf **Dauerlasten, zyklischen Belastungen, Temperatur- und Feuchteinfluss** auf das Tragverhalten gewonnen werden. Die dabei untersuchten Faktoren sollen in das in dieser Arbeit entwickelte Bemessungsmodell eingearbeitet werden.
 - **Optimierung des HGV-Systems** (Bauphysik und Fassadentechnik)

Für die dauerhafte Funktion eines statisch tragfähigen Systems, das gleichzeitig die **Außenhülle** eines Gebäudes darstellt, ist es unerlässlich das **bauphysikalische Verhalten** im Hinblick auf Luftdurchlässigkeit, Schlagregendichtheit, Verhalten unter Windsog und –druck sowie Differenzklimaten an Außen- und Innenseite zu untersuchen. Einzelne Komponenten des HGV-Systems (Beschichtungen, Dichtungen,...) sollen im Projekt variiert werden um das bauphysikalische Verhalten zu optimieren.
 - **Ermittlung der statischen Leistungsfähigkeit** von HGV-Elementen

Die **Tragfähigkeit und Verformbarkeit** von HGV-Elementen ist von primärem Interesse. Als Grundlage einer rechnerischen Prognose der Traglast ist es dabei notwendig, eine Charakterisierung des **Verbundelementversagens** durchzuführen. Für die Aufstellung einer **Bruchhypothese** ist die Festlegung in welchem Fügepartner (Holz, Glas oder Klebstoff) der Bruch stattfindet unumgänglich. Die Untersuchungen am Großelement (1:1-Versuche) geben Aufschluss über die Verformbarkeit und das Tragverhalten des **Verbundtragsystems** und bieten eine Möglichkeit für die **Kalibrierung** des in dieser Arbeit entwickelten Bemessungsmodells.

- **Entwicklung eines Bemessungsmodells**

Zur **rechnerischen Prognose** der **Verformbarkeit** und **Traglast** von HGV-Elementen ist es erforderlich, ein Rechenmodell zu entwickeln um mit ausreichender Sicherheit eine Bemessung von HGV-Elementen unterschiedlicher Dimension möglich zu machen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wird ein eigens entwickeltes **numerisches Rechenverfahren** nach FE-Methode sowie ein bestehendes **analytisches Modell** (Federmodell) [KREU] auf Eignung untersucht.

- **Technische Umsetzung**

Für den Praxiseinsatz der HGV-Elemente im Holzhausbau sind mehrere Schritte notwendig.

Im Vorfeld wird eine Recherche der momentan gültigen **baurechtlichen Bestimmungen** durchgeführt um den Anforderungen wie den mechanischen Abtrag des Eigengewichts der Glasscheibe oder der Sicherung der Glasscheibe gegen Herausfallen Genüge zu tun. Detaillösungen wurden planerisch berücksichtigt und fanden in ausgewählten Prototypenbauwerken ihre Anwendung.

Für die **Herstellung und Montage** wird eine Ablaufplanung entworfen, welche auch bei der Realisierung von Prototypenbauwerken zum Einsatz kommen soll und dabei qualitativ beurteilt wird.

Es werden mehrere **Detaillösungen** entwickelt, um die bautechnisch richtige Anbindung des HGV-Systems an angrenzende Bauteile zu gewährleisten.

Der finale Schritt des Projekts ist die Suche nach geeigneten Bauwerken zum Einbau von Prototypen-HGV-Elementen zur Implementierung der Forschungsergebnisse. Mehrere Gebäude sollen evaluiert werden und bei einem oder mehreren geeigneten Bauwerken soll das HGV-Fassadensystem unter Mitarbeit der im Projekt beteiligten Wirtschaftspartner zum **Praxiseinsatz** kommen.

Die gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse sollen es ermöglichen, der Wirtschaft ein Werkzeug für eine beginnende Serienproduktion von tragenden Holz-Glas-Fassaden zur Verfügung zu stellen sowie **einzelne Prototypengebäude** im Rahmen des Projekts zu errichten.

1.3 Abgrenzung

Elastische Klebstoffe zeigen ein sehr weiches Verformungsverhalten und niedrige Bruchfestigkeiten auf. Bereits in vorangegangenen Forschungsprojekten ([NIE], [SCH]) wurde daher bei elastischen Klebstoffen immer der Klebstoff als versagendes Glied im Verbundtragverhalten des HGV-Elements beobachtet. Auch trägt dieser einen Großteil zu den im Element entstehenden Verformungen zufolge Krafteinwirkung bei. Die Arbeit setzt ihr Hauptaugenmerk daher auf die **Klebstoffuge** und deren **Bruch- und Verformungsverhalten**, da das Glas- und Holzsubstrat nicht als limitierender Faktor hinsichtlich des Bruchverhaltens angesehen wird. Untersuchungen an steiferen Klebstoffsystemen zeigen einen deutlichen Anstieg der Belastungen der beiden weiteren Fügepartner (Holz und Glas) und wäre dann eine verzweigte Betrachtung unterschiedlichster komplexer Versagensmechanismen erforderlich, ([HAM], [KREH], [WEI]) auf welche in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird. Auf die Bemessung der Glasscheibe wird in dieser Arbeit daher nicht näher eingegangen und ist die Bemessung des Holzsubstrates bereits ausreichend erforscht [EC5-1-1].

Auch in vorangegangenen Forschungsprojekten [NIE] wurden bereits Untersuchungen im Hinblick auf die **Resttragfähigkeit des Tragsystems nach Glasbruch** durchgeführt jedoch sind diese nicht Inhalt dieser Arbeit.

Die Untersuchungen an HGV-Elementen beschränken sich weiters auf Wandscheiben mit normalem Breiten - Höhenverhältnis (1 : 2 bis 2 : 1). Schlanke, hohe Wandscheiben („**eingespannter Biegeträger**“) sind Sonderfälle und sollen in weiterführenden Forschungsprojekten untersucht werden.

Zum Thema Qualitätssicherung bei der **Herstellung von Klebeverbindungen** sind bereits wichtige Forschungsprojekte durchgeführt worden ([OIB1], [HFA2]). Obwohl die Herstellung der Klebeverbindung über die Tragfähigkeit des Gesamtsystems entscheidet, wird hier nicht näher darauf eingegangen.

2 Stand der Technik

2.1 Fügepartner des Verbundbauteils

2.1.1 Holz

Holzarten

Nadelholz

Nadelhölzer besitzen **zwei Zellarten**:

Tracheiden: Diese bilden einen großen Anteil der Holzsubstanz und sind langgestreckte (prosenchymatische) Zellen, welche mit Luft oder Wasser gefüllt sind. Sie übernehmen eine Leitungs- und Festigungsfunktion.

Parenchymzellen: Diese übernehmen die Leitung von Nähr- und Wuchsstoffen sowie die Speicherung von Stärke und Fetten und haben eine rechteckige Zellform.

Verwendung: Nadelhölzer bilden in Österreich den Großteil des Bauholzes. Die weite Verbreitung von Fichtenholz in Österreich macht dieses zur primären Quelle für Konstruktionsholz. Für die Verwendung von Hölzern größerer Dauerhaftigkeit wird in Österreich vorwiegend Lärchenholz eingesetzt.

Laubholz

Das Laubholzgewebe kann in **drei funktionale Gruppen** eingeteilt werden:

- Leitgewebe: Gefäße (Tracheen), Gefäßtracheiden, vasizentrische Tracheiden. Die beiden letzteren sind Zwischenstufen in der Entwicklung von der Tracheide zum Gefäß.
- Festigungsgewebe: Libroformfasern, Fasertracheiden
- Speichergewebe: Holzstrahlenparenchymzellen, Längsparenchymzellen, Epithelzellen

Charakteristisch für Laubhölzer sind die in Nadelhölzern nicht vorhandenen Gefäße. Sie sind oft mit bloßem Auge als kleine Poren im Holzquerschnitt und als Rillen im Tangentialschnitt zu erkennen.

Verwendung: Durch seine geringere Verbreitung von Laubhölzern in Österreich wird das Holz vorwiegend auf Grund seiner optischen Beschaffenheit für die Möbel- und Plattenindustrie und nicht für tragende Baukonstruktionen eingesetzt. Durch die steigende Nachfrage von Konstruktionsholz in den letzten Jahren wird jedoch auf Grund seines geraden Wuchses auch Buchenholz als Brettschichtholz für Baukonstruktionen eingesetzt.

Tropenholz

Der Begriff „Tropenholz“ ist durch die Herkunft des Holzes definiert und steht daher außerhalb der Pflanzensystematik. Es handelt sich hierbei jedoch vorwiegend um Laubholzarten tropischer Herkunft, die sich oft durch **vorteilhafte mechanische Eigenschaften** und erhöhte Dauerhaftigkeit auszeichnen. Eine Verwendung von Tropenholz ist durch die **Abholzung von Urwäldern** und dem **weiten Transportweg** auf Grund der immer intensiver werdenden Diskussion über den Klimaschutz sehr zu hinterfragen.

Technologische Eigenschaften

Eigenschaften

Holz ist ein Naturwerkstoff und daher in seiner Beschaffenheit und seinem Wuchs stark von seiner **geographischen Herkunft** abhängig. So zeigt dieselbe Holzart aus sehr kalten Regionen durch ihren langsameren Wuchs und die dadurch entstehende höhere Dichte beispielsweise andere Eigenschaften als aus Ländern mit günstigeren Wuchsbedingungen.

In erster Linie wird jedoch Holz durch seine **Porosität**, **Anisotropie** und seine **Hygroskopizität** charakterisiert.

Hygroskopische Eigenschaften

Holz neigt dazu, **Feuchtigkeit** aus der Umgebung aufzunehmen. Die Holzfeuchtigkeit steht in Wechselwirkung mit der Luftfeuchtigkeit (**Ausgleichsfeuchte**) aber auch etwaiger Aufnahme von Flüssigwasser (vor allem über das **Hirnholz**). Feuchteänderungen bewirken im Holzsubstrat vor allem quer zur Faserrichtung starke Formschwankungen (**Quellung** und **Schwindung**).

Ein richtiges Konstruieren von Bauteilen zur **Vermeidung zu großer Holzfeuchtegehalte** ist aber vor allem im Hinblick auf die **Dauerhaftigkeit** der Holzsubstrats unumgänglich, da bei Holzfeuchtegehalten über 18 % längerfristig bereits der biologische Zerfall durch **Pilze** und **Bakterien** einsetzt.

Anisotropie

Die meisten Holzeigenschaften unterscheiden sich in den drei anatomischen Grundrichtungen des Holzes (axial, radial, tangential). Dieser Effekt zeigt großen Einfluss auf das **Schwind-** und **Quellverhalten** aber auch auf die **Festigkeiten** und das **Verformungsverhalten**. Diesem Umstand wird bei der Bemessung von Holzkonstruktionen Rechnung getragen [EC5-1-1], [EC5-1-1b].

Zeitabhängiges Verhalten

Holz ist ein **viskoelastischer Werkstoff** und seine elastomechanischen Eigenschaften unterliegen daher dem **Zeiteinfluss**. Dieser Effekt (das sogenannte „**Kriechen**“) wird bei der Bemessung von Holzkonstruktionen durch die Einführung von Beiwerten für die **Verformbarkeit** und **Widerstand** (k_{def} , k_{mod}) berücksichtigt [EC5-1-1], [EC5-1-1b].

Thermische Eigenschaften

Holz ist aufgrund seiner **Porosität** sehr gut wärmedämmend was seinen Einsatz im Bereich von Außenwänden gegenüber anderen Materialien (z.B. Beton oder Stahl) stark begünstigt.

Weiters ist die Längenmodifikation auf Grund von **Temperaturänderungen** im Vergleich zu Metallen und Kunststoffen ebenfalls wesentlich geringer, was in Konstruktionen deutlich weniger thermische Zwängungen einbringt.

2.1.2 Glas

Bestandteile

Glas ist eine amorphe Substanz die durch Schmelzen erzeugt wird. Die Erstarrung erfolgt dabei so schnell, dass kein Kristallisationsprozess stattfinden kann.

Der Transformationsbereich zwischen Schmelze und Feststoff liegt bei den meisten Glasarten bei ca. 600 °C. Die Dichte von Kalk-Natronglas, das ca. 90 % der gesamten Glasproduktion ausmacht, liegt etwa bei 2.500 kg / m³ und wird aus folgenden Bestandteilen zusammengesetzt [EDL]:

- **Quarzsand** als fast reiner SiO₂-Träger zur Netzwerkbildung. Wichtig ist, dass der Sand einen geringen (<0,05 %) Anteil an Fe₂O₃ besitzt, da sonst bei Weißglas störende Grünfärbungen auftreten.
- **Soda** (Na₂CO₃) dient als Natriumoxydträger, das als Netzwerkwandler und Flussmittel dient und den Schmelzpunkt des SiO₂ senkt. In der Schmelze wird Kohlensäure frei und löst sich als Gas aus dem Glas. Natrium kann auch als Nitrat oder Sulfat der Schmelze zugeführt werden.
- **Pottasche** (K₂CO₃) liefert Kaliumoxid für die Schmelze, das wie Natriumoxid als Netzwerkwandler und Flussmittel dient.
- **Feldspat** (NaAlSi₂O₈) trägt neben SiO₂ und Na₂O Tonerde (Al₂O₃) in das Gemenge ein. Diese führt zu einer Erhöhung der Glashärte.
- **Kalk** dient als Netzwerkwandler und erhöht die Festigkeit der Gläser. Reines CaO hat einen zu hohen Schmelzpunkt, so dass CaCO₃ eingesetzt wird. Bei der Schmelze wandelt es sich zu Kohlendioxid und Kalziumoxid. CaO erhöht in mäßiger Zugabe (10-15%) die Härte.
- **Dolomit** ist ein Träger für CaO und MgO. Magnesiumoxid hat ähnliche Eigenschaften wie Kalziumoxid auf die Schmelze.
- **Altglas** oder Eigenscherben aus dem Produktionsbruch werden ebenfalls dem Rohstoffgemenge beigefügt, Altglas aus dem Glasrecycling allerdings nur in der Behälterglasindustrie, wo ihr Anteil bis über 90 % betragen kann. Neben eingespartem Rohstoff macht sich dies im geringeren Energieverbrauch bemerkbar, da Scherben leichter schmelzen als das Rohstoffgemenge. Probleme beim Altglasrecycling sind eine schlechte Farbtrennung, Fremdbestandteile wie Metalle, Keramik oder Spezialgläser. Die Fremdstoffe verursachen Glasfehler durch nicht vollständiges Aufschmelzen und Schäden in der Glasschmelzwanne, da sich Metalle in den feuerfesten Boden einfressen.
- Für Spezialgläser kommen auch **Mennige**, **Borax**, **Bariumkarbonat** und andere seltene Erden zum Einsatz.

Glastypen

Entsprechend den Endprodukten der Flachglasherstellung kann eine Einteilung in folgende Glastypen erfolgen:

Floatglas:

Beim Floatglasverfahren wird das Glas kontinuierlich über ein Zinnbad laufen gelassen und damit planparallele Fläche erreicht. Das Verfahren wird seit 1966 industriell angewandt und liefert derzeit etwa 95 % des gesamten Flachglases aller Anwendungsbereiche wie Fensterglas, Autoscheiben und Spiegel.

Vorgespanntes Glas:

Einscheiben-Sicherheitsglas (**ESG**) besteht aus einer Glasscheibe und bietet eine erhöhte Beständigkeit gegen Temperaturwechsel sowie eine hohe Biege-, Schlag- und Stoßfestigkeit. Im Bruchfall zerfällt ESG in kleine, lose zusammenhängende Bruchstücke und weist dadurch eine geringe Verletzungsgefahr auf.

Die erhöhten Festigkeiten entstehen durch den Vorspannprozess. Dabei wird Floatglas im Vorspannofen unter ständiger Bewegung auf knapp 620 °C erhitzt und anschließend mit kalter Luft abgeschreckt. Beim Abkühlen erkalten die Oberflächen schneller als die Kernzone, wodurch sich im Glas Zonen unterschiedlicher Spannung ausbilden, die dem Glas seine charakteristischen Eigenschaften verleihen. Betrachtet man eine Querschnitt durch ein ESG-Glas, so sind die beiden Oberflächen unter Druckspannung, der Kern unter Zugspannung. Da Glas höhere Druckfestigkeit als Zugfestigkeit besitzt werden die physikalischen Eigenschaften durch den Vorspannprozess stark verbessert.



Abbildung 2:
Handtucheffect
bei VSG aus ESG

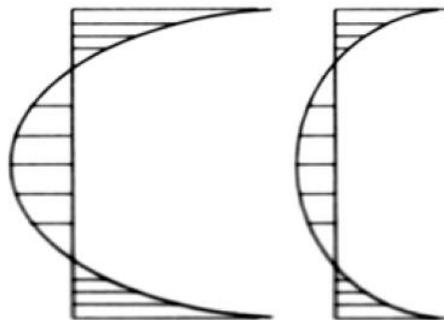


Abbildung 3: Spannungsverteilung über die Glasscheibendicke von ESG (li.) und TVG (re.) [EDL]

Teilvorgespanntes Glas:

Das Herstellungsprinzip des teilvorgespannten Glases (**TVG**) entspricht dem des vorgespannten Glases wobei das Glas nicht so schnell abgekühlt wird wie bei der ESG-Herstellung. Die vorgespannte Oberfläche ist nicht so stark ausgeprägt wie beim ESG (Abbildung 3) und die Festigkeitseigenschaften liegen daher zwischen der von Floatglas und ESG.

Einen großen Vorteil bietet TVG gegenüber ESG als Verbundglas. Durch die größeren Bruchstücke bietet sich eine wesentlich größere Resttragfähigkeit der gebrochenen Glasscheibe. Der sogenannte „Handtucheffect“ (Abbildung 2), bei dem die VSG-ESG-Bruchstücke an der Verbundfolie klebend in einem Stück wie ein Handtuch zu Boden stürzen können wird weitgehend vermieden. Deshalb ist diese Form von Verbundglas in vielen Ländern für Überkopfverglasungen verpflichtend vorgeschrieben.

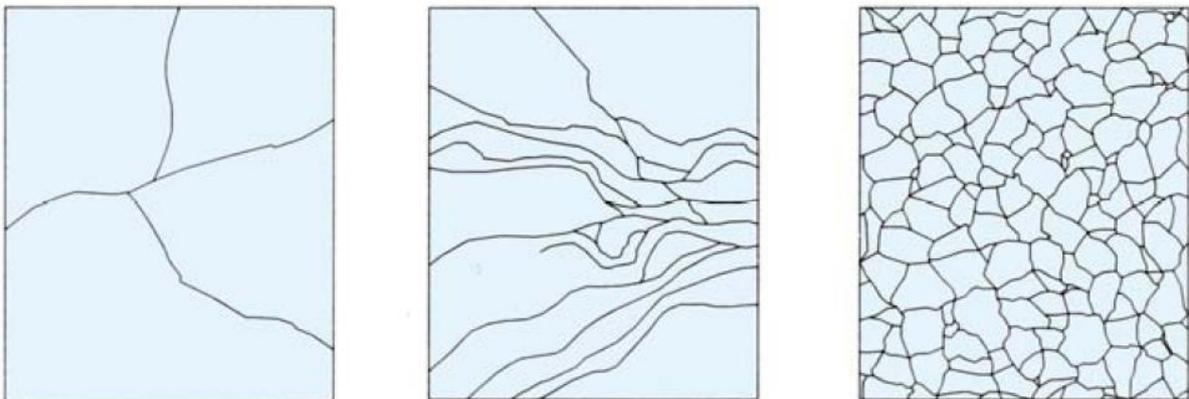


Abbildung 4: Bruchbild von Floatglas, TVG und ESG [EDL]

Verbundsicherheitsglas:

Verbundsicherheitsglas (**VSG**) ist der Sammelbegriff für ein Laminat mit mindestens zwei Glasscheiben, die durch eine klebfähige Zwischenschicht aus Kunststoff, z. B. durch ein Gießharz oder eine hochreißfeste, zähelastische, thermoplastische Verbundfolie, verbunden sind. Haupt-Anwendungsgebiete im Bauwesen sind Überkopfverglasungen oder absturzsichernde Verglasungen wobei als Verbundfolie meistens Polyvinylbutyral (PVB) eingesetzt wird.

Weitere optische Akzente lassen sich durch gefärbte Folien und neuerdings leuchtende oder semi-transparente Verbundmaterialien erreichen.

2.1.3 Klebstoff

Einteilung

Eine Einteilung von Klebstoffen kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. An dieser Stelle sollen die beiden wesentlichen Ordnungssysteme der Klebstoffeinteilung dargestellt werden. [HAB]

Einteilung nach der chemischen Basis:

Es kann zwischen Klebstoffen auf Basis organischer und anorganischer Verbindungen unterschieden werden, wobei die organische Klebstoffgruppe weitaus größer ist. Diese Gruppe kann weiters in Klebstoffe auf natürlicher oder künstlicher Basis aufgeteilt werden. Für Silikonklebstoffe besteht eine Mischform, da diese sowohl Verbindungen mit organischen und anorganischen Merkmalen aufweisen.

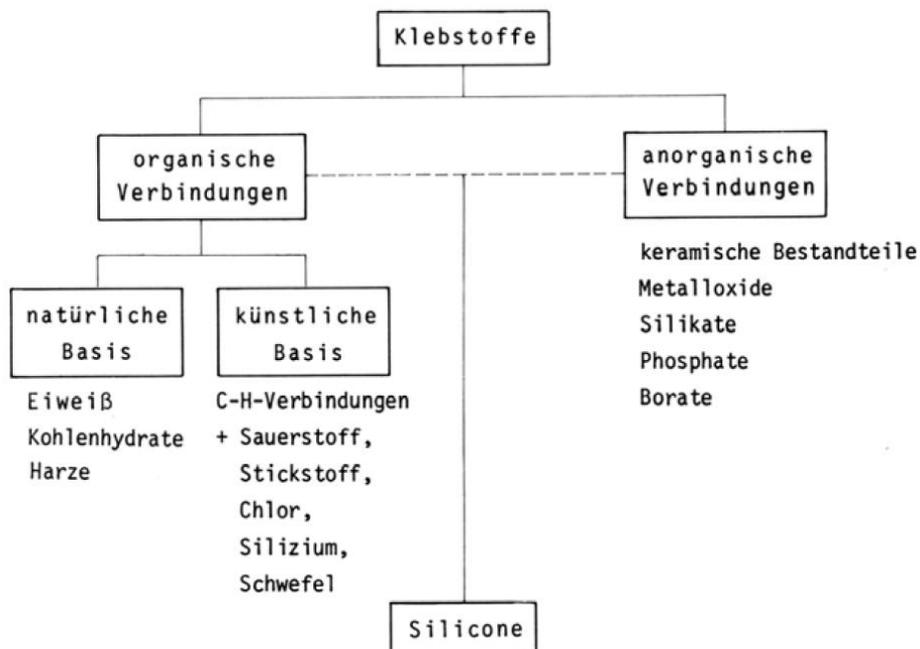


Abbildung 5: Einteilung nach der chemischen Basis [HAB]

Nach Habenicht [HAB] kann innerhalb der organischen Verbindungen auf Grund der Klebefestigkeiten und Alterungsbeständigkeiten unterschieden werden. Klebstoffe auf künstlicher Basis erreichen deutlich höhere Werte.

Ein Unterschied zwischen organischen und anorganischen Klebstoffen ist die Verarbeitungs- und Anwendungstemperatur, die bei organischen Klebstoffen deutlich geringer ist.

Einteilung nach dem Abbinde Mechanismus:

Die Einteilung erfolgt nach dem Molekülzustand zu Beginn des Klebens.

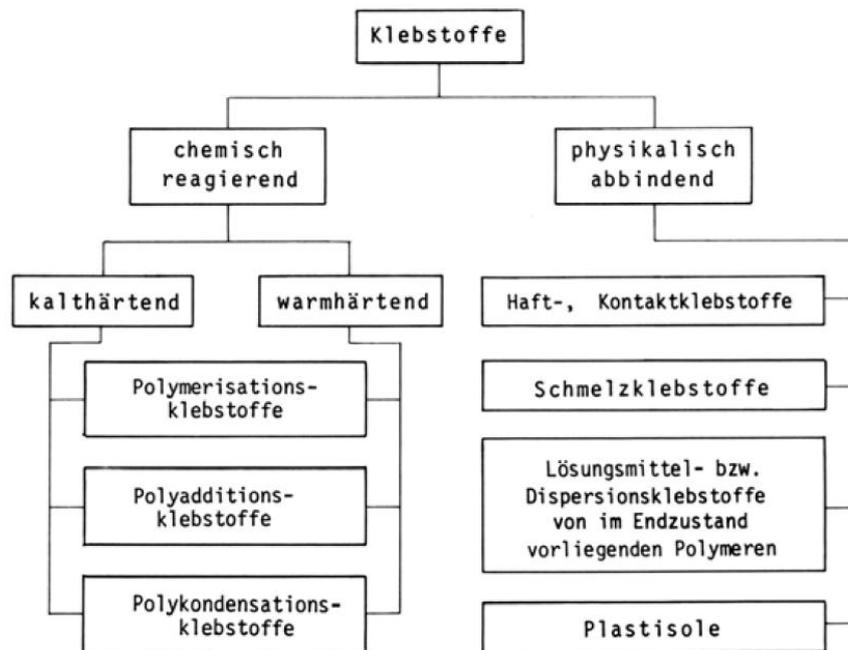


Abbildung 6: Einteilung nach dem Abbinde Mechanismus [HAB]

Bei chemisch reagierenden Systemen verbinden sich reaktionsbereite Monomer- bzw. Prepolymere auf chemischer Basis zu einer polymeren Klebeschicht. Diese Reaktion kann zeit- und/oder temperaturabhängig verlaufen.

Bei physikalisch abbindenden Systemen sind bereits fertige Polymerverbindungen vorhanden. Die Verbindung dieser Moleküle findet nicht durch chemische Reaktionen sondern durch Adhäsion statt. Die Adhäsion wird beispielsweise durch Lösungsmittel oder einer Erhöhung der Klebstofftemperatur erreicht.

Klebstofftypen

Auf Grund der Vielzahl an Klebstofftypen werden an dieser Stelle nur die beiden thematisch relevanten Klebstoffe angeführt.

Silikon-Klebstoffe [EDL]

Silikone sind höhermolekulare Verbindungen, denen ein alternierend aus Silizium und Sauerstoffatomen aufgebautes dreidimensionales Gerüst zu Grunde liegt. Für Klebstoffsysteme werden Prepolymere (im Vorstadium zu einem richtigen Polymer) eingesetzt, deren Kettenenden durch funktionelle Gruppen so gestaltet sind, dass sie unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit (Einkomponenten-Systeme) oder durch chemischer Reaktion zweier Komponenten (Zweikomponenten-Systeme) zu einem hochmolekularen Polymer vernetzen.

Wesentliche Eigenschaften von Silikonklebstoffen sind:

- Hohe Temperaturbeständigkeit
- Sehr hohe Flexibilität bei tiefen Temperaturen
- Hervorragende Witterungsbeständigkeit
- Gute Beständigkeit gegenüber schwachen Säuren und Basen

Acrylat-Klebstoffe [EDL]

Klebstoffe auf Acrylatbasis sind Polymerisationsklebstoffe. Dabei weisen Einkomponentensysteme derart stabilisierte Monomere auf, dass eine Polymerisation erst beim Auftragen auf die Fügeteile erfolgt. Sie beginnt wenn Spuren von Feuchtigkeit (Cyanacrylatklebstoffe) oder Metallionen bei gleichzeitigem Ausschluss von Sauerstoff (anaerobe Klebstoffe) wirksam werden. Auch Strahlungen werden eingesetzt um die Polymerisation auszulösen (z.B. UV-Strahlung). In Zweikomponentensystemen wird die diese ebenfalls durch Radikale ausgelöst. Die Aktivierung der Radikale erfolgt dabei anstatt durch Strahlung durch einen zugesetzten Härter. Als wichtigster Vertreter dieser Systeme gelten die Methacrylatklebstoffe.

2.2 Kleben im Holzbau

2.2.1 Starres Kleben im Holzbau

Seit mehr als 100 Jahren ist im Holzbau das Kleben eine anerkannte Füge­technik. Durch die Entwicklung der synthetischen Klebstoffe wurde die Dauerhaftigkeit und Verlässlichkeit der Klebstoffverbindungen deutlich verbessert und bietet bei richtiger, qualitativer Ausführung einige Vorteile gegenüber den metallischen Verbindungen, da eine flächige Kraftverbindung eine deutliche **Reduktion der Spannungsspitzen** in den beiden Fügepartner bedeutet (Abbildung 7).

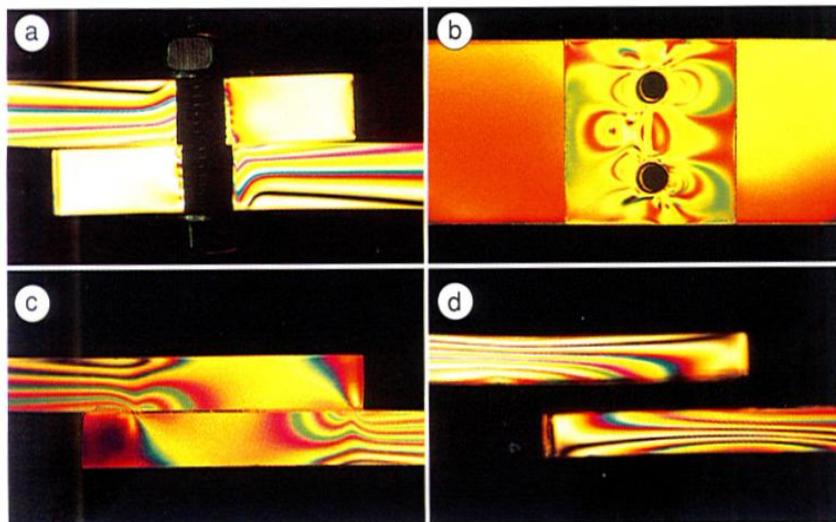


Abbildung 7: Spannungsbild zweier Fügepartner mit stiftförmiger (a und b) sowie flächiger Klebeverbindung (c und d) [HEI]

Weit gespannte Hallenkonstruktionen aus Holz wären heutzutage ohne dem Einsatz starrer Klebstoffe unwirtschaftlich und nicht realisierbar. Die Verbindung von Holz mittels starren Klebstoffen ist also Stand der Technik. Die Übertragung von Kräften über starre Klebstoffverbindungen kann bemessen werden. In sie wird seit langer Zeit großes Vertrauen gesetzt.

2.2.2 Elastisches Kleben im Holzbau

Beim elastischen Kleben im Holzbau stehen wir jedoch am Anfang, obwohl sich großes Potential zeigt. Vor allem beim Zusammenfügen **unterschiedlicher Materialien** (z.B. Glas und Holz) bietet die Verbindung mittels elastischen Klebstoffen deutliche Vorteile.

Prinzipiell kristallisieren sich im Vergleich zu starren Klebstoffverbindungen einige Unterschiede heraus. So ist die **Klebschichtdicke** wesentlich stärker als bei starren Klebstoffen. Die Festigkeiten liegen zwar deutlich unterhalb derer von starren Klebstoffen, sie bleiben jedoch hinsichtlich der Klebschichtdicke über einen wesentlich größeren Bereich erhalten [HEI] (siehe Abbildung 8).

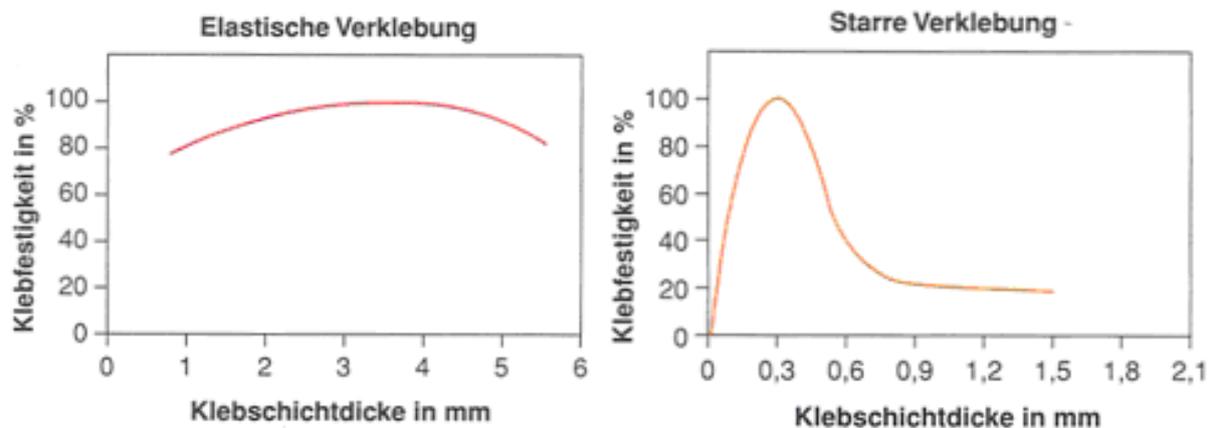


Abbildung 8: Unterschied elastische und starre Verklebung [HEI]

Ein weiterer Unterschied ist, dass die **Nachgiebigkeit** der Klebstoffschicht einen wesentlichen Anteil an der Gesamtverformung eines elastisch verklebten Tragsystems hat. Dies fordert neue Ansätze der Bemessung und rückt nicht nur die Thematik der Tragfähigkeit, sondern auch die Gebrauchstauglichkeit (Verformung des Tragwerks) in den Mittelpunkt des Interesses.

Ein Vorteil ist, beim Zusammenfügen unterschiedlicher Fügmaterialien, die Aufnahme von Bewegungen in der Klebstoffuge. Durch das weiche Verhalten des Klebstoffes können **Zwängungen abgebaut** und Spannungsspitzen geglättet werden. Der Lasteintrag erfolgt durch Verteilung der Kraft auf die Klebstofffläche gleichmäßig und vermindert Spannungsspitzen, die für spröde Materialien wie Glas schädlich sein können (Abbildung 9).

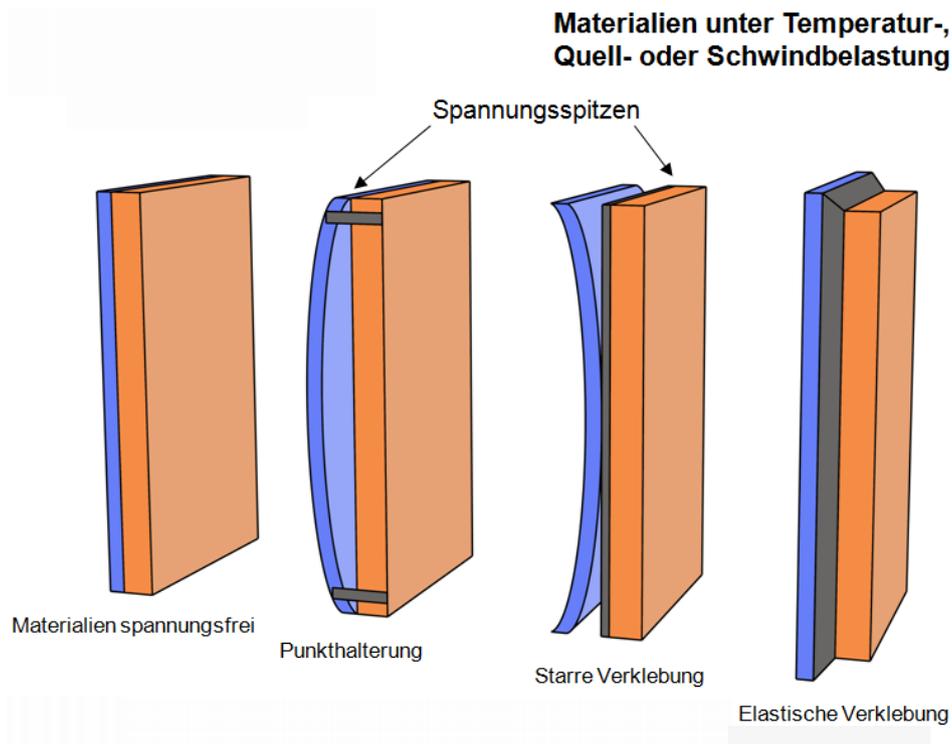


Abbildung 9: Spannungsspitzen zufolge Formänderung eines Fügepartners

Durch die dicke Klebstoffuge und die vergleichsweise geringen Festigkeiten kann auch im Unterschied zu starren Klebstoffen ein **Bruch im Klebstoffsubstrat** selbst passieren.

Die elastische Verklebung bietet nicht nur die Möglichkeit zur Verbindung zweier Fügepartner mit unterschiedlichem Temperaturausdehnungskoeffizienten sowie Quell- und Schwindmaß. Durch die elastische, federnde Klebstoffuge können weiters Masse-Feder-Systeme geschaffen werden, die Schwingungsdämpfung sowie Schallschutz ermöglichen.

2.2.3 Status Quo im elastischen Klebeverbund

Es zeigt sich in letzter Zeit vermehrt der Einsatz von elastischen Verklebungen im **nicht tragenden Bereich**. Hier sind vor allem **geklebte Fensterkonstruktionen** zu erwähnen (siehe z.B. Abbildung 10). Die Glasscheiben werden ohne Klotzung in den Rahmen geklebt. Die neue Fertigungsmethode bietet eine wirtschaftlichere Produktion, schlankere Fensterrahmenstrukturen sowie verminderten Reinigungsaufwand [OTT].

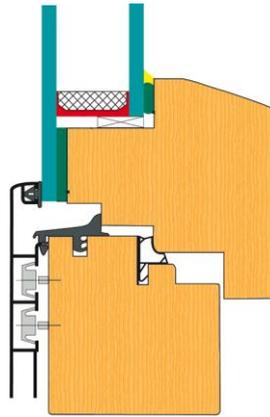


Abbildung 10: Geklebte Fensterkonstruktion (Klebstoff: grün)

Als weiteres Einsatzgebiet zeigt sich die Verklebung von Parkettböden mit dem Estrich (siehe Abbildung 11). Die elastische Verbindung bietet hier eine Möglichkeit zur Aufnahme der Schwind- und Quellverformungen des Holzbelags sowie eine zusätzliche Steigerung des Trittschallschutzes.



Abbildung 11: Geklebter Parkettboden

Erst langsam ist ein Vorstoß der elastischen Klebung in den tragenden Bereich bemerkbar. So werden bei Structural Sealant Glazing Fassaden Glasscheiben auf eine Tragkonstruktion geklebt. Die umlaufende, elastische Lasteinleitung schont das spröde Glassubstrat im Gegensatz zu punktuellen Halterungen der Glasscheiben. Des Weiteren bildet die Klebstoffebene gleichzeitig eine Dichtebene gegen Luftdurchlässigkeit und Schlagregen.

Die geeigneten Klebstoffe für solche Systeme müssen eine europäisch-technische Zulassung (nach ETAG 002) durchlaufen. Die ETAG 002 (Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen) regelt prinzipiell nur **Fassaden** aus Metall in Kombination mit Silikonklebstoffen. Darin enthalten sind 4 verschiedene Typen von geklebten Glasfassaden [OIB1] (siehe Abbildung 12).

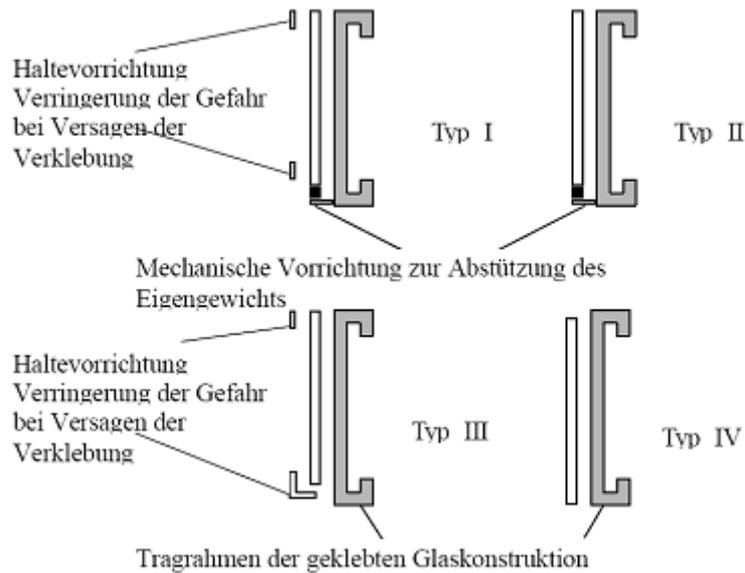


Abbildung 12: Fassadenkonstruktionen Typ I - IV nach ETAG 002

Trotz einer über vierzigjährigen Erfahrung beim Einsatz von Silikonverklebungen und deren hohen Zuverlässigkeit werden in weiten Teilen Europas durch baurechtliche Vorgaben nur SG-Fassaden des Typs 1-3 erlaubt.

Stand der Technik ist es also nach wie vor, die Klebstoffuge maximal mit dem **Eigengewicht der Glasscheibe** bzw. der **Aufnahme von Windsogkräften** zu belasten. Für den Einsatz des statisch wirksamen Holz-Glas-Verbundes zur Übernahme von Kräften aus dem Gebäude soll diese Arbeit eine wichtige Grundlage sein.

2.3 Lastabtragung im Hochbau

Im Hochbau kann man unter zwei Einwirkungsarten unterscheiden:

Langzeit-Einwirkungen:

- Eigengewichte des Gebäudes [EC1-1-1], [EC1-1-1b]
- Nutzlasten (teilweise auch kurzfristig) [EC1-1-1], [EC1-1-1b]
- Schneelasten (abhängig vom Ort manchmal auch kurzfristig) [EC1-1-3], [EC1-1-3b]

Kurzzeit-Einwirkungen:

- Windlasten [EC1-1-4], [EC1-1-4b]
- Erdbebenlasten (außergewöhnlicher Lastfall) [EC8-1], [EC8-1b]
- Anpralllasten (außergewöhnlicher Lastfall) [EC1-1-7], [EC1-1-7b]

Weiters unterscheidet man unter zwei Belastungsrichtungen:

Vertikale Lasten:

Die Haupttragrichtung eines Gebäudes ist in Richtung der Schwerkraft gerichtet. Lasten des Gebäudes werden über Dach- und Deckenkonstruktionen in Stützen und Wände eingeleitet. Diese tragen die Kräfte bis zum Fundament ab.

Folgende vertikale Lasten treten auf:

- Eigengewichte des Gebäudes [EC1-1-1], [EC1-1-1b]
- Nutzlasten [EC1-1-1], [EC1-1-1b]
- Schneelasten [EC1-1-3], [EC1-1-3b]

Horizontale Lasten:

Um die Stabilität eines Gebäudes zu gewährleisten muss in jedem Hochbau ein Aussteifungssystem vorhanden sein, das horizontale Einwirkungen auf das Gebäude in das Fundament abträgt. Zu diesem Zweck werden Wand- und Deckenscheiben ausgebildet, die diese Aufgaben erfüllen.

Folgende horizontale Lasten treten auf:

- Windlasten [EC1-1-4], [EC1-1-4b]
- Erdbebenlasten (außergewöhnlicher Lastfall) [EC8-1], [EC8-1b]
- Anpralllasten (außergewöhnlicher Lastfall) [EC1-1-7], [EC1-1-7b]
- Gebäudeschiefstellung (hervorgerufen von Vertikallasten und Imperfektionen der Gebäudegeometrie) [EC5-1-1], [EC5-1-1b]

Im Massivbau reichen in der Regel die betonierten und gemauerten Wandscheiben sowie Massivdecken aus um die Stabilität des Gebäudes zu gewährleisten. Im Holzbau, wo die vertikale Haupttragwirkung hauptsächlich über Stützen erfüllt wird und die Holzdecken aus parallel zueinander angeordneten Trämen bestehen, ist eine Ausfachung dieser Skelettbauweise zur Bildung von Wand- und Deckenscheiben unbedingt erforderlich.

Es gibt mehrere Möglichkeiten die Aussteifung von Wandkonstruktionen im Holzbau zu gewährleisten:

- **Beplankung** der Holzsteher mittels tragfähigen Holzwerkstoffplatten (z.B. OSB)
- Ausbildung **biegesteifer Rahmenkonstruktionen** in Wandebene (z.B. durch Stahlrahmen)
- Ausbildung eines **Windverbandes** mittels Stahlzugbändern
- Ausbildung von **Zug- und Druckdiagonalen** mittels Konstruktionsholz

Bei all diesen Varianten ist das Aussteifungssystem sichtbar. Mittels HGV-Elementen kann ein **unsichtbares Aussteifungssystem** geschaffen werden, dass die ohnedies vorhandenen Eigenschaften der Glasscheibe aktiviert.

2.4 Aussteifende Wandscheiben in Holz-Glas-Verbundbauweise

Als Grundlage für die Verwendung von geklebten Holz-Glas-Wandscheiben zur Aussteifung von Gebäuden wird in dieser Arbeit auf drei vorangegangene Forschungsarbeiten aufgebaut und diese in den folgenden Kapiteln kurz dargestellt.

2.4.1 Arbeit von HAMM

Die Arbeit von Hamm [HAM] behandelt sowohl Biegeträger mit Holzgurt und Glassteg, Plattenbalken und Wandscheiben in Holz-Glas-Verbundbauweise. Für diese Arbeit ist vor allem die Betrachtung der Wandscheibe von Interesse.

Die HGV-Wandscheibe in Hamms Arbeit hat folgende Geometrie:

- Floatglasscheibe, Fläche 2.000 x 2.000 mm, Dicke 6 mm
- Umlaufender Rahmen aus Furnierschichtholz (25 x 50 mm Querschnitt)
- Klebstoff Polyurethan, einkomponentig, warm erhärtend, sehr steif
- Klebefugengeometrie: keine genauen Angaben, Dicke < 0,5 mm

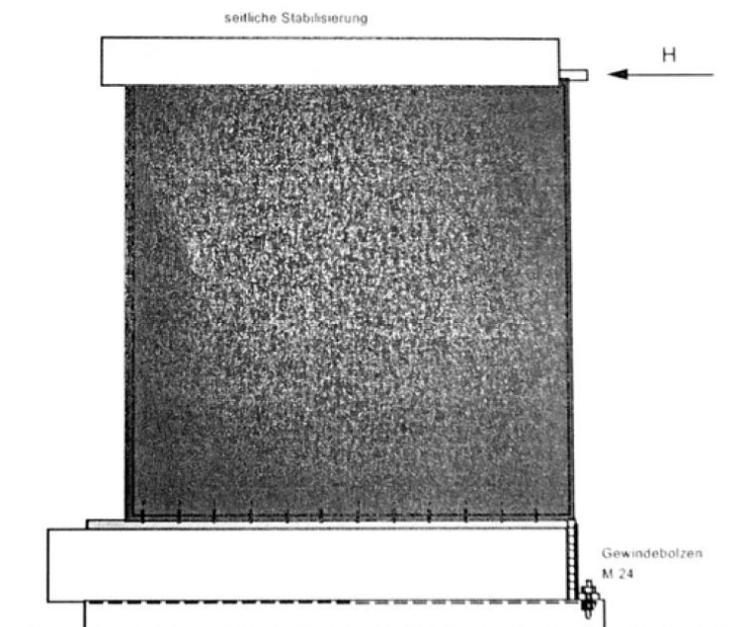


Abbildung 13: Konstruktion nach Hamm [HAM]

Die Arbeit verfolgt eine maximale Ausnutzung der Steifigkeiten des Klebstoffes, was insbesondere bei Biegeträgern zum Erreichen der Gebrauchstauglichkeit sehr wichtig ist, jedoch die Eigenspannungen im Glassubstrat erhöht.

Eine Bemessung der Wandscheibe nach dem semiprobabilistischen Bemessungskonzept wird erstmal angedacht, jedoch nur als eine theoretische Abhandlung durchgeführt. Die Bemessung der Klebstofffuge wird unter Heranziehen einer Ersatzdruckdiagonalen der Glasscheibe empfohlen.

Für die maximale Kopfverschiebung der Wandscheibe wird ein Gebrauchstauglichkeitskriterium von $h/300$ bis $h/500$ empfohlen.

Ein starkes Plattenbeulen der Glasscheibe wird bei den durchgeführten Untersuchungen auf höherem Lastniveau beobachtet. Die Beulverformungen führen in weiterer Folge nicht zum Versagen des Bauteils. Eine steife Verklebung und eine starre Zugverankerung rufen Zugspannungsspitzen in der Glasscheibenecke beim Auflager hervor und in Folge Tragfähigkeitsversagen durch Zugbruch im Glas.

Um durch die starre Verklebung der Holz-Glas-Verbindung einen spontanen Spröbruch der Glasscheibe zu vermeiden, wird zur Erreichung eines duktilen Bauteilversagens angedacht, die metallische Zugverankerung der Wandscheibe als schwächstes Glied des Bauteils zu dimensionieren.

2.4.2 Arbeit von NIEDERMAIER

Die Arbeit von Niedermaier [NIE] konzentriert sich auf Wandscheiben in Holz-Glas-Verbundbauweise zur Aussteifung im Wintergartenbau.

Die HGV-Wandscheibe in Niedermaiers Arbeit hat folgende Geometrie:

- Floatglasscheibe, Fläche 1.600 x 800 mm, Dicke 8 mm sowie VSG-Scheibe, Fläche 1.600 x 800 mm, Dicke 2 x 4 mm
- Umlaufender Hilfsrahmen aus finiertem Fichtenholz (2 x 40 x 40 mm Querschnitt)
- Elastische Klebstoffe Silikon und Polyurethan
- Klebefugegeometrie: Breite 18 mm, Dicke 6 mm

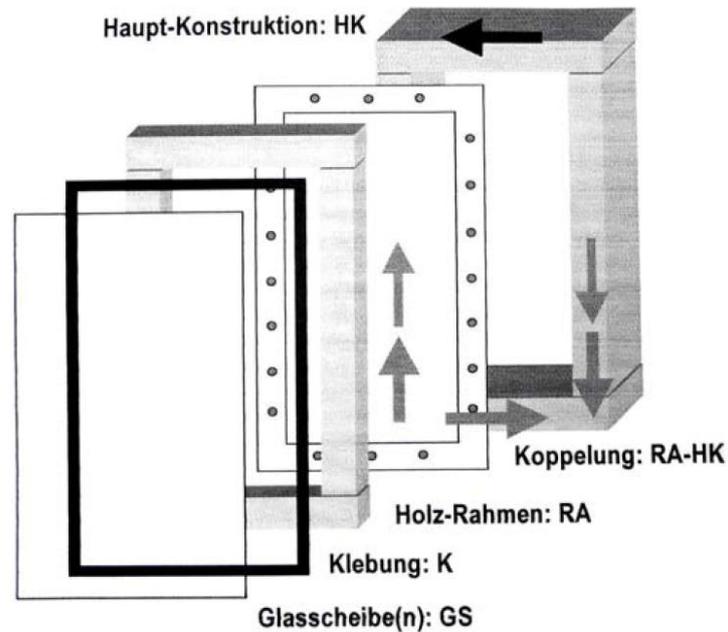


Abbildung 14: Konstruktion nach Niedermaier [NIE]

Niedermaier setzt erstmals einen, mit der Glasscheibe verklebten Hilfsrahmen ein, welcher mit der Haupttragstruktur über ein Aluminium-T-Profil verschraubt wird. Dies bietet die Möglichkeit Baustellenverklebungen zu vermeiden.

Durch den Einsatz von elastischen Klebstoffen werden die Spannungsspitzen im Glas deutlich reduziert und die Verformbarkeit des Bauteils (Gebrauchstauglichkeit) rückt in den Vordergrund der Betrachtungen. Eine maximale Kopfverschiebung des HGV-Elements wird durch Niedermaier mit $h/500$ empfohlen. Diese Verschiebung wird bei den Bauteilversuchen noch vor Erreichen der elastischen Streckgrenze des Klebstoffs erreicht.

Untersucht wurden 3 Versuchsvarianten mit insgesamt 38 Probekörpern wobei kein Glasbruch bei den Untersuchungen beobachtet wurde.

2.4.3 Arbeit von EDL

Die Arbeit von Edl [EDL] baut auf die gekoppelte Konstruktion des HGV-Elements von Niedermaier auf und entwickelt diese weiter. Die Möglichkeiten für die Aussteifung durch HGV-Elemente im Hausbau werden untersucht.

Die HGV-Wandscheibe in Edls Arbeit hat folgende Geometrie:

- Isolierglasscheibe, Fläche 2.500 x 1.250 mm, Dicke 8-16-6 mm
Floatglas 8 mm, Scheibenzwischenraum 16 mm, Floatglas 6 mm
- Umlaufender Hilfsrahmen aus Fichte und Birkenfurniersperrholz
(Querschnitt variabel)
- Elastische Klebstoffe Silikon, Polyurethan sowie semi-elastischer Klebstoff Acrylat
- Klebefugengeometrie: Breite 10-12 mm, Dicke 2-6 mm

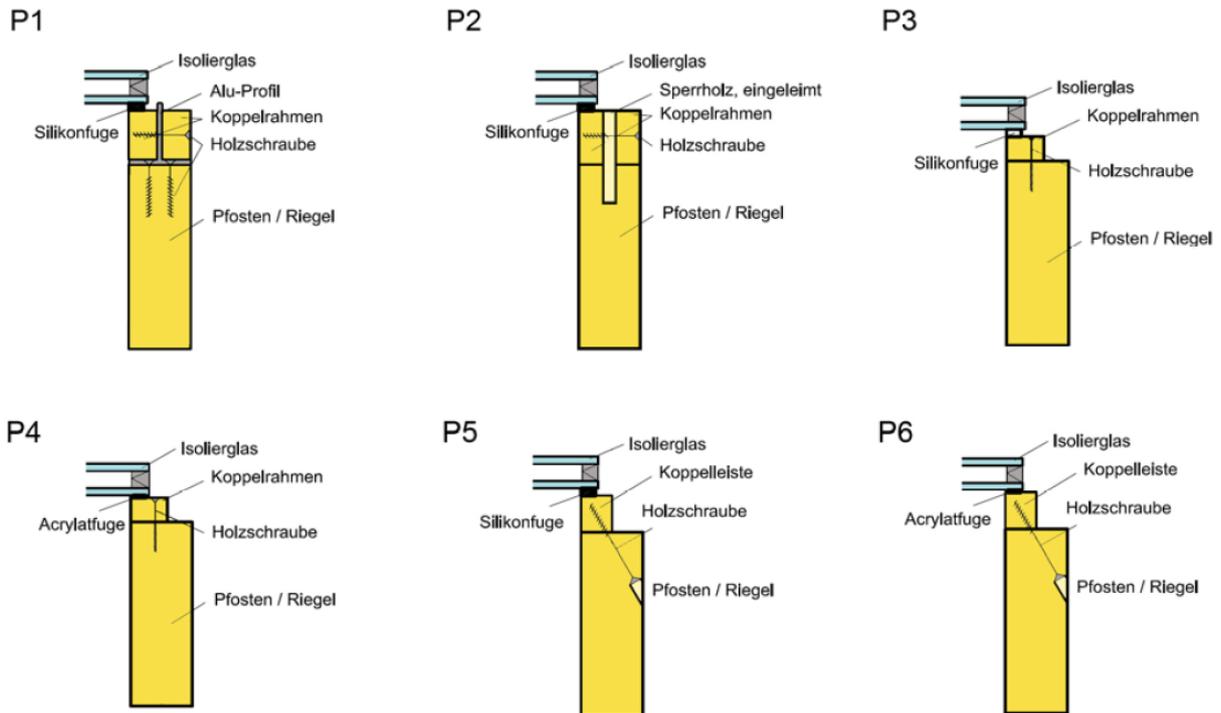


Abbildung 15: Konstruktionsvarianten nach Edl [EDL]

Edl untersucht die Eignung unterschiedlicher Klebstoffe sowie Koppelleistenvarianten (vgl. Abbildung 15) für den Einsatz bei HGV-Elementen. Die Arbeit konzentriert sich weiterhin auf elastische Klebstoffe zur Reduktion der Spannungsspitzen im Glas, wobei eine Betrachtung etwas steiferer Klebstoffsysteme (Acrylat) ebenfalls durchgeführt wird, um die Verformbarkeit der HGV-Elemente zu reduzieren und die Traglast zu steigern.

Untersucht wurden 6 Prüfkörpervarianten mit je 1 Probekörper. Durch vergleichende Analyse wurde die Eignung der Konstruktionsvarianten und Klebstoffarten quantifiziert.

Eine maximale Kopfverschiebung des HGV-Elements wird durch Edl ebenfalls mit $h/500$ empfohlen.

Erstmals wird auch zur Steigerung der gebäudeaussteifenden Wirkung eine Kombination von Primär- und Sekundärtragsystemen angedacht.

Die Analyse der Versagenswahrscheinlichkeit wird theoretisch abgehandelt und dabei die einzelnen wesentlichen Tragwerkskomponenten des HGV-Systems abgehandelt:

- Glasscheibe
- Klebefuge
- Stiff förmige Verbindungsmittel

3 Struktur der Forschungsarbeit

Es ergeben sich in weiterer Folge im Forschungsprojekt fünf Untersuchungsschwerpunkte zur Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen welche in regelmäßiger Zusammenarbeit mit dem wissenschaftlichen Beirat Univ.-Prof.i.R. Dr.-Ing. Heinrich Kreuzinger, Prof. Dr.-Ing. Peter Niedermaier und Univ- Prof. DDI Wolfgang Winter abgearbeitet wurden:

- Experimentelle Untersuchungen
 - Leistungsfähigkeit der Klebstofffuge
 - Optimierung der Prototypenentwicklung
 - Ermittlung der statischen Leistungsfähigkeit von HGV-Elementen
- Bemessungsmodelle zur Prognose der Tragfähigkeit und Verformbarkeit
- Technische Umsetzung

In Tabelle 1 ist der Ablauf der durchgeführten Schwerpunkte im Forschungsprojekt ersichtlich.

Tabelle 1: Struktur der Bearbeitung des Forschungsprojekts

Forschungsprojekt	<u>Leistungsfähigkeit der Klebstoffuge</u> <ul style="list-style-type: none"> • Klebstoffart • Lasteinwirkungsdauer <ul style="list-style-type: none"> Kurzfristige Lasten Zyklische Lasten Dauerlasten • Lasteinwirkungsrichtung <ul style="list-style-type: none"> Schubbelastung quer Schubbelastung längs Zugbelastung • Geometrie der Klebefuge • Umwelteinflüsse <ul style="list-style-type: none"> Temperatur Feuchtigkeit 	<u>Beratung der Versuche</u> <ul style="list-style-type: none"> • Konzept • Auswertung • Diskussion und Interpretation der Ergebnisse 	Wissenschaftlicher Beirat
	<u>Optimierung der Prototypenentwicklung</u> <ul style="list-style-type: none"> • Komponenten des Fassadensystems <ul style="list-style-type: none"> Koppelleiste Geometrie Material Dichtebenen Beschichtungen • Bauphysik <ul style="list-style-type: none"> Luftdurchlässigkeit Schlagregendichtheit Wasserführung Differenzklima 		
	<u>Ermittlung der statischen Leistungsfähigkeit</u> <ul style="list-style-type: none"> • Klebstoffart • Geometrie der Wandscheibe • Geometrie der Klebefuge • Elementkopplung 		
	<u>Berechnungsmodell des HGV-Elementes</u> <ul style="list-style-type: none"> • FEM-Analyse <ul style="list-style-type: none"> Verifizierung mit Realversuchen Geometrie der Wandscheibe Geometrie der Klebefuge • Federmodell [KREU] <ul style="list-style-type: none"> Verifizierung mit Realversuchen Geometrie der Wandscheibe Geometrie der Klebefuge 	<u>Verifikation der FEM-Analyse</u> <ul style="list-style-type: none"> • Analytisches Berechnungsmodell: Federmodell [KREU] 	
	<u>Bemessungsmodell</u>		
	<u>Bauwerk</u> <ul style="list-style-type: none"> • Errichtung von Prototypenbauwerken <ul style="list-style-type: none"> Planung Herstellung Montage Nutzung / Dauerhaftigkeit 		

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Leistungsfähigkeit der Klebstoffuge

4.1.1 Methodik

Im Forschungsprojekt wurden drei verschiedene Klebstoffe auf ihre Eignung zum Einsatz in HGV-Elementen untersucht. Dabei wurden zwei neutrale, kondensationsvernetzende Silikonklebstoffe (Silikon A und Silikon B) sowie ein, durch Polymerisation aushärtender Acrylatklebstoff (Acrylat) (alle auf Zweikomponentenbasis) untersucht.

Auf die am Glasrand vierseitig umlaufende Klebstoffuge können unterschiedliche Belastungsarten einwirken. Zur Quantifizierung der Einflüsse dieser Belastungen wurden Bruchuntersuchungen an Kleinprüfkörpern (siehe Abbildung 16) durchgeführt und mit den Referenzwerten des jeweiligen Klebstoffs verglichen. Die Abmessungen des Kleinprüfkörpers wurden von Niedermaier [NIE] übernommen (siehe Abbildung 17).

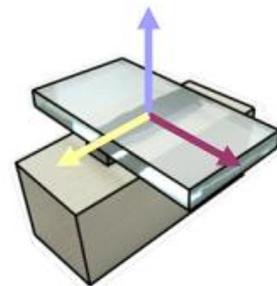


Abbildung 16:
Kleinprüfkörper
(Holz-Klebstoff-Glas)

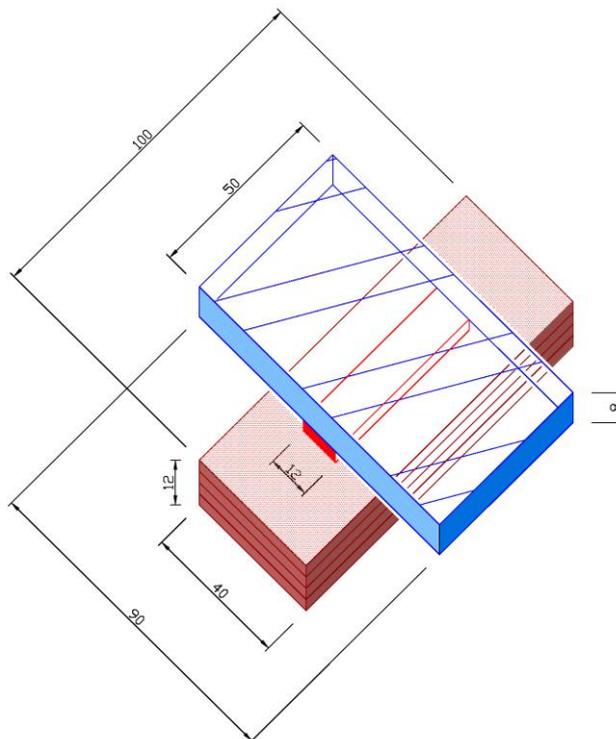


Abbildung 17: Geometrie des Kleinprüfkörpers

Zur Herstellung wurden folgende Materialien verwendet:

Fügepartner 1: Birkenfurnierschichtholz
gem. EN 636 [EN636], Klasse 2, Dicke 12 mm, 40 x 100 mm

Fügepartner 2: Floatglas, Dicke 8 mm, 50 x 90 mm

Klebstoffuge: Dimension 12 x 50 mm, Dicke 2-6 mm (je nach Klebstoff)

Die Klebefugendicke wurde dabei nach Herstellerangaben gewählt. Klebefugendicke *Silikon A*: 3 mm; *Silikon B*: 6 mm; *Acrylat*: 2 mm

Bei der Herstellung wurde mittels Schablone ein definiertes Klebstoffvolumen eingebracht. Nach Verklebung wurden die Prüfkörper mindestens 28 Tage in einem Klimaraum mit 20 °C / 65 % RF gelagert, bevor sie einer Untersuchung unterzogen wurden.

4.1.1.1 Belastungsrichtungen der Klebstoffuge

So wirken auf die Klebstoffuge eines HGV-Elements Belastungen in drei unterschiedlichen Richtungen: **Schubspannungen längs und quer** zur Klebstoffuge aus der Belastung des HGV-Elements in Scheibenebene (Gebäudeaussteifung) sowie **Zugspannungen** durch die Belastung des HGV-Elements in Plattenebene (Windsog) (siehe Abbildung 18).

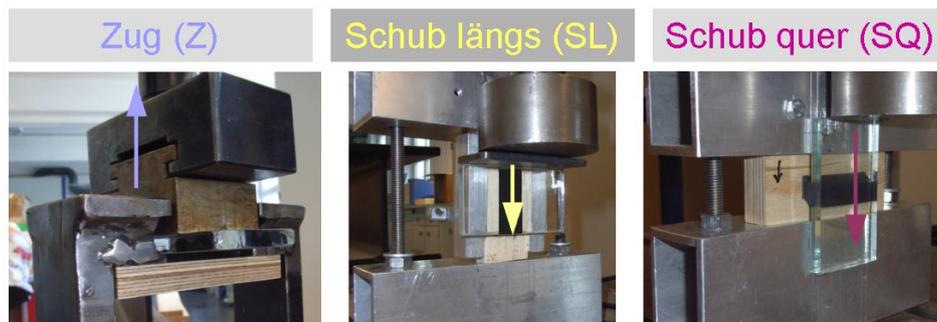


Abbildung 18: Die drei unterschiedlichen Belastungsrichtungen an den Kleinprüfkörpern

4.1.1.2 Belastungsdauer der Klebstoffuge

Betrachtet man die Belastungsdauer, die auftritt, so kann man in drei Einwirkungszeiträume unterscheiden: **Kurzzeitbelastung**, **zyklische Lasten** (z.B. durch Windböen) sowie **Dauerlasten** (aus Gebäudeschiefstellung und Eigengewicht der Glasscheibe).

Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)

Zur Ermittlung der **Kurzzeitbelastung** wurde eine Bruchuntersuchung an Referenzprüfkörpern durchgeführt, um die Anfangsfestigkeit zu ermitteln. Diese bildet eine wichtige Grundlage um die Einflussfaktoren auf die Festigkeit einer Klebefuge quantifizieren zu können.

Die Durchführung der Bruchuntersuchungen (siehe Abbildung 18) wurde analog zu Hauer / Schober [9, 10] durchgeführt. Die Belastung erfolgte in einer Universalprüfmaschine mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm / min und einer Vorkraft von 15 N. Aus dem anfangs linear-elastischen Teil des Spannungs-Dehnungsdiagramms wurde, wenn möglich, der Verschiebungsmodul ermittelt. Des Weiteren wurde die maximal erreichte Bruchlast und die dabei zurückgelegte Bruchdehnung ausgewertet.

Die Untersuchung erfolgte stets an fünf gleichartigen Prüfkörpern. Dabei wurde der Mittelwert, Median, die Standardabweichung sowie bei der erreichten Bruchspannung der 5 %-Quantilwert ermittelt.

Aus dem Mittelwert und Standardabweichung der Bruchspannungen kann gemäß Eurocode [EC0] eine 5 %-Quantile des Festigkeitswerts ($R_{u,5}$) nach folgender Formel errechnet werden:

$$R_{u,5} = m_x - k_n \cdot s_x$$

m_x ... Mittelwert der Festigkeitswerte

s_x ... Standardabweichung der Festigkeitswerte

k_n ... Faktor für charakteristische Werte gem. EN 1990:2002, Tab. D.1

n ... Anzahl der Prüfkörper

n	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
k_n	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Zyklische Belastung

Bei der Beanspruchung der Klebstoffuge unter **zyklischer Last** wurde auf die Klebstoffuge ein Lastwechselzyklus in drei Belastungsrichtungen (Z, SL, SQ – siehe Abbildung 18) aufgebracht. Der Zyklus entspricht der Vorgangsweise in ETAG 002 [OIB1]. Hierbei werden auf jede Probe 5350 Lastzyklen über einen Zeitraum von etwa 9 Stunden aufgebracht. Die Lastzyklen beziehen sich auf ein Bezugslastniveau und es wurden zum einen ein Bezugslastniveau von $R_{u,5} / 6$ nach ETAG 002 sowie in einer zweiten Versuchsserie ein höheres Bezugslastniveau von $R_{u,5} / 3$ aufgebracht. $R_{u,5}$ entspricht hierbei der 5 %-Quantile der Bruchspannung in die jeweilige Belastungsrichtung (siehe Kapitel „Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)“). Die Ergebnisse einer anschließenden Bruchuntersuchung sollen Aufschluss über die Robustheit der Klebstoffuge gegenüber wiederkehrenden Belastungen geben.

Bei der Belastung unter zyklischer Beanspruchung wurden die Prüfkörper 5350 zyklischen Laststufen ausgesetzt [OIB1]. Die Lastniveaus der Zyklen beziehen sich in ihrer Höhe jeweils auf die Bemessungsspannung σ_{des} bzw. τ_{des} .

Es wurden zwei Versuchsreihen mit jeweils zwei Bemessungsspannungsniveaus durchgeführt:

Versuchsreihe 1: σ_{des} bzw. $\tau_{des} = R_{u,5} / 6$; **Versuchsreihe 2:** σ_{des} bzw. $\tau_{des} = R_{u,5} / 3$

Danach folgte eine visuelle Begutachtung des Prüfgutes auf optische Schädigung sowie eine Bruchuntersuchung analog zum Kapitel „Referenzversuche“.

Folgende Laststufen wurden aufgebracht (siehe Diagramm 1):

- 100 Zyklen Spannungsniveau $100\% \cdot \sigma_{des}$ bzw. τ_{des}
- 250 Zyklen Spannungsniveau $80\% \cdot \sigma_{des}$ bzw. τ_{des}
- 5000 Zyklen Spannungsniveau $60\% \cdot \sigma_{des}$ bzw. τ_{des}

Die jeweiligen Spannungsniveaus wurden jeweils innerhalb von 2 Sekunden aufgebracht und für 2 weitere Sekunden gehalten. Die Entlastung auf ein Spannungsniveau von $10\% \cdot \sigma_{des} / \tau_{des}$ erfolgte wieder innerhalb von 2 Sekunden und wurde auch für 2 Sekunden gehalten.

Die Lastzyklen simulieren die Belastungsgeschichte einer Klebstoffverbindung innerhalb ihrer Lebensdauer.

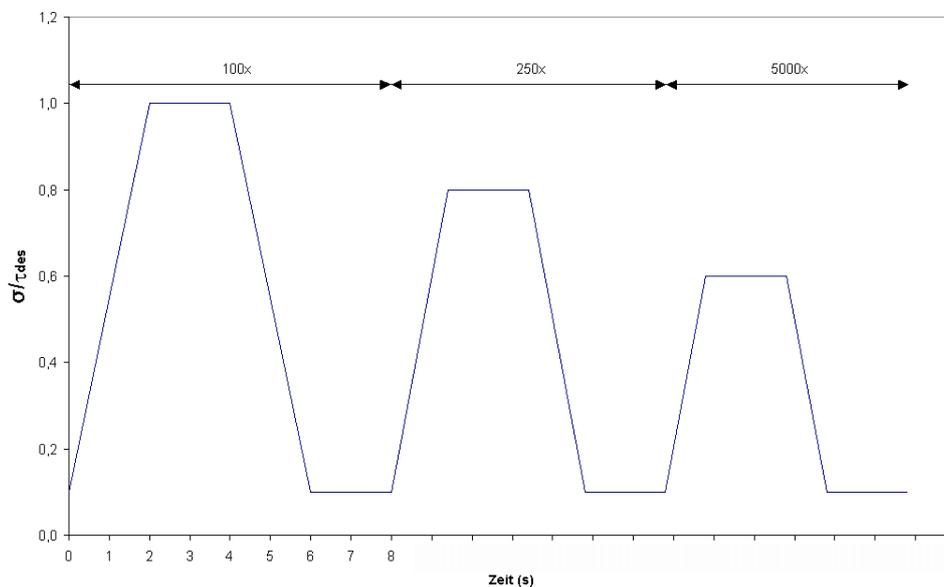


Diagramm 1: Beanspruchungszyklus der Ermüdungsuntersuchung

Dauerlast (Kriechen)

Der Abtrag des Eigengewichts der Glasscheibe sowie die Gebäudeschiefstellung bewirken in der Klebstoffuge eines aussteifenden HGV-Elements Dauerschubspannungen. Diese Dauerbelastung bewirkt Kriechmechanismen im Klebstoff. Um diese Mechanismen quantifizieren zu können und die maximal aufnehmbare Dauerschubspannung zu ermitteln, wurden Dauerlastversuche über den Zeitraum von 90 Tagen auf unterschiedlichen Schubspannungsniveaus durchgeführt.

Da die Kriechverformung von Klebstoffugen maßgeblich vom vorherrschenden Temperaturniveau beeinflusst wird, wurden die Versuche unter einem Normklima von $20\text{ °C} / 65\% \text{ RF}$ sowie einer Temperatur von 55 °C durchgeführt. Hierbei wurden verschieden hohe Dauerschubspannungen aufgebracht und die Verformung über eine Zeitdauer von 91 Tagen gemessen (siehe Abbildung 19) [HFA2]. Es wurden dabei Prüfkörper sowohl quer als auch längs zur Klebstoffuge belastet. Die Verformung wurde in etwa täglich erfasst. Insgesamt wurden an den drei Klebstoffen 207 Versuche durchgeführt.

Bei diesen Kriechversuchen soll ein linearer Zusammenhang zwischen Kriechverformung und anliegender Dauerschubspannung hergestellt (primäres¹ und sekundäres Kriechen²) und quantifiziert werden, ab welcher Dauerschubspannung ein tertiäres Kriechen³ und damit die Einleitung eines Bruches stattfindet. [WEL]



Abbildung 19: Kriechuntersuchungen am Kleinprüfkörper

4.1.1.3 Geometrie der Klebefuge

Die Steifigkeit der Klebefuge wird nicht nur durch die Materialeigenschaften des Klebstoffs beeinflusst, sondern weiters durch das Verhältnis aus Klebefugendicke und Klebefugenbreite [NIE]. Zusätzlich zu den Untersuchungen an Klebefugenbreiten von 12 mm (vgl. Abbildung 17) wurden zu jedem Klebstoff Kleinversuche an Prüfkörpern mit 19 mm breiten Klebefugen bei gleichbleibender Klebefugendicke durchgeführt. Durch die Untersuchungen soll der Einfluss der Klebefugegeometrie auf die ermittelte Klebefugensteifigkeit quantifiziert werden.

¹ Primäres Kriechen: elastisches Nachverformen der Molekülstruktur

² Sekundäres Kriechen: Es lösen sich in diesem Bereich schwache und starke Molekülbindungen nacheinander, wobei sich jedoch nach einer Molekülverschiebung wieder neue zwischenmolekulare Kräfte ausbilden können. Es herrschen hinsichtlich des LöSENS und Neubildens von Bindungen Gleichgewichtszustände.

³ Tertiäres Kriechen: In diesem Bereich wird der Bruch eingeleitet. Der Bruch tritt ein, wenn die Verformungsmöglichkeit des Werkstoffs erschöpft ist.

4.1.1.4 Umwelteinflüsse

Weiters beeinflussen durch den Einsatz im Fassadenbereich folgende Umwelteinflüsse die Festigkeit der Klebstoffe: **Temperaturbeanspruchung** (Kälte und Hitze), **Feuchtebeanspruchung**, **Reinigungsmittelbeanspruchung** sowie **UV-Belastung**.

Die Einflüsse aus Temperatur-, Reinigungsmittel- und UV-Belastung wurden bereits in einem weiteren Forschungsprojekt durch Hauer / Schober [HAU1], [HAU2] untersucht und waren nicht Mittelpunkt der Arbeit.

Wasserlagerung

Im Fassadenbereich können Klebstoffverbindungen immer einer Feuchtigkeitsbelastung ausgesetzt sein. Im Projekt wurden daher die Restfestigkeiten nach Wasserlagerung einer Klebstoffverbindung ermittelt. Bei dieser Untersuchung wurde eine Wasserlagerung (nach ETAG 002 [OIB1]) durchgeführt. Hierzu wurden Probekörper in einem 45 °C warmen Wasserbad mit destilliertem Wasser für 21 Tage gelagert. Anschließend wurden je Klebstoff fünf Prüfkörper einer sofortigen Bruchuntersuchung analog zum Kapitel „Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)“ unterzogen. Diese Prüfkörper wurden in weiterer Folge als **FW (feucht-warm)** bezeichnet.

Weitere fünf Prüfkörper wurden einen Tag lang einer Trocknung in einem Klima von 23 °C / 50 % RF unterzogen und dann geprüft. Diese Prüfkörper wurden in weiterer Folge als **RG (rückgetrocknet)** bezeichnet (siehe Kap. 4.1.2 – „Umwelteinflüsse“).

Der Vorgang der langen, vollständigen Wassersättigung unter 45 °C entspricht sehr extremen Bedingungen für die Klebstoffverbindung und sind einem Worst-Case-Szenario gleichzusetzen.

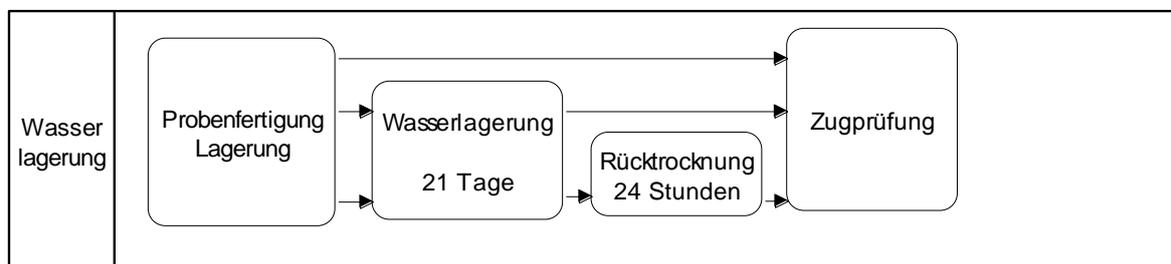


Abbildung 20: Schema zur Untersuchung der Wasserlagerung

4.1.2 Ergebnisse

4.1.2.1 Silikon A

Der Klebstoff Silikon A ist ein neutraler, kondensationsvernetzender Silikonkleb- und -dichtstoff auf Alkoxy-Basis. Zum Einsatz kam eine Klebstofffugendicke von 3 mm. Diese schmalere Klebstofffugendicke bietet dem stark elastischen Klebstoff höhere Steifigkeiten, bewirkt jedoch größere Eigenspannungen zufolge Zwängungen aus Temperaturänderung und Schwind- und Quellverhalten.

Belastungsdauer der Klebstofffuge

Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)

Die Versuche wurden in drei Belastungsrichtungen (Zug, Schub längs und Schub quer zur Klebstofffuge) wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt. Ermittelt wurde hierbei die maximal erreichte Bruchspannung und die dabei zurückgelegte Bruchdehnung. Zusätzlich wurden bei der Belastung auf Schub jeweils der linear-elastische Teil des Spannungs-Dehnungsdiagramms zur Ermittlung des Schubmoduls herangezogen. Dieser bildet die Grundlagen für das Bemessungsmodell in Kapitel „Rechenmodelle zur Prognose der Spannungen und Verformungen im Wandscheibenelement“. Die Verformbarkeit des Klebstoffs unter Zugbelastung hat auf die Bemessung des Wandscheibenelements keinen Einfluss und wurde daher nicht gesondert betrachtet.

Belastung auf Zug

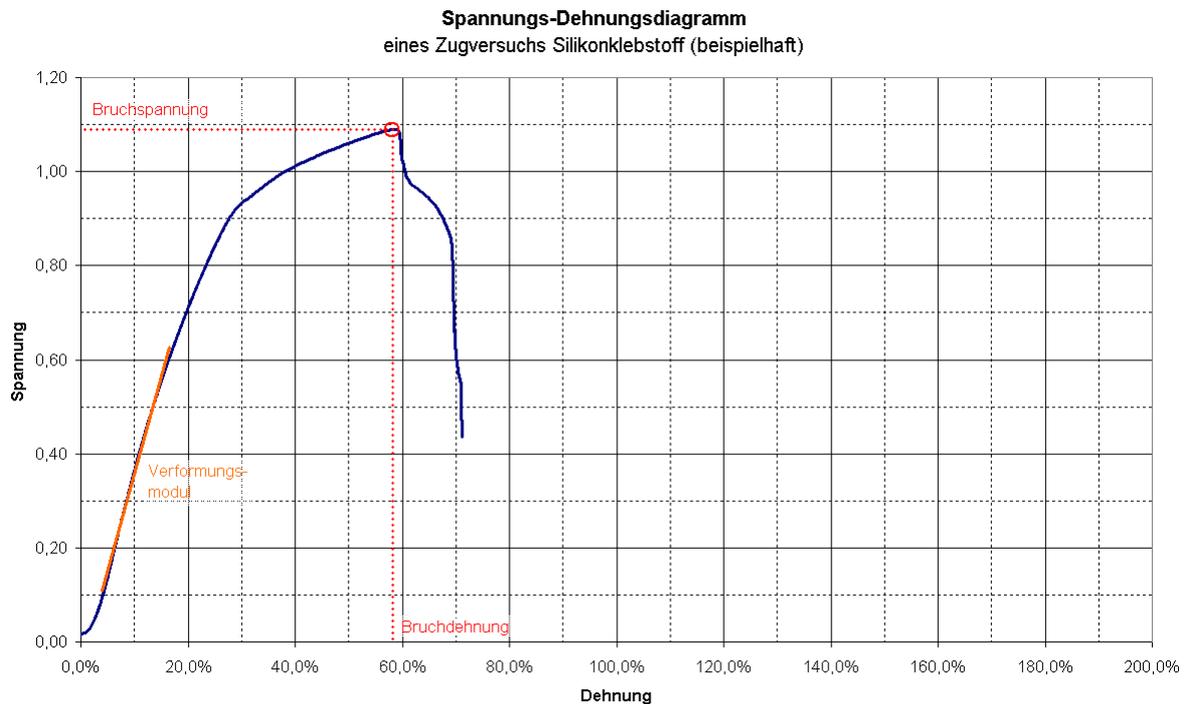


Diagramm 2: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Silikonklebstoff unter Zugbelastung

Silikon A, Kurzzeitbelastung (Referenzwerte), Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,899 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,878 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,058 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,763 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 120 %**

Belastung auf Schub längs der Klebstofffuge

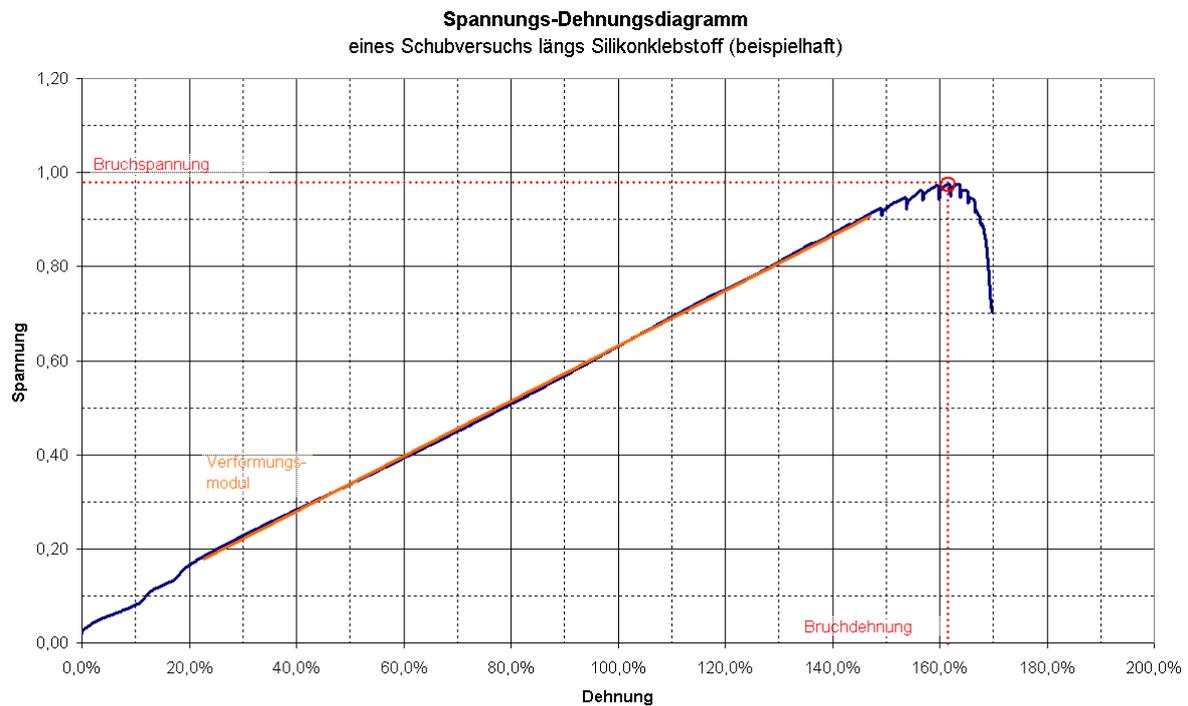


Diagramm 3: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Silikonklebstoff unter Schubbelastung längs der Klebstofffuge

Silikon A, Kurzzeitbelastung (Referenzwerte), Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: $n = 5$
Mittlere Bruchspannung: $m_x = 1,001 \text{ N / mm}^2$
Median der Bruchspannung: $m_{\text{med}} = 0,987 \text{ N / mm}^2$
Standardabweichung der Bruchspannung: $s_x = 0,076 \text{ N / mm}^2$
5-% Quantilwert der Bruchspannung: $R_{u,5} = 0,824 \text{ N / mm}^2$
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: $e = 261 \%$
Mittlerer Verformungsmodul: $G = 0,37 \text{ N / mm}^2$

Belastung auf Schub quer zur Klebstoffuge

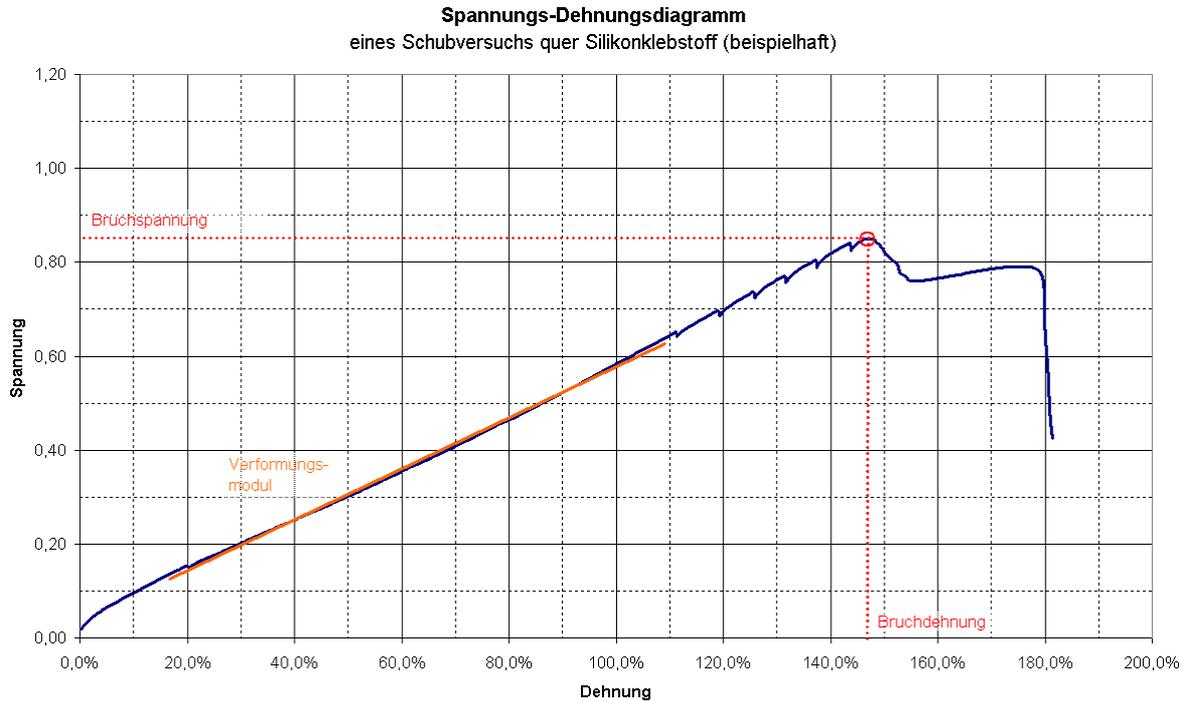


Diagramm 4: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Silikonklebstoff unter Schubbelastung quer zur Klebstoffuge

Silikon A, Kurzzeitbelastung (Referenzwerte), Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 8**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,771 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,803 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,080 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,611 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 232 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,37 N / mm²**

Zyklische Belastung

Die Untersuchungen unter zyklischer Belastung wurden wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt und analog zu Kapitel „Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)“ ausgewertet.

Belastung auf Zug

$$\text{Versuchsreihe 1: } \sigma_{des} = R_{u,5} / 6 = 0,763 / 6 = 0,127 \text{ N / mm}^2$$

Silikon A, Zyklische Belastung VR 1, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,913 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 0,912 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,025 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,855 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 108 %**

$$\text{Versuchsreihe 2: } \sigma_{des} = R_{u,5} / 3 = 0,763 / 3 = 0,254 \text{ N / mm}^2$$

Silikon A, Zyklische Belastung VR 2, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,923 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 0,928 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,049 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,810 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 84 %**

Belastung auf Schub längs zur Klebstoffuge

$$\text{Versuchsreihe 1: } \tau_{des} = R_{u,5} / 6 = 0,824 / 6 = 0,137 \text{ N / mm}^2$$

Silikon A, Zyklische Belastung VR 1, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 1,075 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 1,060 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,121 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,793 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 268 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,39 N / mm}^2**

Versuchsreihe 2: $\tau_{des} = R_{u,5} / 3 = 0,824 / 3 = 0,275 \text{ N / mm}^2$

Silikon A, Zyklische Belastung VR 2, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 1,108 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 1,120 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,047 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,998 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 291 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,35 N / mm²**

Belastung auf Schub quer zur Klebstoffuge

Versuchsreihe 1: $\tau_{des} = R_{u,5} / 6 = 0,611 / 6 = 0,102 \text{ N / mm}^2$

Silikon A, Zyklische Belastung VR 1, Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,885 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 0,858 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,058 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,750 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 231 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,39 N / mm²**

Versuchsreihe 2: $\tau_{des} = R_{u,5} / 3 = 0,611 / 3 = 0,204 \text{ N / mm}^2$

Silikon A, Zyklische Belastung VR 2, Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,852 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 0,864 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,050 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,736 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 220 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,40 N / mm²**

Dauerlast (Kriechen)

Die Untersuchungen unter Dauerlast wurden wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt und ausgewertet.

Normklima 20 °C/ 65 % RF

Folgende Belastungskombinationen wurden durchgeführt:

Tabelle 2: Dauerspannungsniveaus der Kriechuntersuchungen

Belastungsrichtung	Anzahl Prüfkörper	Dauerspannungsniveau [N / mm ²]
Längs zur Fuge	6	0,011
Längs zur Fuge	6	0,017
Längs zur Fuge	5	0,026
Längs zur Fuge	5	0,040
Längs zur Fuge	5	0,066
Quer zur Fuge	6	0,011
Quer zur Fuge	6	0,017
Quer zur Fuge	5	0,026
Quer zur Fuge	4	0,040
Summe	48	

In Diagramm 5 ist deutlich erkennbar, dass sich bei den Dauerspannungsniveaus von über 0,04 N / mm² eine kontinuierliche Zunahme der Verformungen auch bei Beendigung der Untersuchung nach 90 Tagen zeigt. Diese Verformungszunahme könnte irgendwann zum Versagen der Verbindung führen und muss vermieden werden. Unterhalb dieses Spannungsniveaus bleibt die Verformung nach 90 Tagen konstant. Für eine Dauerschubbelastung der Klebstoffuge oberhalb von 0,04 N/mm² wären längere Untersuchungen notwendig, welche in dieser Arbeit nicht durchgeführt wurden. Die maximale Dauerschubbelastung ist daher auf **0,04 N/mm²** zu begrenzen.

Die beiden Klimatisierungsausfälle zeigen weiters deutlich, welchen Einfluss die Umgebungstemperatur auf das Verformungsverhalten der Klebstoffuge hat.

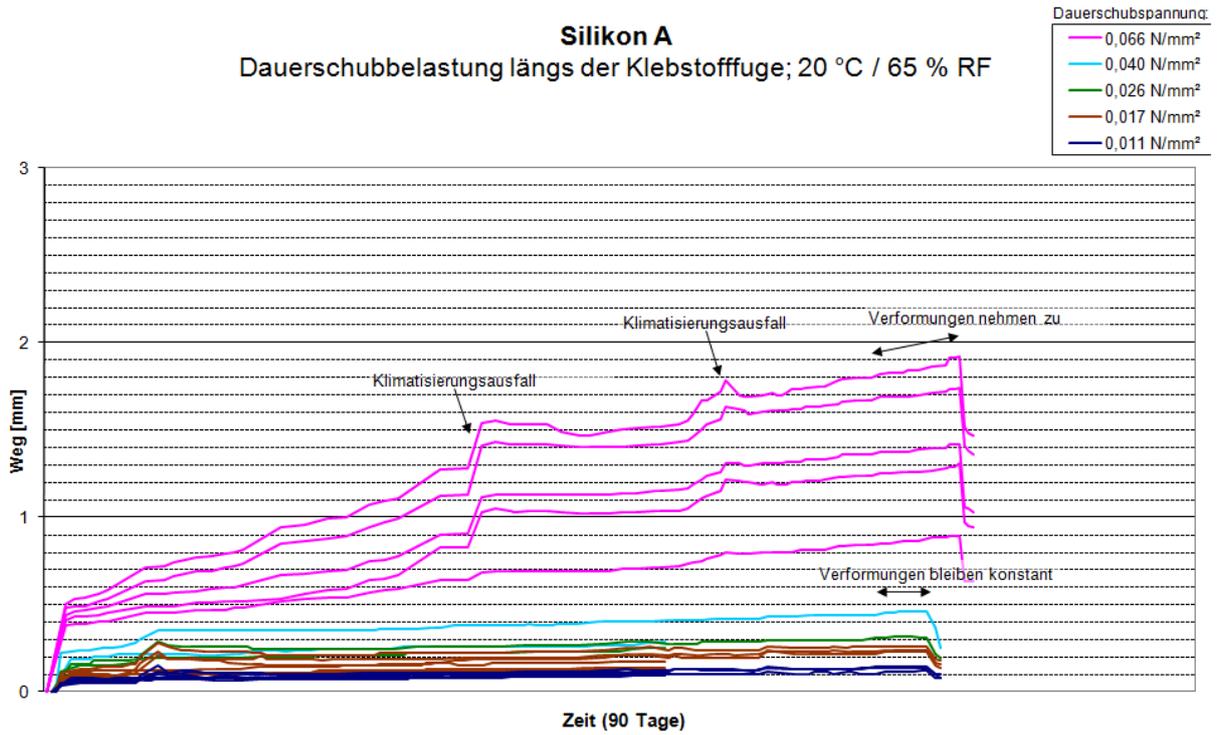


Diagramm 5: Silikon A, Dauerschubbelastung der Klebstoffuge, Schub längs unter 20 °C

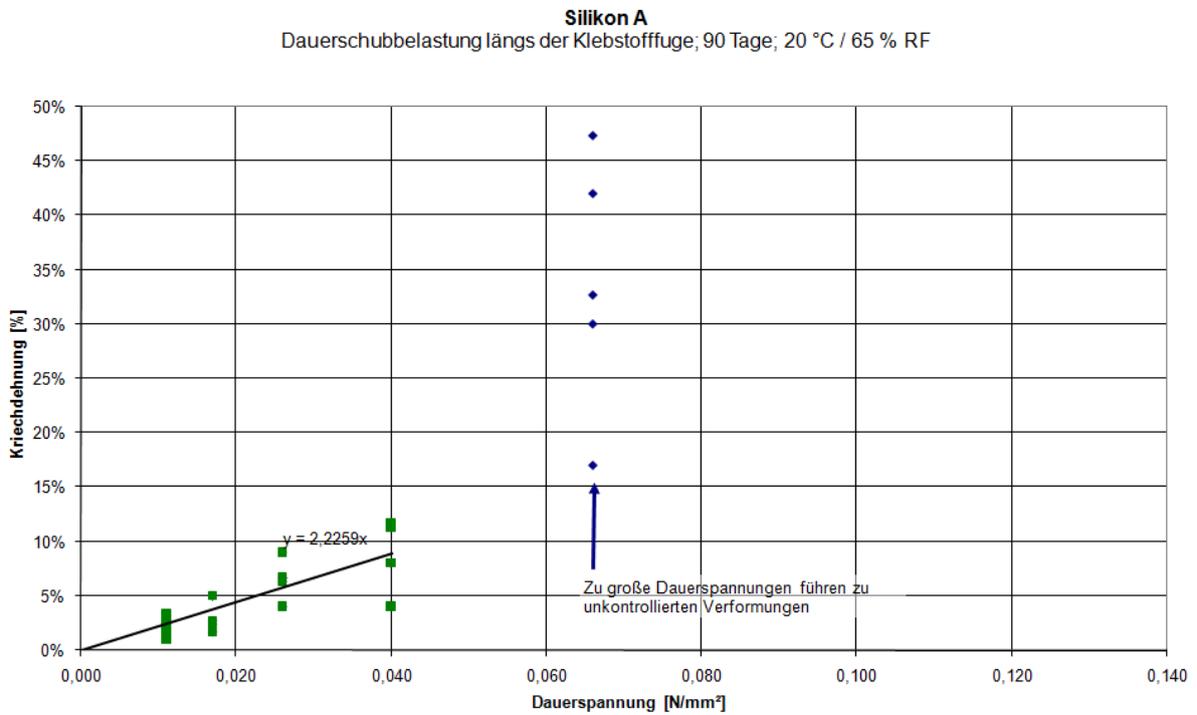


Diagramm 6: Silikon A, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung längs der Klebstoffuge unter 20 °C

Silikon A
Dauerschubbelastung quer zur Klebstoffuge; 90 Tage; 20 °C / 65 % RF

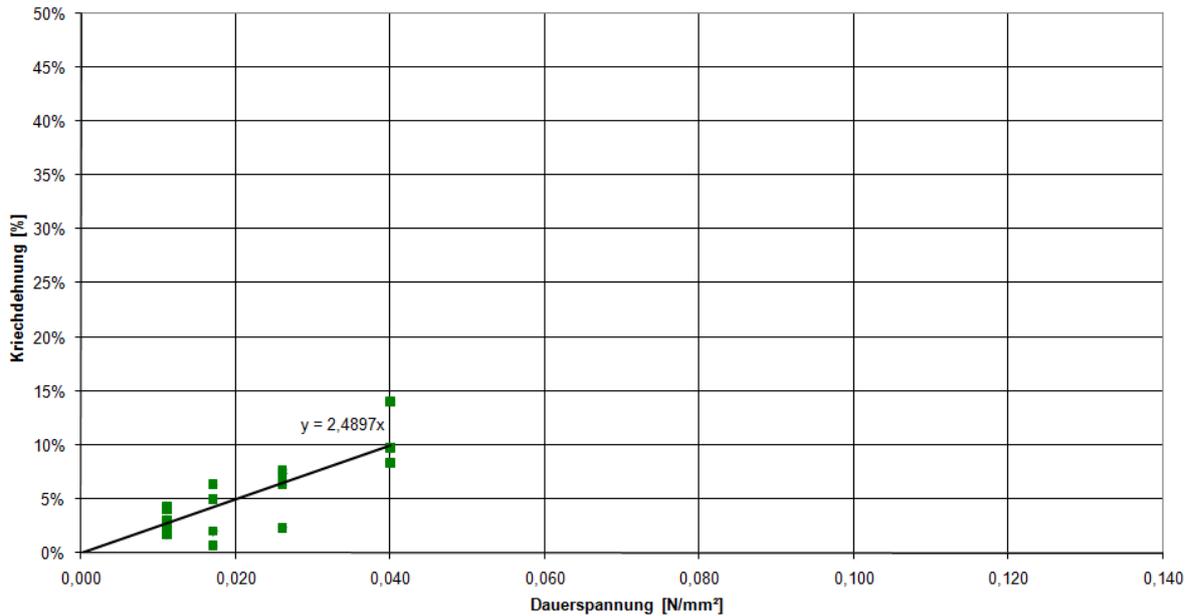


Diagramm 7: Silikon A, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung quer zur Klebstoffuge unter 20 °C

Abgesehen von den Streuungen der Einzelwerte kann ein linearer Zusammenhang zwischen der aufgetragenen Dauerlast und der Dehnung zufolge Kriechen hergestellt werden. Dieser lineare Zusammenhang kann zwischen 0 und 0,04 N/mm² Dauerlast beobachtet werden.

Aus dem anfänglichen Verformungsmodul aus den Untersuchungen der Referenzproben sowie der Verformung zufolge Kriechen kann ein kombinierter Schubmodul errechnet werden, der für die Verformungen unter Dauerlast rechnerisch herangezogen werden kann:

$$\gamma_{ges} = \tau \cdot \left(\frac{1}{G_{kurz}} + \frac{1}{G_{kriech}} \right)$$

$$\frac{1}{G_{ges}} = \frac{1}{G_{kurz}} + \frac{1}{G_{kriech}}$$

$$G_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{G_{kurz}} + \frac{1}{G_{kriech}}}$$

$$\gamma_{ges} = \tau \cdot G_{ges}$$

Für den Verformungsmodul zufolge Schubbelastung **längs der Klebstofffuge** ergibt sich:

$$1 / G_{\text{ges}} = 1 / G_{\text{kurz}} + 1 / G_{\text{kriech}} = 1 / 0,37 + 2,2259 = 4,93 \text{ [1 / (N / mm}^2\text{)]}$$

$$\mathbf{G_{\text{ges}} = 0,20 \text{ [N / mm}^2\text{]}}$$

Für den Verformungsmodul zufolge Schubbelastung **quer zur Klebstofffuge** ergibt sich:

$$1 / G_{\text{ges}} = 1 / G_{\text{kurz}} + 1 / G_{\text{kriech}} = 1 / 0,37 + 2,4897 = 5,19 \text{ [1 / (N / mm}^2\text{)]}$$

$$\mathbf{G_{\text{ges}} = 0,19 \text{ [N / mm}^2\text{]}}$$

Erhöhte Temperatur 55 °C

Aufgrund der geringeren möglichen Anzahl an Einzelversuchen wurden unter 55 °C nur Schubversuche längs der Klebstofffuge durchgeführt:

Tabelle 3: Dauerspannungsniveaus der Kriechuntersuchungen

Belastungsrichtung	Anzahl Prüfkörper	Dauerspannungsniveaus [N / mm ²]
Längs zur Fuge	4	0,011
Längs zur Fuge	4	0,017
Längs zur Fuge	2	0,026
Längs zur Fuge	3	0,040
Längs zur Fuge	2	0,066
Längs zur Fuge	2	0,132
Summe	17	

Bei dem Dauerspannungsniveau von 0,132 N / mm² zeigte sich ein Versagen der Klebstoffverbindung bei einem der beiden Prüfkörper nach 42 Tagen. Die Dauerlast wurde zu hoch gewählt, um abgetragen zu werden. Eine Reduktion der Dauerspannungen ist unbedingt erforderlich. In Diagramm 8 ist auch unter erhöhten Temperaturen deutlich erkennbar, dass der Kriechvorgang nach 90 Tagen bei einem Spannungsniveau von 0,066 N/mm² noch nicht abgeschlossen ist. Auch hier ist die Dauerschubspannung auf **0,040 N/mm²** zu begrenzen.

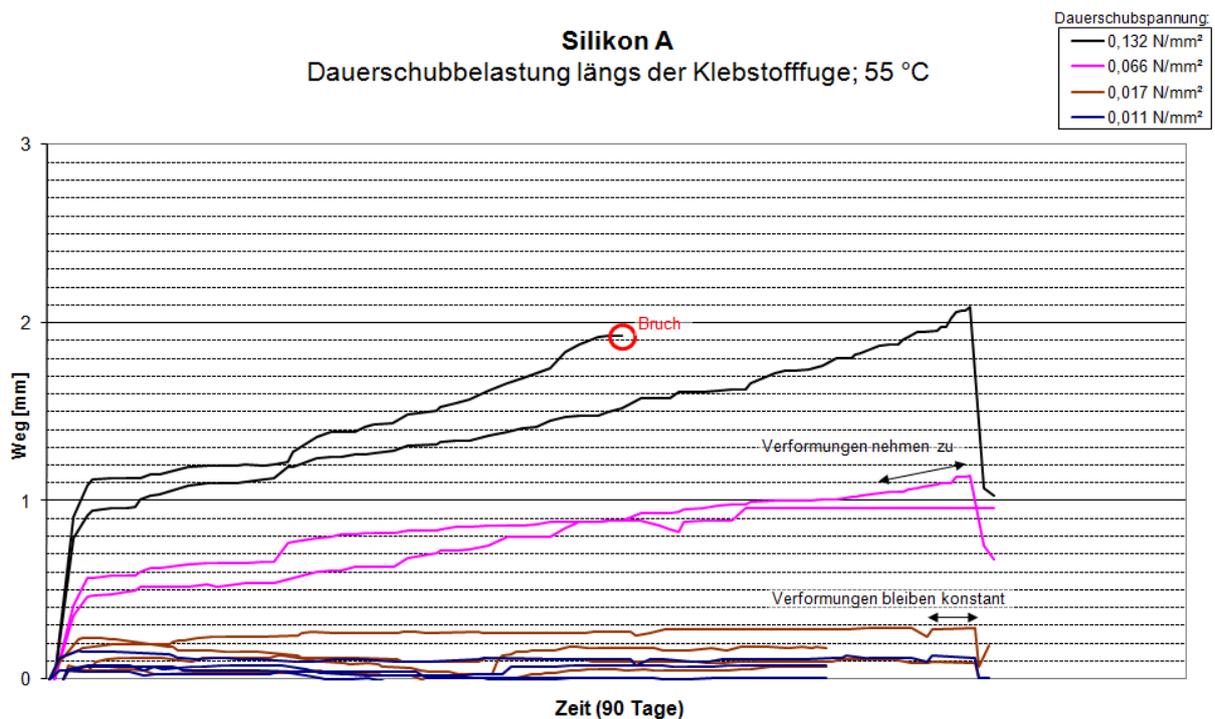


Diagramm 8: Silikon A, Dauerschubbelastung der Klebstofffuge, Schub längs unter 55 °C

Silikon A
Dauerschubbelastung längs der Klebstofffuge; 90 Tage; 55 °C

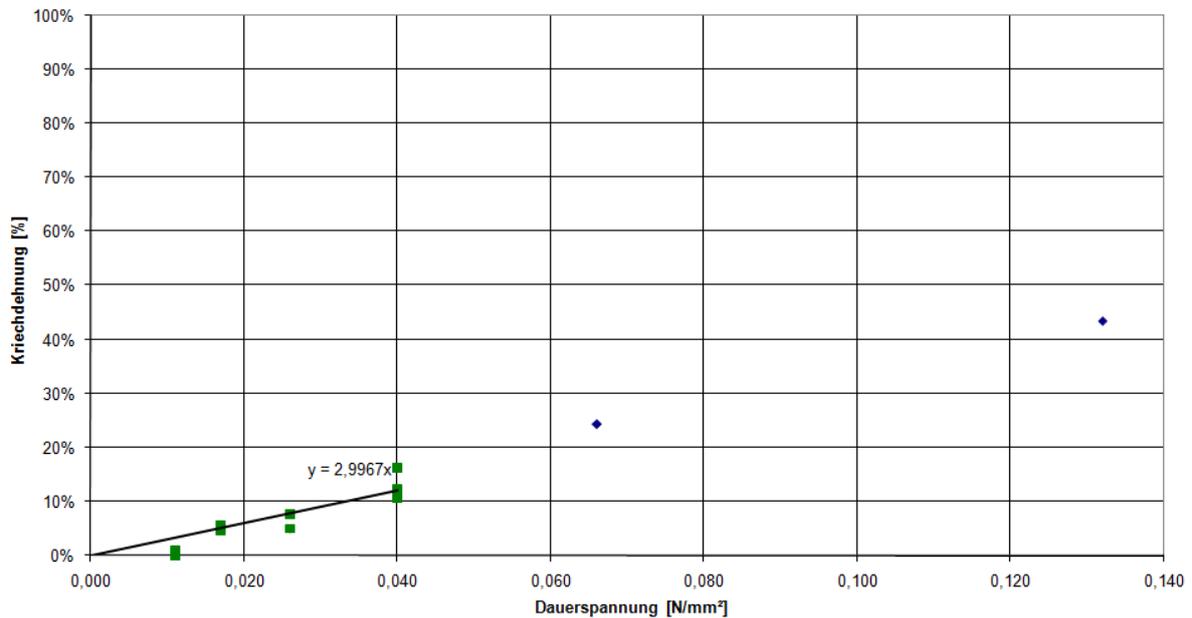


Diagramm 9: Silikon A, Enddehnung der Klebstofffuge nach 90-tägiger Schubbelastung längs der Klebstofffuge unter 55 °C

Abgesehen von den Streuungen der Einzelwerte kann ein linearer Zusammenhang zwischen der aufgetragenen Dauerlast und der Dehnung zufolge Kriechen hergestellt werden. Dieser lineare Zusammenhang kann zwischen 0 und 0,04 N/mm² Dauerlast beobachtet werden.

Analog zur Berechnung unter Kapitel „Normklima 20 °C/ 65 % RF“ kann ein Schubmodul für die Dauerbelastung unter erhöhter Temperatur berechnet werden:

$$1 / G_{\text{ges}} = 1 / G_{\text{kurz}} + 1 / G_{\text{kriech}} = 1 / 0,37 + 2,9967 = 5,699 \text{ [1 / (N / mm}^2\text{)]}$$

$$G_{\text{ges}} = 0,18 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

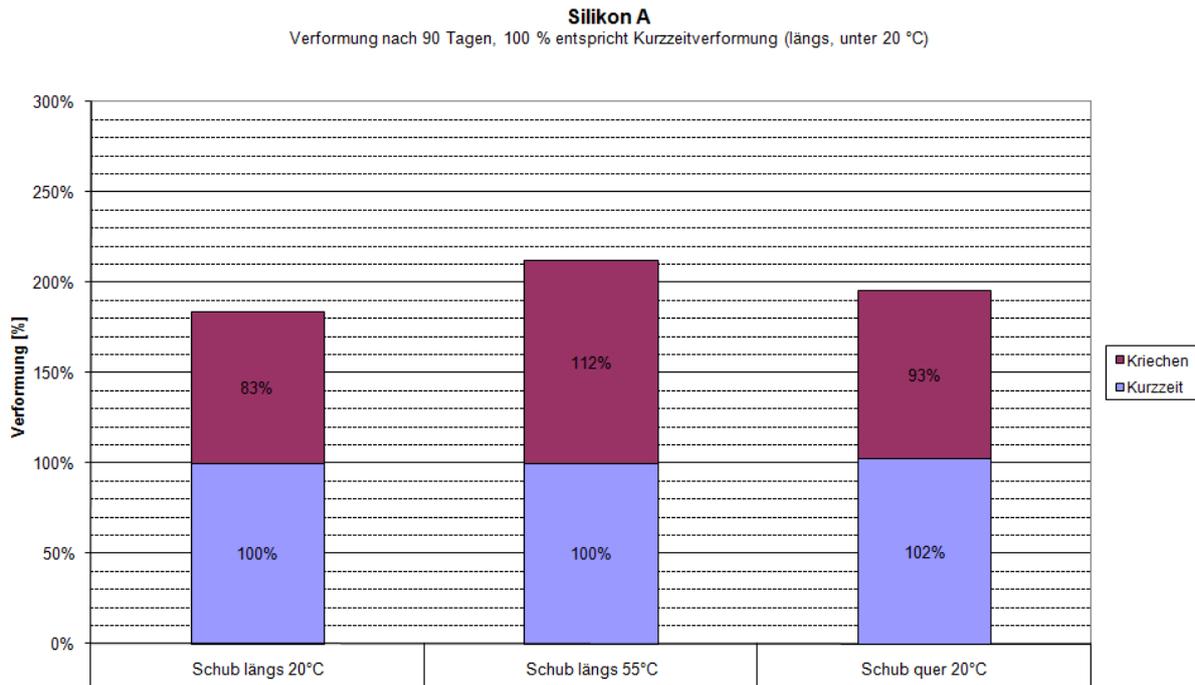


Diagramm 10: Silikon A, Erhöhte Verformung zufolge Dauerlast

Restfestigkeiten nach Dauerlastversuch

Im Anschluss an die Untersuchung des Kriechverhaltens unter Dauerlast wurden die Klebstoffproben noch einer Bruchuntersuchung unterzogen. Hierbei wurden die Proben analog zu den Referenzversuchen im Klimaraum bei 20 °C / 65 % RF klimatisiert und anschließend geprüft.

Die erreichten Werte sind folgenden Tabellen zu entnehmen:

Belastung auf Schub längs zur Klebstoffuge, aus Dauerlastversuchen 20 °C:

Silikon A, nach Dauerlast (Kriechen) 20 °C, Belastungsrichtung Schub längs
 Anzahl der Prüfkörper: **n = 8**
 Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,969 \text{ N / mm}^2$**
 Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 0,970 \text{ N / mm}^2$**
 Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,069 \text{ N / mm}^2$**
 5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,832 \text{ N / mm}^2$**
 Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
 Mittlere Bruchdehnung: **e = 276 %**
 Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,37 N / mm²**

Belastung auf Schub quer zur Klebstoffuge, aus Dauerlastversuchen 20 °C:

Silikon A, nach Dauerlast (Kriechen) 20 °C, Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 7**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,775 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,808 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,142 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,465 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 217 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,37 N / mm²**

Belastung auf Schub längs zur Klebstoffuge, aus Dauerlastversuchen 55 °C:

Silikon A, nach Dauerlast (Kriechen) 55 °C, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 4**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,949 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,945 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,028 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,883 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 299 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,33 N / mm²**

Geometrie der Klebefuge

Geänderte Klebefugendimension (Breite = 19 mm)

Die Untersuchungen an geänderter Klebefugengeometrie wurden wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt und analog zu Kapitel „Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)“ ausgewertet.

Belastung auf Zug

Silikon A, geänd. Klebefugenbreite, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 1,043 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 1,070 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,094 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,823 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 93 %**

Belastung auf Schub längs der Klebstoffuge

Silikon A, geänd. Klebefugenbreite, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 1,140 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 1,113 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,075 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,965 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 280 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,42 N / mm²**

Belastung auf Schub quer zur Klebstoffuge

Silikon A, geänd. Klebefugenbreite, Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 1,147 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 1,171 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,061 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 1,004 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 249 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,48 N / mm²**

Umwelteinflüsse

Restfestigkeiten nach Wasserlagerung

Die Untersuchungen an wassergelagerten Klebefugen wurden wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt und analog zu Kapitel „Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)“ ausgewertet.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind folgender Tabelle zu entnehmen:

Belastung auf Zug, Versuchsreihe 1: feucht-warm (FW)

Silikon A, Wasserlagerung feucht-warm, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,700 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,679 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,051 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,581 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: 5 % kohäsiver Bruch im Klebstoff,
95 % Adhäsionsbrüche zwischen Klebstoff und Holz

Belastung auf Zug, Versuchsreihe 2: rückgetrocknet (RG)

Silikon A, Wasserlagerung rückgetrocknet, Belastungsrichtung Zug

Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**

Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,868 \text{ N / mm}^2$**

Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,836 \text{ N / mm}^2$**

Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,078 \text{ N / mm}^2$**

5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,687 \text{ N / mm}^2$**

Bruchart: 5 % kohäsiver Bruch im Klebstoff,
95 % Adhäsionsbrüche zwischen Klebstoff und Holz



Abbildung 21: Bruchbild der Referenzproben



Abbildung 22: Bruchbild nach der Wasserlagerung

Es zeigt sich vermehrt adhäsives Bruchbild an den Grenzflächen zwischen Klebstoff und Holz. Die Festigkeiten reduzieren sich im Zustand feucht-warm um 22 %, erreichen im rückgetrockneten Zustand wieder 97 % der Festigkeiten der Referenzproben. Die Festigkeiten bleiben trotz adhäsiveren Bruchverhalten weitgehend erhalten.

4.1.2.2 Silikon B

Der Klebstoff Silikon B ist ein neutraler, kondensationsvernetzender Silikonkleb- und -dichtstoff. Zum Einsatz kam eine Klebstofffugendicke von 6 mm. Diese dickere Klebstofffugendicke bietet geringere Steifigkeiten, bewirkt jedoch kleinere Eigenspannungen zufolge Zwängungen aus Temperaturänderung und Schwind- und Quellverhalten.

Belastungsdauer der Klebstoffuge

Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)

Die Versuche wurden in drei Belastungsrichtungen (Zug, Schub längs und Schub quer zur Klebstoffuge) wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt. Ermittelt wurde hierbei die maximal erreichte Bruchspannung und die dabei zurückgelegte Bruchdehnung. Zusätzlich wurden bei der Belastung auf Schub jeweils der linear-elastische Teil des Spannungs-Dehnungsdiagramms zur Ermittlung des Schubmoduls herangezogen. Dieser bildet die Grundlagen für das Bemessungsmodell in Kapitel „Rechenmodelle zur Prognose der Spannungen und Verformungen im Wandscheibenelement“. Die Verformbarkeit des Klebstoffs unter Zugbelastung hat auf die Bemessung des Wandscheibenelements keinen Einfluss und wurde daher nicht gesondert betrachtet.

Belastung auf Zug

<p>Silikon B, Kurzzeitbelastung (Referenzwerte), Belastungsrichtung Zug Anzahl der Prüfkörper: n = 5 Mittlere Bruchspannung: $m_x = 0,783 \text{ N / mm}^2$ Median der Bruchspannung: $m_{\text{med}} = 0,776 \text{ N / mm}^2$ Standardabweichung der Bruchspannung: $s_x = 0,043 \text{ N / mm}^2$ 5-% Quantilwert der Bruchspannung: $R_{u,5} = 0,683 \text{ N / mm}^2$ Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff Mittlere Bruchdehnung: e = 77 %</p>

Belastung auf Schub längs der Klebstoffuge

<p>Silikon B, Kurzzeitbelastung (Referenzwerte), Belastungsrichtung Schub längs Anzahl der Prüfkörper: n = 5 Mittlere Bruchspannung: $m_x = 0,875 \text{ N / mm}^2$ Median der Bruchspannung: $m_{\text{med}} = 0,864 \text{ N / mm}^2$ Standardabweichung der Bruchspannung: $s_x = 0,084 \text{ N / mm}^2$ 5-% Quantilwert der Bruchspannung: $R_{u,5} = 0,679 \text{ N / mm}^2$ Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff Mittlere Bruchdehnung: e = 159 % Mittlerer Verformungsmodul: G = 0,50 N / mm²</p>

Belastung auf Schub quer zur Klebstoffuge

Silikon B, Kurzzeitbelastung (Referenzwerte), Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 10**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,649 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,658 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,035 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,583 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 146 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,46 N / mm²**

Zyklische Belastung

Die Untersuchungen unter zyklischer Belastung wurden wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt und analog zu Kapitel „Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)“ ausgewertet.

Belastung auf Zug

Versuchsreihe 1: $\sigma_{des} = R_{u,5} / 6 = 0,683 / 6 = 0,114 \text{ N / mm}^2$

Silikon B, Zyklische Belastung VR 1, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,902 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,922 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,070 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,739 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 73 %**

Versuchsreihe 2: $\sigma_{des} = R_{u,5} / 3 = 0,683 / 3 = 0,228 \text{ N / mm}^2$

Silikon B, Zyklische Belastung VR 2, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,848 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,840 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,091 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,636 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 59 %**

Belastung auf Schub längs zur Klebstoffuge

Versuchsreihe 1: $\tau_{des} = R_{u,5} / 6 = 0,679 / 6 = 0,113 \text{ N / mm}^2$

Silikon B, Zyklische Belastung VR 1, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,805 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 0,809 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,091 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,594 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 160 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,48 N / mm²**

Versuchsreihe 2: $\tau_{des} = R_{u,5} / 3 = 0,679 / 3 = 0,226 \text{ N / mm}^2$

Silikon B, Zyklische Belastung VR 2, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,884 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 0,910 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,051 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,765 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 149 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,55 N / mm²**

Belastung auf Schub quer zur Klebstoffuge

Versuchsreihe 1: $\tau_{des} = R_{u,5} / 6 = 0,583 / 6 = 0,097 \text{ N / mm}^2$

Silikon B, Zyklische Belastung VR 1, Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,880 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 0,851 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,074 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,709 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 179 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,53 N / mm²**

Versuchsreihe 2: $\tau_{des} = R_{u,5} / 3 = 0,611 / 3 = 0,194 \text{ N / mm}^2$

Silikon B, Zyklische Belastung VR 2, Belastungsrichtung Schub quer
 Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
 Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,835 \text{ N / mm}^2$**
 Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 0,821 \text{ N / mm}^2$**
 Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,127 \text{ N / mm}^2$**
 5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,538 \text{ N / mm}^2$**
 Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
 Mittlere Bruchdehnung: **e = 179 %**
 Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,50 N / mm²**

Dauerlast (Kriechen)

Die Untersuchungen unter Dauerlast wurden wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt und ausgewertet.

Normklima 20 °C/ 65 % RF

Folgende Belastungskombinationen wurden durchgeführt:

Tabelle 4: Dauerspannungsniveaus der Kriechuntersuchungen

Belastungsrichtung	Anzahl Prüfkörper	Dauerspannungsniveaus [N / mm ²]
Längs zur Fuge	6	0,011
Längs zur Fuge	6	0,017
Längs zur Fuge	5	0,026
Längs zur Fuge	5	0,040
Längs zur Fuge	5	0,065
Quer zur Fuge	6	0,011
Quer zur Fuge	6	0,017
Quer zur Fuge	6	0,026
Quer zur Fuge	5	0,040
Summe	50	

In Diagramm 11 ist deutlich erkennbar, dass sich bei den Dauerspannungsniveaus von über 0,04 N / mm² eine kontinuierliche Zunahme der Verformungen auch bei Beendigung der Untersuchung nach 90 Tagen zeigt. Diese Verformungszunahme könnte irgendwann zum Versagen der Verbindung führen und muss vermieden werden. Unterhalb dieses Spannungsniveaus bleibt die Verformung nach 90 Tagen konstant. Für eine Dauerschubbelastung der Klebstoffuge oberhalb von 0,04 N/mm² wären längere Untersuchungen notwendig, welche in dieser Arbeit nicht durchgeführt wurden. Die maximale Dauerschubbelastung ist daher auf **0,04 N/mm²** zu begrenzen.

Die beiden Klimatisierungsausfälle zeigen weiters deutlich, welchen Einfluss die Umgebungstemperatur auf das Verformungsverhalten der Klebstoffuge hat.

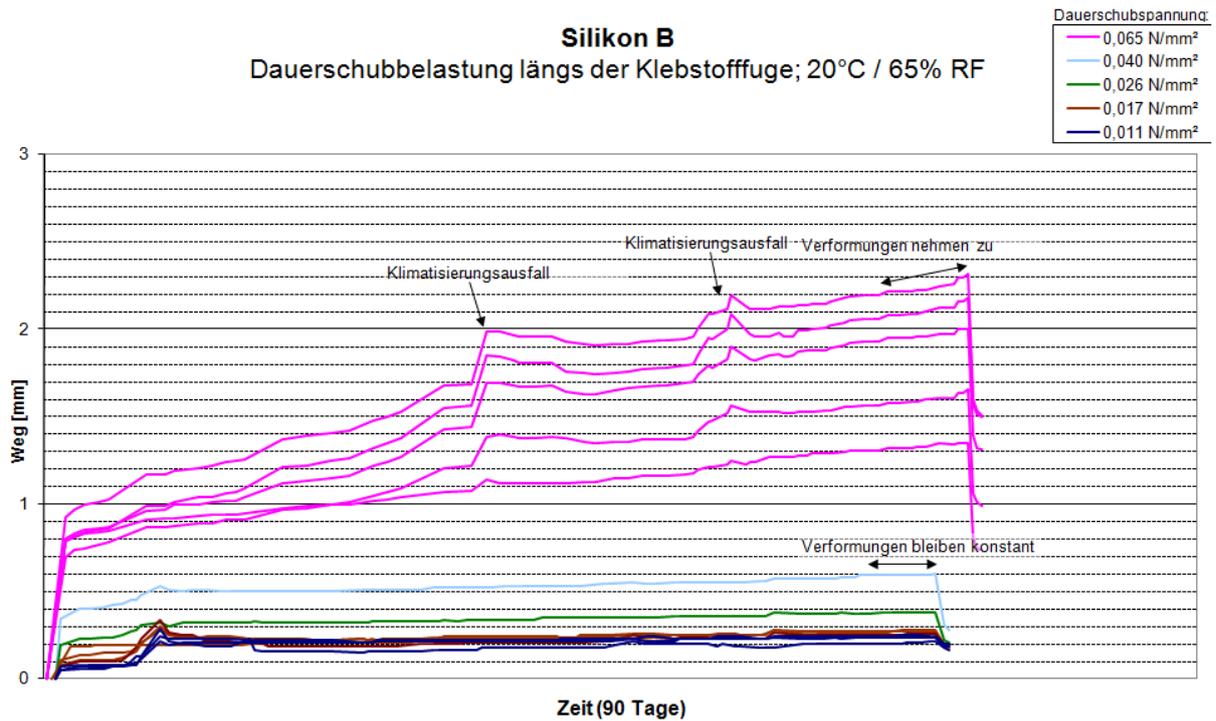


Diagramm 11: Silikon B, Dauerschubbelastung der Klebstofffuge, Schub längs unter 20 °C

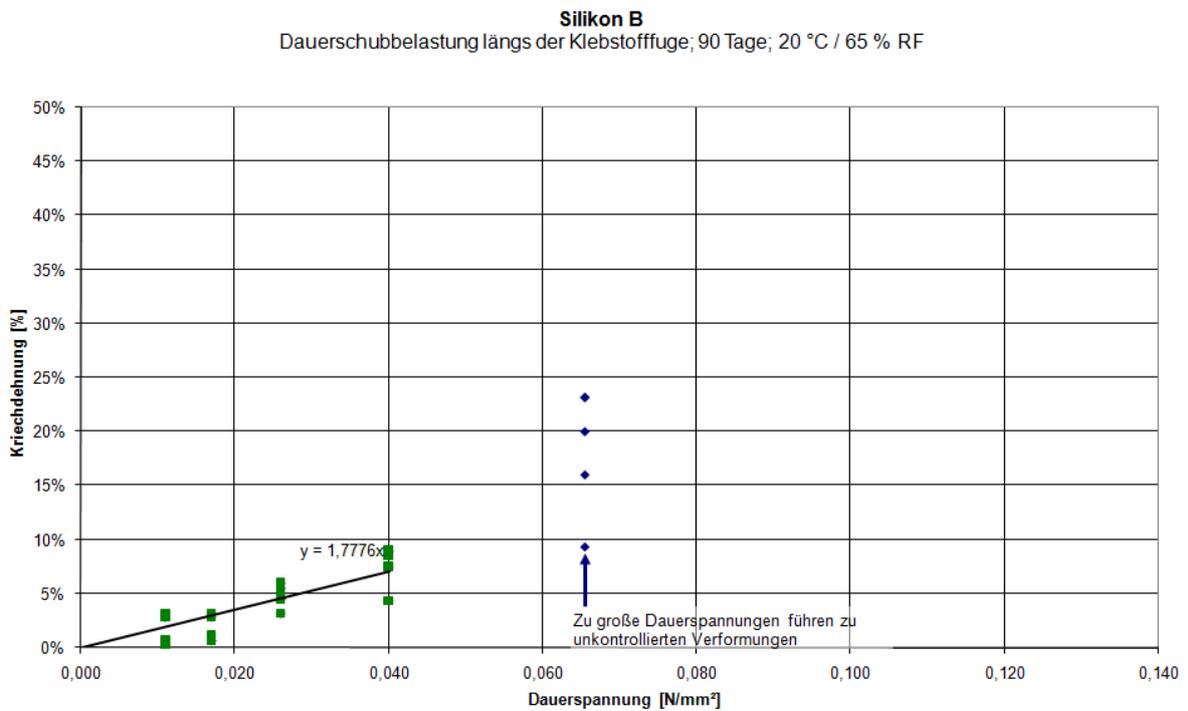


Diagramm 12: Silikon B, Enddehnung der Klebstofffuge nach 90-tägiger Schubbelastung längs der Klebstofffuge unter 20 °C

Silikon B
Dauerschubbelastung quer zur Klebstoffuge; 90 Tage; 20 °C / 65 % RF

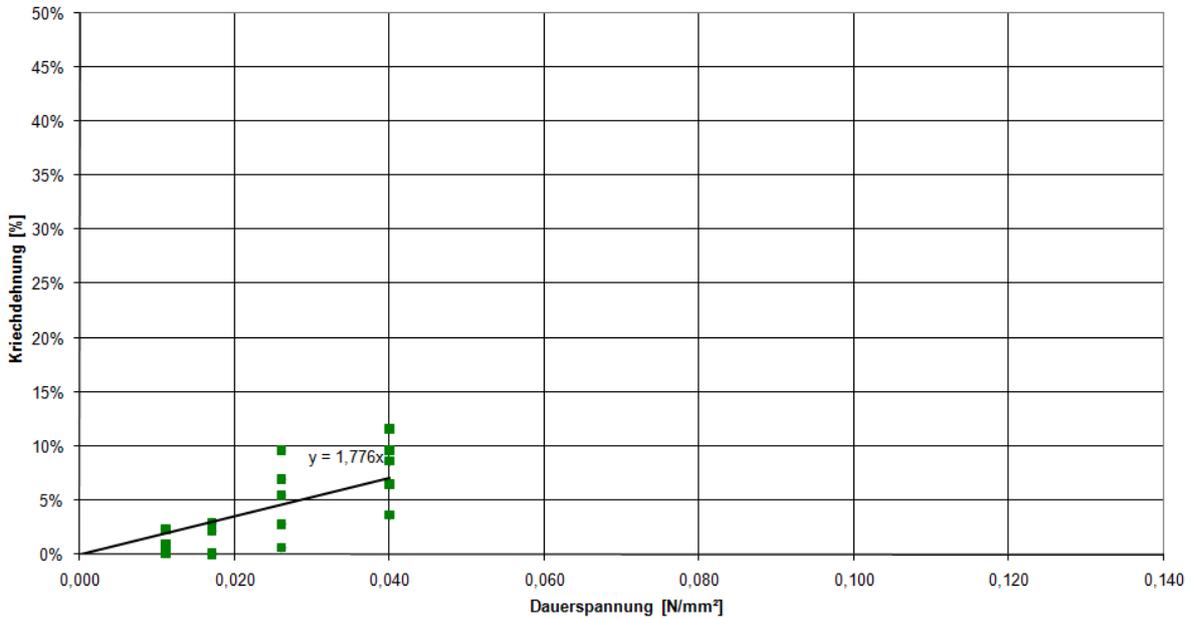


Diagramm 13: Silikon B, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung quer zur Klebstoffuge unter 20 °C

Abgesehen von den Streuungen der Einzelwerte kann ein linearer Zusammenhang zwischen der aufgetragenen Dauerlast und der Dehnung zufolge Kriechen hergestellt werden. Dieser lineare Zusammenhang kann zwischen 0 und 0,04 N/mm² Dauerlast beobachtet werden.

Aus dem anfänglichen Verformungsmodul aus den Untersuchungen der Referenzproben sowie der Verformung zufolge Kriechen kann, wie unter Kapitel „Silikon A - Dauerlast (Kriechen)“ ein kombinierter Schubmodul errechnet werden, der für die Verformungen unter Dauerlast rechnerisch herangezogen werden kann.

Für den Verformungsmodul zufolge Schubbelastung längs der Klebstoffuge ergibt sich:

$$1 / G_{\text{ges}} = 1 / G_{\text{kurz}} + 1 / G_{\text{kriech}} = 1 / 0,50 + 1,7776 = 3,778 \text{ [1 / (N / mm}^2\text{)]}$$

$$G_{\text{ges}} = 0,27 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

Für den Verformungsmodul zufolge Schubbelastung quer zur Klebstoffuge ergibt sich:

$$1 / G_{\text{ges}} = 1 / G_{\text{kurz}} + 1 / G_{\text{kriech}} = 1 / 0,46 + 1,776 = 3,950 \text{ [1 / (N / mm}^2\text{)]}$$

$$G_{\text{ges}} = 0,25 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

Erhöhte Temperatur 55 °C

Aufgrund der geringeren möglichen Anzahl an Einzelversuchen wurden unter 55 °C nur Schubversuche längs der Klebstofffuge durchgeführt:

Tabelle 5: Dauerspannungsniveaus der Kriechuntersuchungen

Belastungsrichtung	Anzahl Prüfkörper	Dauerspannungsniveaus [N / mm ²]
Längs zur Fuge	4	0,011
Längs zur Fuge	5	0,017
Längs zur Fuge	3	0,026
Längs zur Fuge	4	0,040
Längs zur Fuge	2	0,066
Längs zur Fuge	2	0,132
Summe	20	

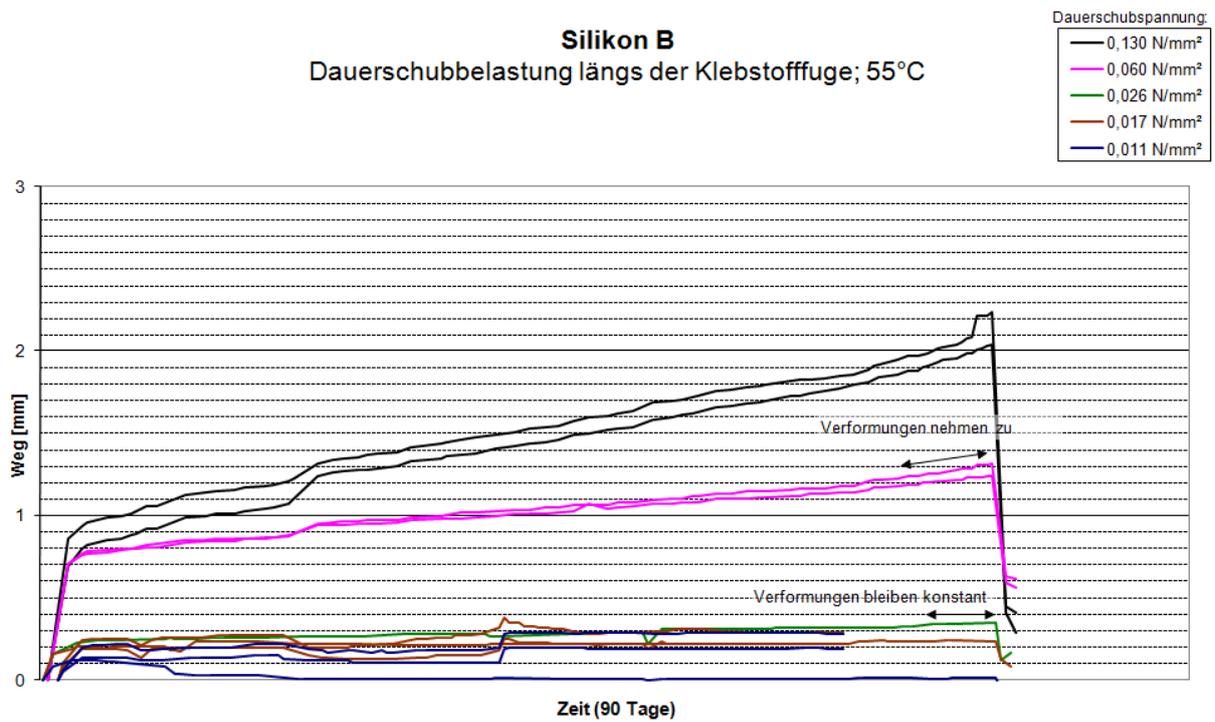


Diagramm 14: Silikon B, Dauerschubbelastung der Klebstofffuge, Schub längs unter 55 °C

Silikon B
Dauerschubbelastung längs der Klebstofffuge; 90 Tage; 55 °C

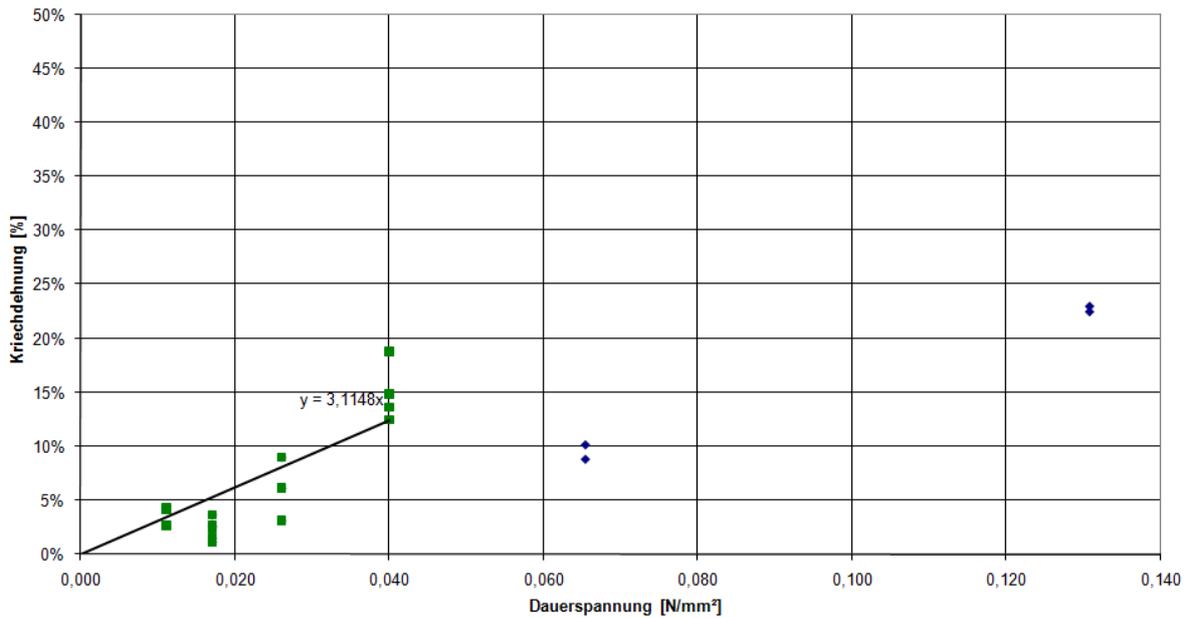


Diagramm 15: Silikon B, Enddehnung der Klebstofffuge nach 90-tägiger Schubbelastung längs der Klebstofffuge unter 55 °C

Abgesehen von den Streuungen der Einzelwerte kann ein linearer Zusammenhang zwischen der aufgetragenen Dauerlast und der Dehnung zufolge Kriechen hergestellt werden. Dieser lineare Zusammenhang kann zwischen 0 und 0,04 N/mm² Dauerlast beobachtet werden.

Analog zur Berechnung unter Kapitel „Silikon A - Dauerlast (Kriechen)“ kann ein Schubmodul für die Dauerbelastung unter erhöhter Temperatur berechnet werden:

$$1 / G_{\text{ges}} = 1 / G_{\text{kurz}} + 1 / G_{\text{kriech}} = 1 / 0,50 + 3,1148 = 5,115 \text{ [1 / (N / mm}^2\text{)]}$$

$$G_{\text{ges}} = 0,20 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

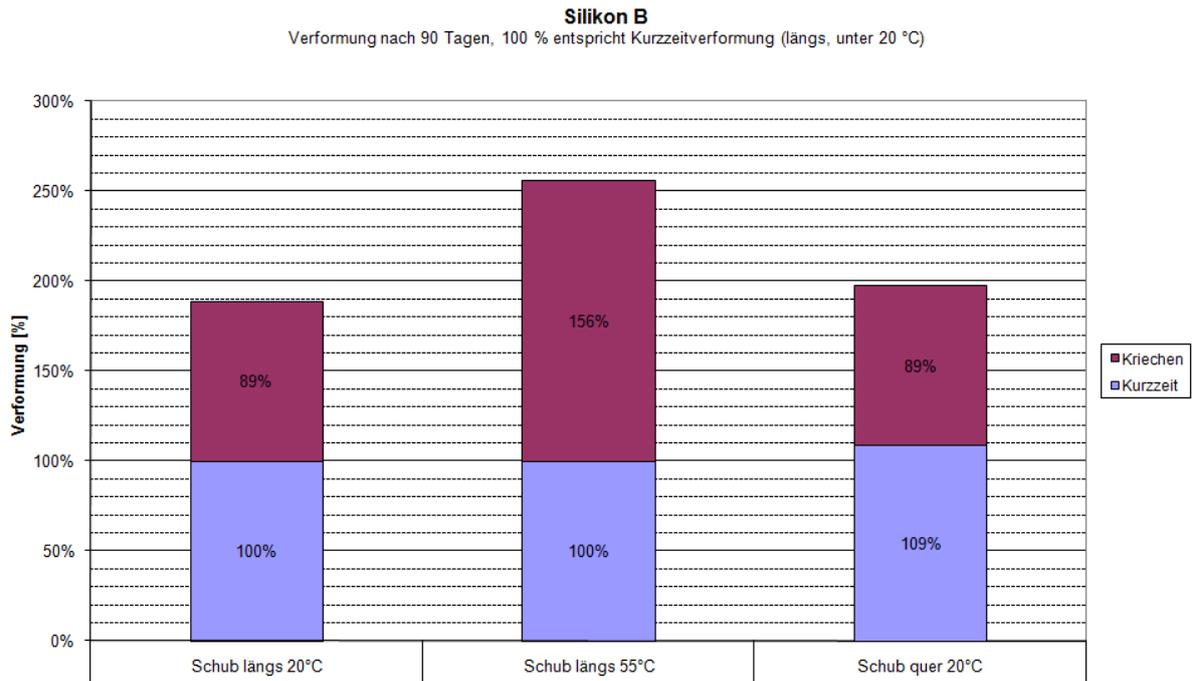


Diagramm 16: Silikon B, Erhöhte Verformung zufolge Dauerlast

Die Dauerlastverformungen der beiden im Projekt behandelten Silikonklebstoffe sind sehr ähnlich. Insbesondere unter einer Temperatur von 20 °C ist bei beiden Klebstoffen eine Steifigkeitsabnahme um 83 bis 93 % erkennbar. Der in diesem Kapitel behandelte Klebstoff zeigt eine etwas größere Temperaturabhängigkeit unter Dauerlast. Die Abnahme der Steifigkeit ist um 17 % größer als beim anderen Silikonklebstoff. Dieser Umstand kann mit der dickeren Klebstoffschicht von 6 mm in Verbindung stehen.

Restfestigkeiten nach Dauerlastversuch

Im Anschluss an die Untersuchung des Kriechverhaltens unter Dauerlast wurden die Klebstoffproben noch einer Bruchuntersuchung unterzogen. Hierbei wurden die Proben analog zu den Referenzversuchen im Klimaraum bei 20 °C / 65 % klimatisiert und anschließend geprüft.

Die erreichten Werte sind folgenden Tabellen zu entnehmen:

Belastung auf Schub längs zur Klebstoffuge, aus Dauerlastversuchen 20 °C:

Silikon B, nach Dauerlast (Kriechen) 20 °C, Belastungsrichtung Schub längs
 Anzahl der Prüfkörper: **n = 8**
 Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,765 \text{ N / mm}^2$**
 Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,780 \text{ N / mm}^2$**
 Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,078 \text{ N / mm}^2$**
 5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,609 \text{ N / mm}^2$**
 Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
 Mittlere Bruchdehnung: **e = 167 %**
 Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,49 N / mm²**

Belastung auf Schub quer zur Klebstoffuge, aus Dauerlastversuchen 20 °C:

Silikon B, nach Dauerlast (Kriechen) 20 °C, Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 6**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,749 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,756 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,093 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,545 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 149 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,48 N / mm²**

Belastung auf Schub längs zur Klebstoffuge, aus Dauerlastversuchen 55 °C:

Silikon B, nach Dauerlast (Kriechen) 55 °C, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 3**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,722 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,709 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,028 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,656 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 165 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,43 N / mm²**

Geometrie der Klebefuge

Geänderte Klebefugendimension (Breite = 19 mm)

Die Untersuchungen an geänderter Klebefugengeometrie wurden wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt und analog zu Kapitel „Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)“ ausgewertet.

Belastung auf Zug

Silikon B, geänd. Klebefugenbreite, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 1,067 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 1,090 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,098 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,839 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 56 %**

Belastung auf Schub längs der Klebstofffuge

Silikon B, geänd. Klebefugenbreite, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,957 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,977 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,095 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,735 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 165 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,56 N / mm²**

Belastung auf Schub quer zur Klebstofffuge

Silikon B, geänd. Klebefugenbreite, Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,853 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,850 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,050 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,736 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
Mittlere Bruchdehnung: **e = 150 %**
Mittlerer Verformungsmodul: **G = 0,55 N / mm²**

Umwelteinflüsse

Restfestigkeiten nach Wasserlagerung

Die Untersuchungen an wassergelagerten Klebefugen wurden wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt und analog zu Kapitel „Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)“ ausgewertet.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind folgenden Tabellen zu entnehmen:

Belastung auf Zug, Versuchsreihe 1: feucht-warm (FW)

Silikon B, Wasserlagerung feucht-warm, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,760 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,722 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,085 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,562 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: 52 % kohäsiver Bruch im Holzsubstrat,
26 % kohäsiver Bruch im Klebstoff,
22 % adhäsiver Bruch zwischen Klebstoff und Holz

Belastung auf Zug, Versuchsreihe 2: rückgetrocknet (RG)

Silikon B, Wasserlagerung rückgetrocknet, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 0,876 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 0,844 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,080 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,689 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: 17 % kohäsiver Bruch im Holzsubstrat,
48 % kohäsiver Bruch im Klebstoff,
35 % adhäsiver Bruch zwischen Klebstoff und Holz

Es zeigt sich wie beim anderen Silikonklebstoff ein vermehrt adhäsives Bruchbild an den Grenzflächen zwischen Klebstoff und Holz. Beim Silikon B beträgt der Anteil der Adhäsionsbrüche jedoch nur 22 % bzw. 35 %.

Die Festigkeiten reduzieren sich im Zustand feucht-warm um durchschnittlich 3 %, erreichen im rückgetrockneten Zustand im Mittel wieder mehr als die Referenzproben. Die Festigkeiten bleiben auch hier trotz adhäsiveren Bruchverhalten erhalten.

4.1.2.3 Acrylat

Der Klebstoff Acrylat ist ein zweikomponentiger Acrylatklebstoff basierend auf der ADP-Technologie. Der Härtingsmechanismus geschieht durch Polymerisation.

Belastungsdauer der Klebstofffuge

Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)

Die Versuche wurden in drei Belastungsrichtungen (Zug, Schub längs und Schub quer zur Klebstofffuge) wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt. Ermittelt wurde hierbei die maximal erreichte Bruchspannung und die dabei zurückgelegte Bruchdehnung. Wegen des bilinearen Verhalten des Klebstoffs unter Schubbeanspruchung (vgl. Diagramm 18 - Diagramm 19) war die Ermittlung des Verformungsmoduls nur bedingt möglich und wurde nicht ausgewertet.

Belastung auf Zug

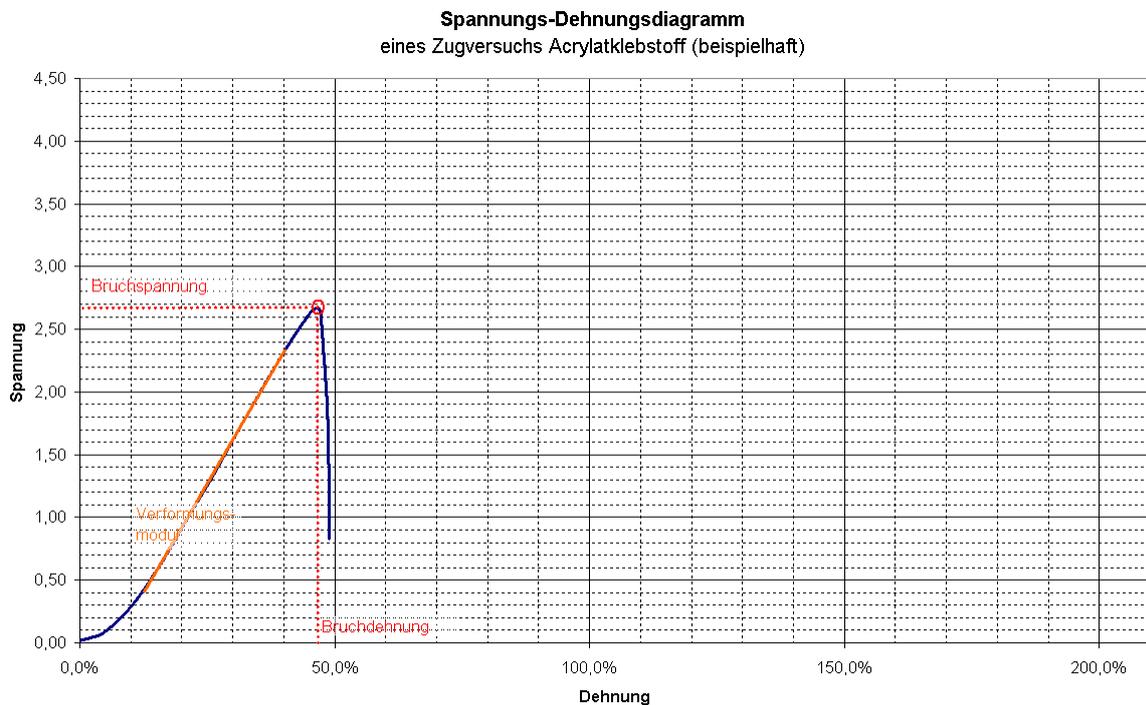


Diagramm 17: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Acrylatklebstoff unter Zugbelastung

Acrylat, Kurzzeitbelastung (Referenzwerte), Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 3,367 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 3,173 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,792 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 2,592 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: größtenteils kohäsiv im Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 33 %**

Belastung auf Schub längs der Klebstofffuge

Bei der Belastung auf Schub wurde jeweils der linear-elastische Teil des Spannungs-Dehnungsdiagramms zur Ermittlung des Schubmoduls herangezogen. Des Weiteren wurde die maximal erreichte Bruchlast und die dabei zurückgelegte Bruchdehnung ermittelt. Die Belastung erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm / min und einer Vorkraft von 15 N.

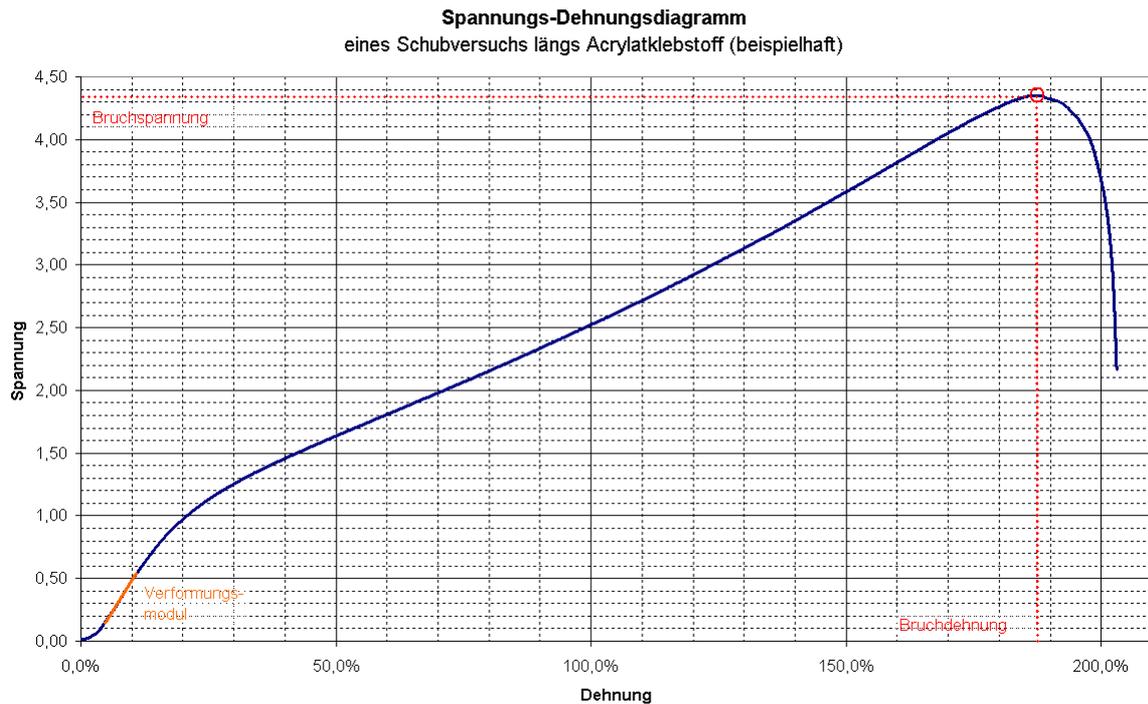


Diagramm 18: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Acrylatklebstoff unter Schubbelastung längs der Klebstofffuge

Acrylat, Kurzzeitbelastung (Referenzwerte), Belastungsrichtung Schub längs

Anzahl der Prüfkörper: **$n = 5$**

Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 3,602 \text{ N / mm}^2$**

Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 3,603 \text{ N / mm}^2$**

Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,499 \text{ N / mm}^2$**

5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 3,034 \text{ N / mm}^2$**

Bruchart: großteils Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holzsubstrat

Mittlere Bruchdehnung: **$e = 168 \%$**

Belastung auf Schub quer zur Klebstoffuge

Bei der Belastung auf Schub wurde jeweils der linear-elastische Teil des Spannungs-Dehnungsdiagramms zur Ermittlung des Schubmoduls herangezogen. Des Weiteren wurde die maximal erreichte Bruchlast und die dabei zurückgelegte Bruchdehnung ermittelt. Die Belastung erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm / min und einer Vorkraft von 15 N.

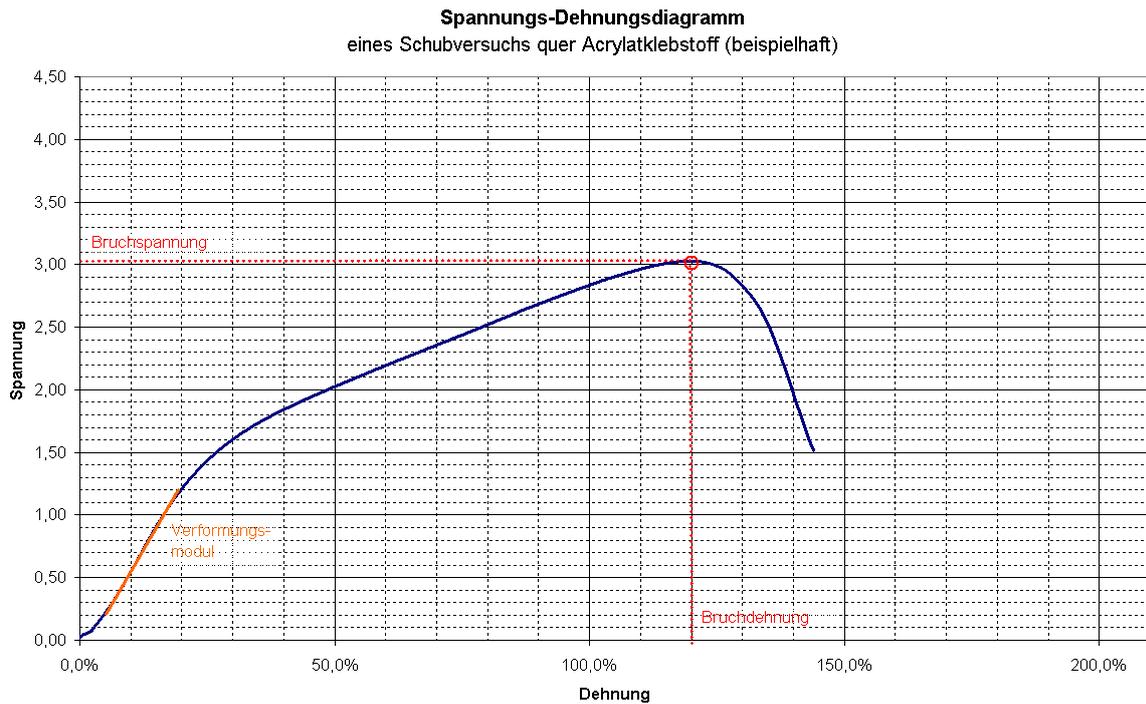


Diagramm 19: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Acrylatklebstoff unter Schubbelastung quer zur Klebstoffuge

Acrylat, Kurzzeitbelastung (Referenzwerte), Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 3,620 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 3,579 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,588 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 3,014 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: großteils Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 160 %**

Zyklische Belastung

Die Untersuchungen unter zyklischer Belastung wurden wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt und analog zu Kapitel „Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)“ ausgewertet.

Belastung auf Zug

$$\text{Versuchsreihe 1: } \sigma_{des} = R_{u,5} / 6 = 2,592 / 6 = 0,432 \text{ N / mm}^2$$

Acrylat, Zyklische Belastung VR 1, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **m_x = 3,718 N / mm²**
Median der Bruchspannung: **m_{med} = 3,458 N / mm²**
Standardabweichung der Bruchspannung: **s_x = 0,607 N / mm²**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **R_{u,5} = 3,292 N / mm²**
Bruchart: größtenteils kohäsiv im Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 36 %**

$$\text{Versuchsreihe 2: } \sigma_{des} = R_{u,5} / 3 = 2,592 / 3 = 0,864 \text{ N / mm}^2$$

Acrylat, Zyklische Belastung VR 2, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **m_x = 3,392 N / mm²**
Median der Bruchspannung: **m_{med} = 3,262 N / mm²**
Standardabweichung der Bruchspannung: **s_x = 0,608 N / mm²**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **R_{u,5} = 2,792 N / mm²**
Bruchart: größtenteils kohäsiv im Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 43 %**

Belastung auf Schub längs zur Klebstofffuge

$$\text{Versuchsreihe 1: } \tau_{des} = R_{u,5} / 6 = 3,034 / 6 = 0,506 \text{ N / mm}^2$$

Acrylat, Zyklische Belastung VR 1, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **m_x = 3,907 N / mm²**
Median der Bruchspannung: **m_{med} = 4,022 N / mm²**
Standardabweichung der Bruchspannung: **s_x = 0,582 N / mm²**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **R_{u,5} = 3,195 N / mm²**
Bruchart: großteils Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 150 %**

Versuchsreihe 2: $\tau_{des} = R_{u,5} / 3 = 3,034 / 3 = 1,01 \text{ N / mm}^2$

Acrylat, Zyklische Belastung VR 2, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 4,361 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 4,597 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,545 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 3,730 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: großteils Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 126 %**

Belastung auf Schub quer zur Klebstoffuge

Versuchsreihe 1: $\tau_{des} = R_{u,5} / 6 = 3,014 / 6 = 0,502 \text{ N / mm}^2$

Acrylat, Zyklische Belastung VR 1, Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 3,910 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 3,711 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,713 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 3,380 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: großteils Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 144 %**

Versuchsreihe 2: $\tau_{des} = R_{u,5} / 3 = 3,014 / 3 = 1,005 \text{ N / mm}^2$

Acrylat, Zyklische Belastung VR 2, Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 4,567 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{med} = 4,489 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,373 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 4,239 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: großteils Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 157 %**

Dauerlast (Kriechen)

Die Untersuchungen unter Dauerlast wurden wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt und ausgewertet.

Normklima 20 °C/ 65 % RF

Folgende Belastungskombinationen wurden durchgeführt:

Tabelle 6: Dauerspannungsniveaus der Kriechuntersuchungen

Belastungsrichtung	Anzahl Prüfkörper	Dauerspannungsniveaus [N / mm ²]
Längs zur Fuge	5	0,011
Längs zur Fuge	6	0,017
Längs zur Fuge	6	0,026
Längs zur Fuge	6	0,040
Längs zur Fuge	5	0,300
Längs zur Fuge	6	0,600
Quer zur Fuge	6	0,017
Quer zur Fuge	6	0,026
Quer zur Fuge	6	0,040
Summe	52	

Bei den Dauerspannungsniveaus von 0,6 N / mm² zeigte sich ein Versagen der Klebstoffverbindung nach 1 bis 50 Tagen und ist untenstehender Tabelle zu entnehmen. Die Dauerlast wurde zu hoch gewählt, um abgetragen zu werden. Eine Reduktion der Dauerspannungen ist unbedingt erforderlich.

Tabelle 7: Versagenszeitpunkte der Kriechuntersuchungen

Prüfkörper	Dauerspannung [N/mm ²]	Versagenszeitpunkt [Tagen]
1	0,600	22
2	0,600	1
3	0,600	2
4	0,600	1
5	0,600	11
6	0,600	50

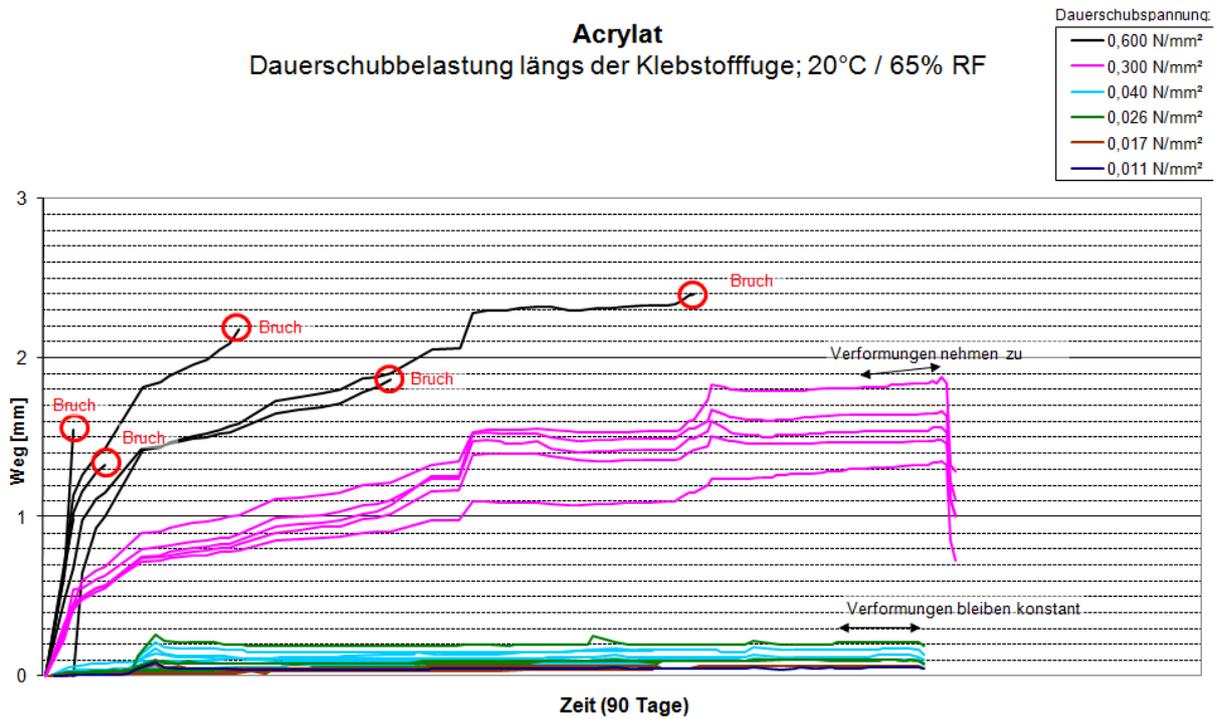


Diagramm 20: Acrylat, Dauerschubbelastung der Klebstofffuge, Schub längs unter 20 °C

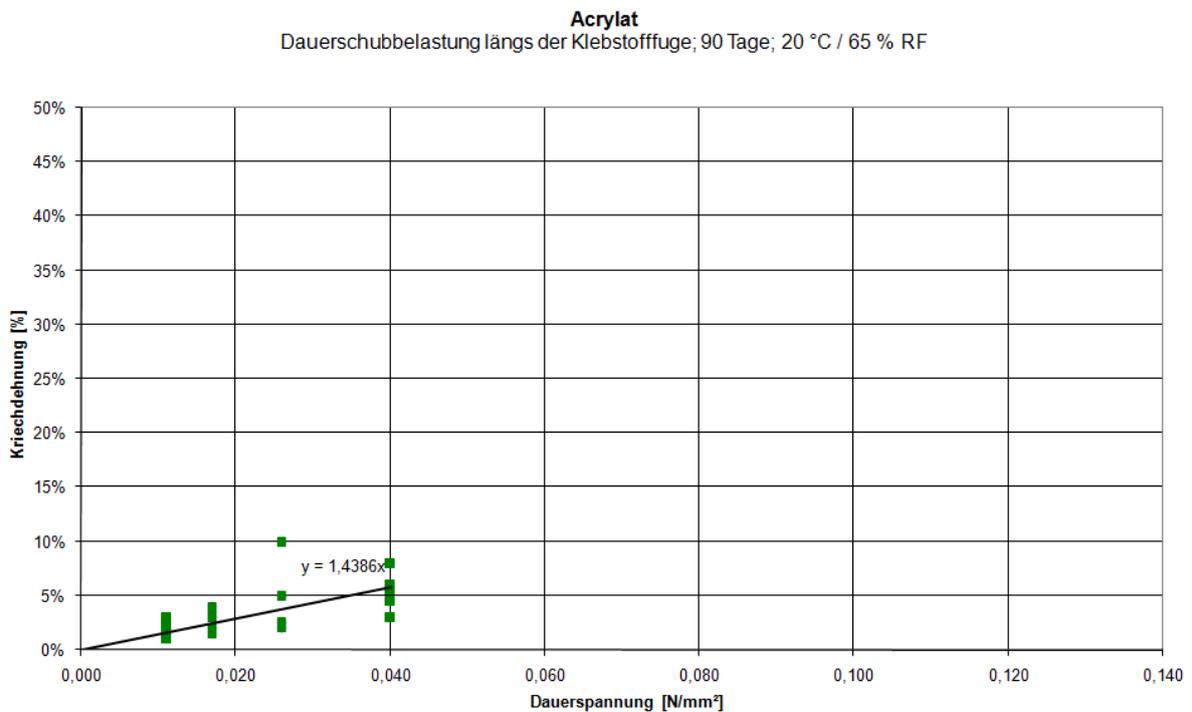


Diagramm 21: Acrylat, Enddehnung der Klebstofffuge nach 90-tägiger Schubbelastung längs der Klebstofffuge unter 20 °C

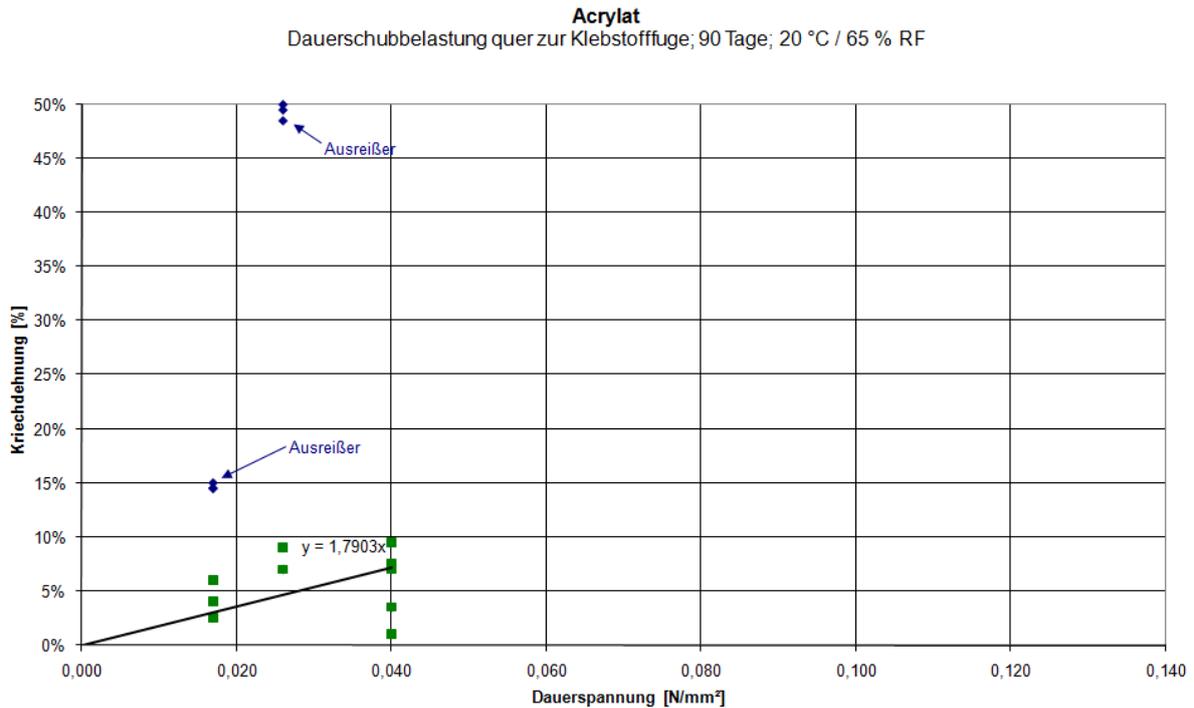


Diagramm 22: Acrylat, Enddehnung der Klebstofffuge nach 90-tägiger Schubbelastung quer zur Klebstofffuge

Abgesehen von den Streuungen der Einzelwerte kann ein linearer Zusammenhang zwischen der aufgetragenen Dauerlast und der Dehnung zufolge Kriechen hergestellt werden. Dieser lineare Zusammenhang kann zwischen 0 und 0,04 N/mm² Dauerlast beobachtet werden.

Die Ausreißerwerte (Diagramm 22) wurden durch fehlerhafte Anordnung der Messtechnik hervorgerufen und wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Aus dem anfänglichen Verformungsmodul aus den Untersuchungen der Referenzproben sowie der Verformung zufolge Kriechen kann, wie unter Kapitel „Silikon A“ ein kombinierter Schubmodul errechnet werden, der für die Verformungen unter Dauerlast rechnerisch herangezogen werden kann.

Für den Verformungsmodul zufolge Schubbelastung längs der Klebstofffuge ergibt sich:

$$1 / G_{\text{ges}} = 1 / G_{\text{kurz}} + 1 / G_{\text{kriech}} = 1 / 2,00 + 1,4386 = 1,94 \text{ [1 / (N / mm}^2\text{)]}$$

$$G_{\text{ges}} = 0,52 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

Für den Verformungsmodul zufolge Schubbelastung quer zur Klebstofffuge ergibt sich:

$$1 / G_{\text{ges}} = 1 / G_{\text{kurz}} + 1 / G_{\text{kriech}} = 1 / 2,00 + 1,7903 = 2,29 \text{ [1 / (N / mm}^2\text{)]}$$

$$G_{\text{ges}} = 0,44 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

Erhöhte Temperatur 55 °C

Aufgrund der geringeren möglichen Anzahl an Einzelversuchen wurden unter 55 °C nur Schubversuche längs der Klebstofffuge durchgeführt:

Tabelle 8: Dauerspannungsniveaus der Kriechuntersuchungen

Belastungsrichtung	Anzahl Prüfkörper	Dauerspannungsniveaus [N / mm²]
Längs zur Fuge	4	0,017
Längs zur Fuge	4	0,026
Längs zur Fuge	4	0,040
Längs zur Fuge	3	0,300
Längs zur Fuge	3	0,600
Summe	18	

Bei den Dauerspannungsniveaus von 0,3 und 0,6 N / mm² zeigte sich ein Versagen der Klebstoffverbindung nach 1 bis 9 Tagen und ist untenstehender Tabelle zu entnehmen. Die Dauerlast wurde zu hoch gewählt, um abgetragen zu werden. Eine Reduktion der Dauerspannungen ist unbedingt erforderlich.

Tabelle 9: Versagenszeitpunkte der Kriechuntersuchungen

Prüfkörper	Dauerspannung [N/mm²]	Versagenszeitpunkt [Tagen]
1	0,600	1
2	0,600	1
3	0,600	2
4	0,300	1
5	0,300	7
6	0,300	9

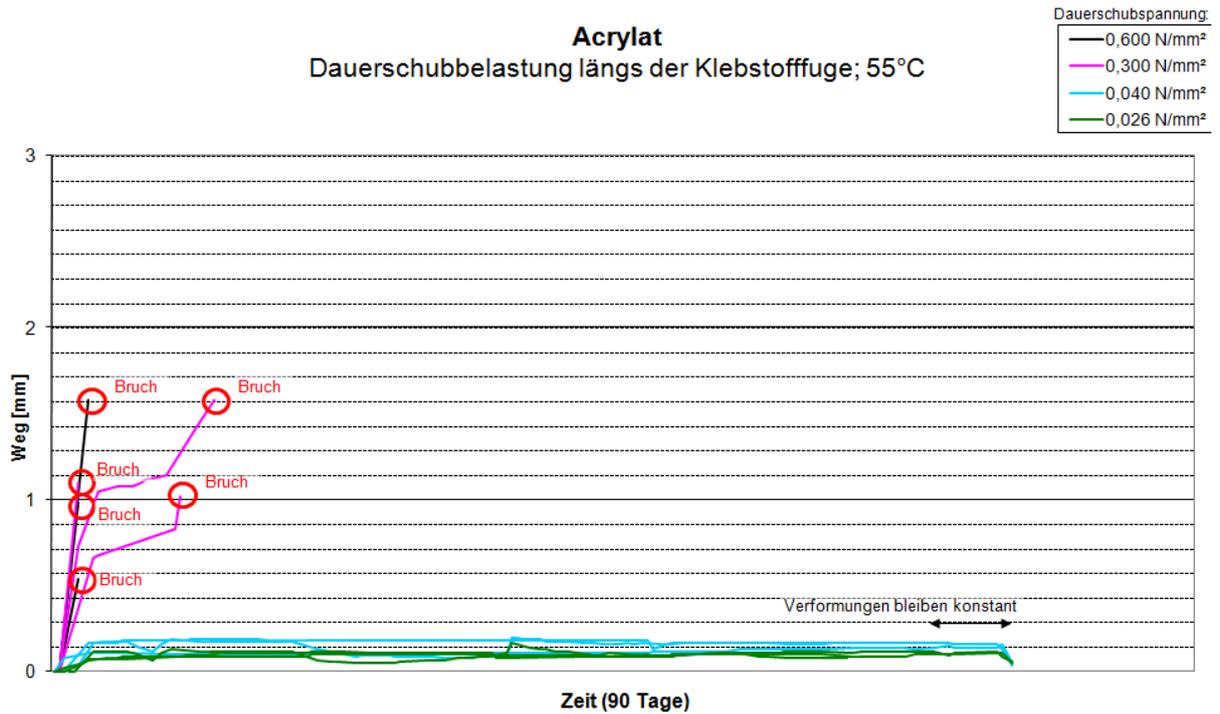


Diagramm 23: Acrylat, Dauerschubbelastung der Klebstoffuge, Schub längs unter 55 °C

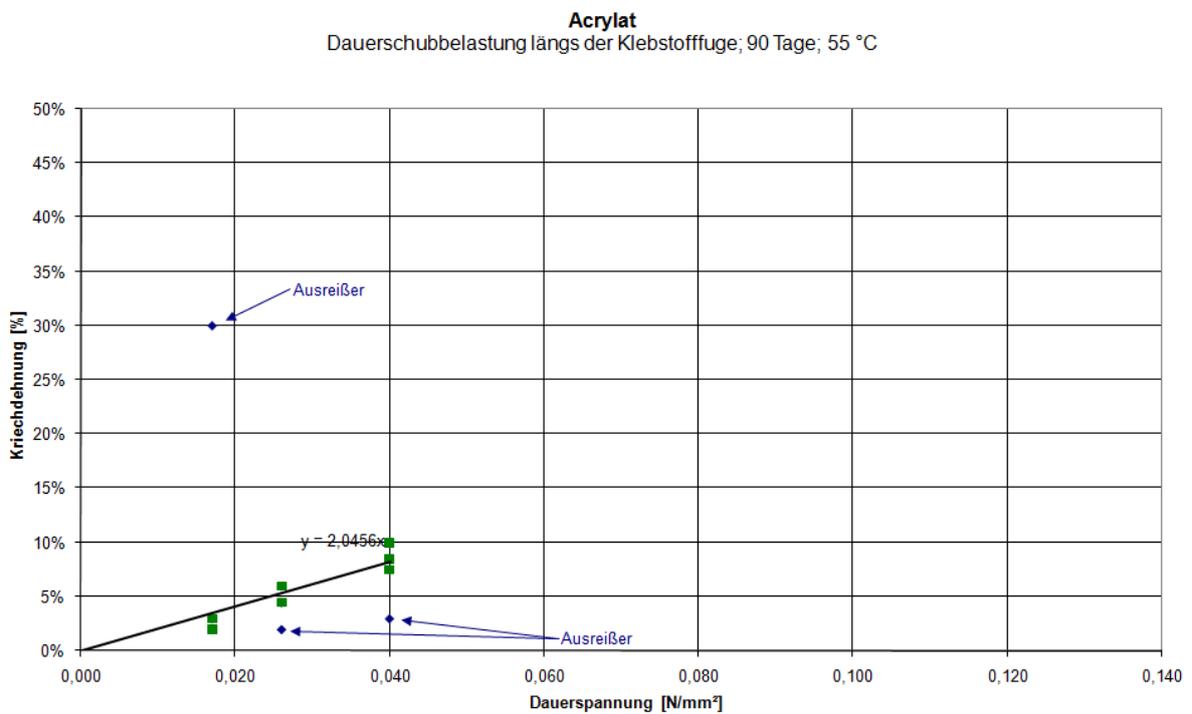


Diagramm 24: Acrylat, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung längs der Klebstoffuge unter 55 °C

Auch hier kann ein linearer Zusammenhang zwischen der aufgetragenen Dauerlast und der Dehnung zufolge Kriechen hergestellt werden.

Die Ausreißerwerte (Diagramm 24) wurden durch fehlerhafte Anordnung der Messtechnik hervorgerufen und wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Analog zur Berechnung unter Kapitel „Silikon A“ kann ein Schubmodul für die Dauerbelastung unter erhöhter Temperatur berechnet werden:

$$1 / G_{\text{ges}} = 1 / G_{\text{kurz}} + 1 / G_{\text{kriech}} = 1 / 2,00 + 2,0456 = 2,5456 [1 / (\text{N} / \text{mm}^2)]$$

$$G_{\text{ges}} = 0,39 [\text{N} / \text{mm}^2]$$

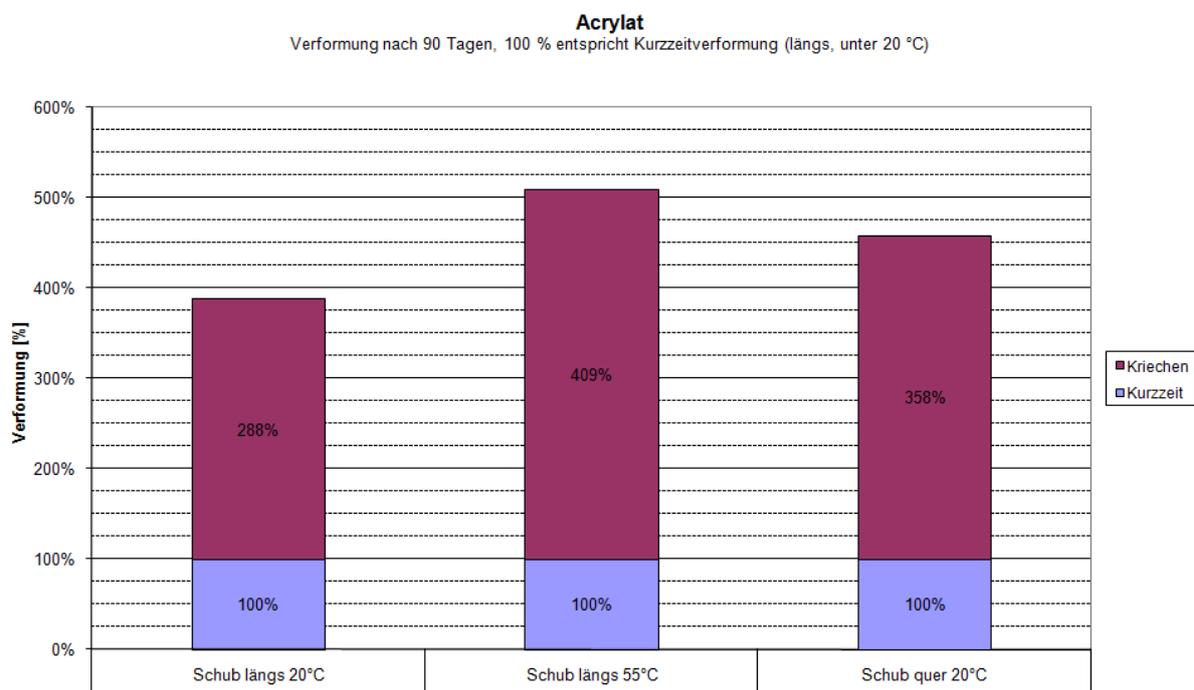


Diagramm 25: Acrylat, Erhöhte Verformung zufolge Dauerlast

Prinzipiell zeigt sich beim Acrylatklebstoff ein stark zeitabhängiges Verformungsverhalten. Auch unter normalen Klimabedingungen und einem geringen Dauerspannungsniveau zeigt sich eine deutliche Zunahme der Verformungen (Faktor 3,9 bis 4,6) über die Zeit. Die Verformung unter Dauerlast wird durch die erhöhten Temperaturen zusätzlich beeinflusst (Faktor 5,1) (siehe Diagramm 25). Weiters wurden unter Normalklimabedingungen (20 °C) bei einer Dauerschubspannung von 0,6 N / mm² alle Prüfkörper zum Versagensfall geführt (siehe Diagramm 20). Dies entspricht **1 / 5 des 5-% Quantilwertes** der Bruchspannung aus den Referenzversuchen. Unter erhöhter Temperatur versagten alle Prüfkörper mit einer Dauerschubspannung von 0,3 bis 0,6 N / mm² (siehe Diagramm 23). Dies entspricht **1 / 10 des 5-% Quantilwertes** der Bruchspannung aus den Referenzversuchen.

Restfestigkeiten nach Dauerlastversuch

Im Anschluss an die Untersuchung des Kriechverhaltens unter Dauerlast wurden die verbleibenden Klebstoffproben noch einer Bruchuntersuchung unterzogen. Hierbei wurden die Proben analog zu den Referenzversuchen im Klimaraum bei 20 °C / 65 % klimatisiert und anschließend geprüft.

Die erreichten Werte sind folgenden Tabellen zu entnehmen:

Belastung auf Schub längs zur Klebstofffuge, aus Dauerlastversuchen 20 °C:

Acrylat, nach Dauerlast (Kriechen) 20 °C, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 8**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 5,245 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 5,372 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,689 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 4,188 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: großteils Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 150 %**

Belastung auf Schub quer zur Klebstofffuge, aus Dauerlastversuchen 20 °C:

Acrylat, nach Dauerlast (Kriechen) 20 °C, Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 7**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 4,685 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 4,579 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,690 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 3,840 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: großteils Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 116 %**

Belastung auf Schub längs zur Klebstofffuge, aus Dauerlastversuchen 55 °C:

Acrylat, nach Dauerlast (Kriechen) 55 °C, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 4**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 5,505 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 5,565 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 1,065 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 4,348 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: großteils Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 96 %**

Geometrie der Klebefuge

Geänderte Klebefugendimension (Breite = 19 mm)

Die Untersuchungen an geänderter Klebefugengeometrie wurden wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt und analog zu Kapitel „Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)“ ausgewertet.

Belastung auf Zug

Acrylat, geänd. Klebefugenbreite, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 2,760 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 2,670 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,674 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 1,959 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: größtenteils kohäsiv im Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 53 %**

Belastung auf Schub längs der Klebstoffuge

Acrylat, geänd. Klebefugenbreite, Belastungsrichtung Schub längs
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 3,817 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 3,792 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,460 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 3,336 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: großteils Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 192 %**

Belastung auf Schub quer zur Klebstoffuge

Acrylat, geänd. Klebefugenbreite, Belastungsrichtung Schub quer
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 3,673 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 3,584 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,518 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 3,108 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: großteils Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holzsubstrat
Mittlere Bruchdehnung: **e = 163 %**

Umwelteinflüsse

Restfestigkeiten nach Wasserlagerung

Die Untersuchungen an wassergelagerten Klebefugen wurden wie unter Kapitel „Methodik“ beschrieben durchgeführt und analog zu Kapitel „Kurzzeitbelastung (Referenzwerte)“ ausgewertet.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind folgenden Tabellen zu entnehmen:

Belastung auf Zug, Versuchsreihe 1: feucht-warm (FW)

Acrylat, Wasserlagerung feucht-warm, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 1,437 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 1,341 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,283 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,776 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: 45 % kohäsiver Bruch im Holzsubstrat,
55 % adhäsiver Bruch zwischen Klebstoff und Holz

Belastung auf Zug, Versuchsreihe 2: rückgetrocknet (RG)

Acrylat, Wasserlagerung rückgetrocknet, Belastungsrichtung Zug
Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**
Mittlere Bruchspannung: **$m_x = 1,861 \text{ N / mm}^2$**
Median der Bruchspannung: **$m_{\text{med}} = 1,817 \text{ N / mm}^2$**
Standardabweichung der Bruchspannung: **$s_x = 0,388 \text{ N / mm}^2$**
5-% Quantilwert der Bruchspannung: **$R_{u,5} = 0,958 \text{ N / mm}^2$**
Bruchart: 1 % kohäsiver Bruch im Holzsubstrat,
99 % adhäsiver Bruch zwischen Klebstoff und Holz

Auch beim Acrylatklebstoff zeigt sich ein vermehrt adhäsives Bruchbild an den Grenzflächen zwischen Klebstoff und Holz. Der Anteil der Adhäsionsbrüche ändert sich von 100 % kohäsivem Holzbruch auf 99 % adhäsives Bruchverhalten. Dieser Umstand hat einen großen Einfluss auf die erreichbaren Festigkeitswerte der Klebstoffverbindung. Die Festigkeiten reduzieren sich im Zustand feucht-warm dabei um durchschnittlich 57 % und erreichen im rückgetrockneten Zustand im Mittel nur noch 55 % des Referenzwertes. Die Klebstoffverbindung wurde durch die Feuchtigkeit deutlich geschwächt.

4.1.2.4 Zusammenfassung

Silikon A

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen am Kleinprüfkörper sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Die Festigkeits- und Steifigkeitswerte sind jeweils prozentual auf die Referenzuntersuchungen bezogen.

Beim Silikonklebstoff A zeigen sich keine signifikanten Veränderungen des Bruch- und Verformungsverhaltens unter zyklischer Beanspruchung. Es ist ein etwas steiferes Verhalten bemerkbar was auf die wiederkehrende, gleichgerichtete Belastung und der damit verbundenen Ausrichtung des Klebstoffmolekulargefüges zurückzuführen ist.

Bei der Dauerlastuntersuchung ist durch die zeitabhängige Kriechverformung bis zu einer Dauerspannung von 0,04 N/mm² ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Kriechverformung herstellbar (primäres und sekundäres Kriechen). Oberhalb dieser Dauerspannung treten unkontrollierbare Verformungen und in einem Fall Bruch während des Dauerlastversuchs auf (tertiäres Kriechen) [WEL]. Die Kriechverformung beträgt je nach Umgebungstemperatur zwischen 82 und 112 % von der Anfangsverformung.

Unter Wasserlagerung zeigt die Klebung eine Festigkeitsreduktion von 22 %, die bei Rücktrocknung wieder zurückgeht. Das Bruchbild entwickelt sich unter Wasserlagerung vom kohäsiven Klebstoffbruch zum adhäsiven Grenzflächenbruch zwischen Holz und Klebstoff.

Tabelle 10: Festigkeit und Steifigkeit der Kleinprüfkörper bei unterschiedlichen Einflussfaktoren des Klebstofftyps Silikon A (Fugendicke 3 mm)

Schub längs	Bruchspannung	Bruchdehnung	G-Modul
Mittelwerte			
Referenz	1,00 N/mm ²	2,61 [-]	0,37 N/mm ²
	100%	100%	100%
Zyklische Belastung R _{u,5} / 6	107%	103%	103%
Zyklische Belastung R _{u,5} / 3	111%	111%	93%
Untersuchung nach Dauerlast 20 °C	97%	106%	99%
Untersuchung nach Dauerlast 55 °C	95%	115%	89%
Breitere Klebstoffuge b=19 mm	114%	107%	112%
Dauerlastuntersuchung bei 20 °C; 0,01 bis 0,04 N/mm ²	---	---	55%
Dauerlastuntersuchung bei 20 °C; 0,065 N/mm ²	---	---	2)
Dauerlastuntersuchung bei 20 °C; 0,130 N/mm ²	---	---	---
Dauerlastuntersuchung bei 55 °C; 0,01 bis 0,04 N/mm ²	---	---	47%
Dauerlastuntersuchung bei 55 °C; 0,065 N/mm ²	---	---	2)
Dauerlastuntersuchung bei 55 °C; 0,130 N/mm ²	1)	---	2)

Schub quer	Bruchspannung	Bruchdehnung	G-Modul
Mittelwerte	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]
Referenz	0,77 N/mm ²	2,32 [-]	0,37 N/mm ²
	100%	100%	100%
Zyklische Belastung R _{u,5} / 6	115%	99%	108%
Zyklische Belastung R _{u,5} / 3	111%	95%	108%
Untersuchung nach Dauerlast 20 °C	101%	93%	100%
Untersuchung nach Dauerlast 55 °C	---	---	---
Breitere Klebstoffuge b=19 mm	149%	107%	131%
Dauerlastuntersuchung bei 20 °C; 0,01 bis 0,04 N/mm ²	---	---	52%

Zug	Bruchspannung	Bruchdehnung	E-Modul
Mittelwerte	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]
Referenz	0,90 N/mm ²	1,20 [-]	---
	100%	100%	---
Zyklische Belastung R _{u,5} / 6	102%	90%	---
Zyklische Belastung R _{u,5} / 3	103%	70%	---
Breitere Klebstoffuge b=19 mm	116%	78%	---
Wasserlagerung (FW)	78%	---	---
Wasserlagerung (RG)	97%	---	---

1) Bruch unter Dauerlast

2) Verformung nach 90 Tagen nicht abgeschlossen

Silikon B

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen am Kleinprüfkörper sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die Festigkeits- und Steifigkeitswerte sind jeweils prozentual auf die Referenzuntersuchungen bezogen.

Beim Silikonklebstoff B zeigen sich starke Parallelen zum Silikonklebstoff A.

Auch hier ist bei der Dauerlastuntersuchung durch die zeitabhängige Kriechverformung bis zu einer Dauerspannung von $0,04 \text{ N/mm}^2$ ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Kriechverformung herstellbar (primäres und sekundäres Kriechen). Oberhalb dieser Dauerspannung treten unkontrollierbare Verformungen auf (tertiäres Kriechen) [WEL]. Die Kriechverformung beträgt je nach Umgebungstemperatur zwischen 82 und 156 % von der Anfangsverformung. Silikon B zeigt unter warmer Umgebungstemperatur ein stärkeres Kriechverhalten als Silikon A.

Unter Wasserlagerung zeigt der Klebstoff ein besseres Verhalten als Silikon A. Es bleiben wesentlich größere Anteile an kohäsiven Klebstoffbruch erhalten.

Tabelle 11: Festigkeit und Steifigkeit der Kleinprüfkörper bei unterschiedlichen Einflussfaktoren des Klebstofftyps Silikon B (Fugendicke 6 mm)

Schub längs	Bruchspannung	Bruchdehnung	G-Modul
Mittelwerte			
Referenz	0,88 N/mm ²	1,59 [-]	0,50 N/mm ²
	100%	100%	100%
Zyklische Belastung R _{u,5} / 6	92%	100%	97%
Zyklische Belastung R _{u,5} / 3	101%	93%	110%
Untersuchung nach Dauerlast 20 °C	87%	105%	97%
Untersuchung nach Dauerlast 55 °C	83%	103%	86%
Breitere Klebstofffuge b=19 mm	109%	104%	111%
Dauerlastuntersuchung bei 20 °C; 0,01 bis 0,04 N/mm ²	---	---	53%
Dauerlastuntersuchung bei 20 °C; 0,065 N/mm ²	---	---	2)
Dauerlastuntersuchung bei 20 °C; 0,130 N/mm ²	---	---	---
Dauerlastuntersuchung bei 55 °C; 0,01 bis 0,04 N/mm ²	---	---	39%
Dauerlastuntersuchung bei 55 °C; 0,065 N/mm ²	---	---	2)
Dauerlastuntersuchung bei 55 °C; 0,130 N/mm ²	---	---	2)

Schub quer	Bruchspannung	Bruchdehnung	G-Modul
Mittelwerte	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]
Referenz	0,65 N/mm ²	1,46 [-]	0,46 N/mm ²
	100%	100%	100%
Zyklische Belastung R _{u,5} / 6	136%	123%	115%
Zyklische Belastung R _{u,5} / 3	129%	123%	108%
Untersuchung nach Dauerlast 20 °C	115%	102%	104%
Untersuchung nach Dauerlast 55 °C	---	---	---
Breitere Klebstofffuge b=19 mm	131%	103%	119%
Dauerlastuntersuchung bei 20 °C; 0,01 bis 0,04 N/mm ²	---	---	55%

Zug	Bruchspannung	Bruchdehnung	E-Modul
Mittelwerte	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]
Referenz	0,78 N/mm ²	0,77 [-]	---
	100%	100%	---
Zyklische Belastung R _{u,5} / 6	115%	95%	---
Zyklische Belastung R _{u,5} / 3	108%	77%	---
Breitere Klebstofffuge b=19 mm	136%	73%	---
Wasserlagerung (FW)	97%	---	---
Wasserlagerung (RG)	112%	---	---

1) Bruch unter Dauerlast

2) Verformung nach 90 Tagen nicht abgeschlossen

Acrylat

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen am Kleinprüfkörper sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Die Festigkeits- und Steifigkeitswerte sind jeweils prozentual auf die Referenzuntersuchungen bezogen.

Tabelle 12: Festigkeit und Steifigkeit der Kleinprüfkörper bei unterschiedlichen Einflussfaktoren des Klebstofftyps Acrylat (Fugendicke 2 mm)

Schub längs	Bruchspannung	Bruchdehnung	G-Modul
Mittelwerte			
Referenz	3,60 N/mm ²	1,68 [-]	---
	100%	100%	---
Zyklische Belastung R _{u,5} / 6	108%	89%	---
Zyklische Belastung R _{u,5} / 3	121%	75%	---
Untersuchung nach Dauerlast 20 °C	146%	89%	---
Untersuchung nach Dauerlast 55 °C	153%	57%	---
Breitere Klebstoffuge b=19 mm	106%	114%	---
Dauerlastuntersuchung bei 20 °C; 0,01 bis 0,04 N/mm ²	---	---	26%
Dauerlastuntersuchung bei 20 °C; 0,300 N/mm ²	---	---	2)
Dauerlastuntersuchung bei 20 °C; 0,600 N/mm ²	1)	---	2)
Dauerlastuntersuchung bei 55 °C; 0,01 bis 0,04 N/mm ²	---	---	20%
Dauerlastuntersuchung bei 55 °C; 0,300 N/mm ²	1)	---	2)
Dauerlastuntersuchung bei 55 °C; 0,600 N/mm ²	1)	---	2)

Schub quer	Bruchspannung	Bruchdehnung	G-Modul
Mittelwerte	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]
Referenz	3,62 N/mm ²	1,60 [-]	2,00 N/mm ²
	100%	100%	---
Zyklische Belastung R _{u,5} / 6	108%	90%	---
Zyklische Belastung R _{u,5} / 3	126%	98%	---
Untersuchung nach Dauerlast 20 °C	129%	73%	---
Untersuchung nach Dauerlast 55 °C	---	---	---
Breitere Klebstoffuge b=19 mm	101%	102%	---
Dauerlastuntersuchung bei 20 °C; 0,01 bis 0,04 N/mm ²	---	---	22%

Zug	Bruchspannung	Bruchdehnung	E-Modul
Mittelwerte	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]
Referenz	3,37 N/mm ²	0,33 [-]	---
	100%	100%	---
Zyklische Belastung R _{u,5} / 6	110%	112%	---
Zyklische Belastung R _{u,5} / 3	101%	133%	---
Breitere Klebstoffuge b=19 mm	82%	163%	---
Wasserlagerung (FW)	43%	---	---
Wasserlagerung (RG)	55%	---	---

1) Bruch unter Dauerlast

2) Verformung nach 90 Tagen nicht abgeschlossen

Beim Acrylatklebstoff zeigen sich etwas stärkere Veränderungen des Bruch- und Verformungsverhaltens unter zyklischer Beanspruchung. Es ist vermehrt ein steiferes Verhalten bemerkbar. Die Festigkeiten bleiben jedenfalls erhalten. Die Bruchversuche anschließend an die Dauerlastuntersuchung zeigen, dass sich dieses „Versteifen“ des Klebstoffs insbesondere unter warmen Umgebungstemperaturen noch verstärkt.

Bei der Dauerlastuntersuchung ist durch die zeitabhängige Kriechverformung bis zu einer Dauerspannung von 0,04 N/mm² ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Kriechverformung herstellbar (primäres und sekundäres Kriechen) [WEL]. Bei 20 °C Umgebungstemperatur wurde bei einem Dauerspannungsniveau von 17 % der Kurzzeitfestigkeit ein Versagen aller Prüfkörper nach wenigen Tagen Untersuchungsdauer beobachtet. Unter 55 °C trat das Versagen bereits bei einer Dauerspannung von 8 % bei allen Prüfkörpern ein. Es zeigt sich ein starkes Kriechverhalten des Klebstoffs je nach Umgebungstemperatur im Mittel zwischen 285 und 400 % bezogen auf die Anfangsverformung.

Resumée

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass sich die beiden Silikonklebstoffe sehr ähnlich verhalten. Sie zeigen weniger Steifigkeit und geringere Bruchspannungen im Vergleich zu dem Acrylatklebstoff. Hinsichtlich Feuchtigkeits- und Temperatureinfluss zeigen sie jedoch ein wesentlich gleichbleibenderes, kontinuierlicheres Tragverhalten. Das Kriechverhalten ist deutlich geringer als das des Acrylatklebstoffs. Hinsichtlich der dauerhaften Eignung unter Bedingungen, wie sie in Fassadenkonstruktionen auftreten können, sind daher die Silikonklebstoffe besser zu beurteilen.

4.2 Optimierung der Prototypenentwicklung

4.2.1 Methodik

Im Rahmen des Vorgängerprojekts wurde ein Tragsystem zu HGV-Elementen entwickelt [HFA1] und die prinzipielle Eignung solcher Tragsysteme zur Gebäudeaussteifung untersucht [SCH]. Zum Einsatz im Fassadenbereich ist es notwendig, das Tragsystem in ein funktionierendes Fassadensystem zu implementieren, das den hohen Anforderungen an Luftdurchlässigkeit [N4, N5], Schlagregendichtheit [N6, N7] sowie Windwiderstand [N8, N9] gemäß EN 13830 [EN13830] genügt und die bauphysikalischen Anforderungen (insbesondere Diffusionsverhalten) erfüllt, aber auch die notwendige Praxistauglichkeit hinsichtlich Herstellung und Montage aufweist.

Es wurden drei Laborprüfwände sowie zwei Wandelemente für ein Forschungsgebäude hergestellt. An den Laborprüfwänden wurden klassische Prüfstanduntersuchungen hinsichtlich Luftdurchlässigkeit, Schlagregendichtheit, Widerstand gegen Windlast sowie Differenzklimabeanspruchungen durchgeführt. An den Wandelementen des Forschungsgebäudes wurde bei klimatisiertem Innenklima das Verhalten des Fassadensystems unter realen Nutzungsbedingungen untersucht.

In allen Prüfwänden kam eine Zweischiebenisolierverglasung mit Edelstahlabstandhalter und tragendem Randverbund zum Einsatz. Der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung U_g betrug 1,1 W / m²K. Dies entspricht noch immer dem heutigen Stand der Technik einer Standardverglasung. Zur thermischen Optimierung von Fassadenkonstruktionen spielt hauptsächlich der U_g -Wert eine maßgebliche Rolle und es sind bereits Verglasungen mit Wärmedurchgangskoeffizienten bis zu 0,4 W / m²K erhältlich. Die thermische Optimierung des Glasaufbaus war jedoch nicht Inhalt der Arbeit. Es wurde daher bewusst auf

Standardverglasungen zurückgegriffen, um in den Untersuchungen den schlechtesten Fall abzudecken und das Anwendungsspektrum des Systems möglichst breit zu halten. Hauptaugenmerk wurde auf die Dauerhaftigkeit und Robustheit des Fassadensystems unter Standardrandbedingungen gelegt, wodurch auch entsprechend bessere Verglasungssysteme abgedeckt sind.

Bei den fünf Prüfwänden wurden die einzelnen Fassadenkomponenten variiert und deren Leistungsfähigkeit quantifiziert.

Die Variation der HGV-Komponenten wurde folgendermaßen durchgeführt (siehe Abbildung 23):

- (1) Klebstoffsysteme (Silikon A / Silikon B / Acrylat)
- (2) Form der Birkensperrholz-Koppelleiste (Verzahnung 90 ° / Verzahnung 45 °)
- (3) Beschichtung der Koppelleiste (unbeschichtet / Dickschichtlasur / Epoxydversiegelung)
- (4) Eckausführung der Koppelleiste (knirsch / Silikonversiegelung / Hoffmannschwalbe / definierte Silikonfuge)
- (5) Dichtebene zwischen Holztragstruktur (z.B. Pfosten-Riegel) und HGV-Element - (knirsch / Fassadensystemdichtung / kompressibles Klebeband)

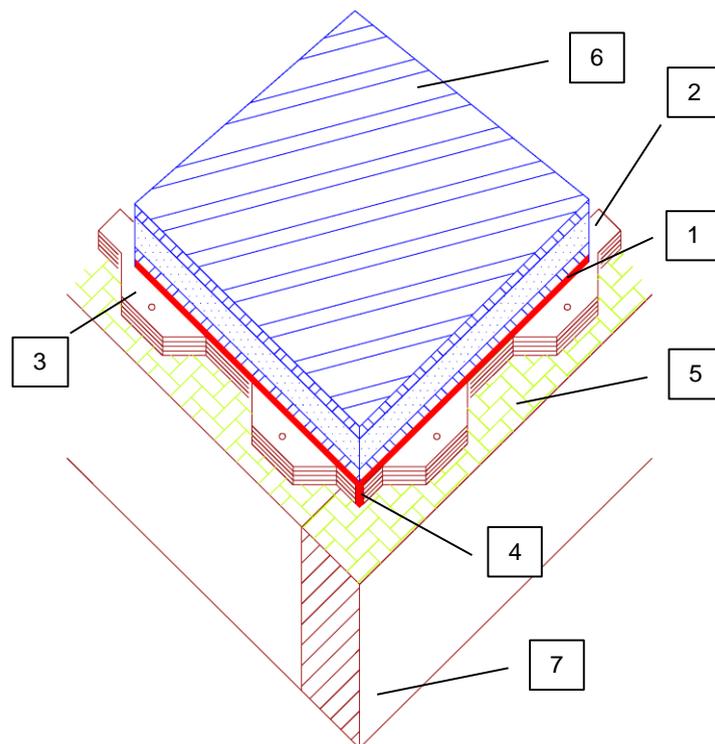


Abbildung 23: Komponenten des HGV-Systems

Die restlichen HGV-Komponenten wurden bei allen Prüfkörpern gleich ausgeführt (siehe Abbildung 23):

- (6) Isolierverglasung $U_g = 1,1 \text{ W / m}^2\text{K}$
 von innen nach außen:
 2 x 4 mm Verbundsicherheitsglas (VSG)
 + 0,76 mm PVB
 16 mm Scheibenzwischenraum (SZR)
 + Tragender Randverbund (Silikon Sealant) b x d = 10 x 16 mm
 + Edelstahlabstandhalter
 6 mm Einscheibensicherheitsglas (ESG)
- (7) Pfosten-Riegel-Konstruktion
 Vollholz C 24 bzw. Brettschichtholz GL 24 h
 Pfostenbreite B=50 mm; Pfostentiefe T=140 mm (bei Laborprüfwänden)
 Pfostenbreite B=50 mm; Pfostentiefe T=239 mm (bei Forschungsgebäude)

4.2.1.1 Luftdurchlässigkeit

Die Fassade wurde einem stufenweise aufgebrachtten Über- und Unterdruck im Prüfstand ausgesetzt und dadurch die Luftdurchlässigkeit des Elements festgestellt. Die aufgebrachten Druckstufen sind Tabelle 13 zu entnehmen. Die Prüfung wurde nach ÖNORM EN 12153 durchgeführt [EN12153]. Die Klassifizierung erfolgt durch ÖNORM EN 12152 [EN12152].

Durch Passivhausstandards werden mehr und mehr kontrollierte Wohnraumlüftungen in Gebäude integriert. Luftundurchlässige Gebäudehüllen sind die Voraussetzung für deren Wirksamkeit. Weiters gibt die Untersuchung einen wichtigen Hinweis auf Problemstellen im Fassadensystem an welchen Luftkonvektion stattfinden kann und ist damit unerlässlich zur Vermeidung von Feuchteschäden durch Konvektion.

Tabelle 13: Klassifizierung der Luftdurchlässigkeit gemäß [EN12152]

Höchstdruck P_{\max} (Pa)	Luftdurchlässigkeit $\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$	Klasse
150	1,5	A 1
300	1,5	A 2
450	1,5	A 3
600	1,5	A 4
> 600	1,5	A E

4.2.1.2 Schlagregendichtheit

Die Fassade wurde Schlagregen mit stufenweise steigendem Überdruck gemäß Tabelle 14 im Prüfstand ausgesetzt und dadurch die Schlagregendichtheit des Elements festgestellt. Die Prüfung wurde nach ÖNORM EN 12155 durchgeführt [EN12155]. Die Klassifizierung erfolgt durch ÖNORM EN 12154 [EN12154].

Die Untersuchung gibt Aufschluss über Problemstellen im Fassadensystem an welchen Regenwassereintritt stattfinden kann und ist damit unerlässlich zur Vermeidung von Bauschäden.

Tabelle 14: Klassifizierung der Schlagregendichtheit gemäß [EN12154]

Höchstdruck P_{\max} (Pa)	Klasse
150	R 4
300	R 5
450	R 6
600	R 7
> 600	RE xxx

4.2.1.3 Windwiderstand

Die Fassadenprüfkörper wurde stufenweise aufgebrachtem Winddruck und -sog von $\pm 1,9 \text{ kN/m}^2$ im Prüfstand in Anlehnung an DIN EN 12179 [EN12179] ausgesetzt und die Verformungen gemessen (vgl. Tabelle 15).

Die Messungen sind ein wichtiger Aspekt bei der Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion unter Windbelastung.

Tabelle 15: Druckstufen zur Messung des Windwiderstands

Druckstufen kN/m^2
$\pm 0,5$
$\pm 1,0$
$\pm 1,5$
$\pm 1,9$

4.2.1.4 Differenzklima

Zwei Laborprüfwände und die Prüfwände in dem Forschungsgebäude wurden unterschiedlichen Differenzklimaten an der Außen- und Innenseite des Bauteils ausgesetzt. Die Regelung der Klimate wurde bei jedem Prüfkörper unterschiedlich vorgenommen und ist den einzelnen Kapiteln zu dem jeweiligen Prüfkörper zu entnehmen. Die Untersuchungen sollen Aufschluss über das Verhalten der einzelnen Fassadenkomponenten hinsichtlich Diffusion, Konvektion sowie Oberflächenkondensat bieten.

4.2.2 Ergebnisse

4.2.2.1 Fassadenprototypen

Fassadenprototyp 1

Herstellung / Materialien

Es wurde ein Fassadenprototyp mit 2 großen Glaselementen 1,25 x 2,50 m sowie zwei kleineren Glaselementen 0,80 x 0,80 m mit unterschiedlichen Klebstoffen (Acrylat, Silikon A und Silikon B) und einem Holz-Alu-Fenster eines projektbeteiligten Fensterherstellers auf einer Pfosten-Riegel-Tragstruktur (C24; Querschnitt: 5 x 15 cm) hergestellt.

Die verzahnte Koppelleiste wurde nicht mit einer Oberflächenbehandlung versehen. Die mit ihr verklebten Glasscheiben wurden von außen ohne weitere Dichtmaßnahmen knirsch auf die Tragkonstruktion geschraubt. Die Fuge zwischen den Glaselementen wurde mit einer U-förmigen Moosgummi bestückt und nach dem SG-Prinzip mit Silikon Sealant versiegelt. Im Sockelbereich sowie oben ist eine Entwässerungs- bzw. Hinterlüftungsöffnung der Fuge vorgesehen.

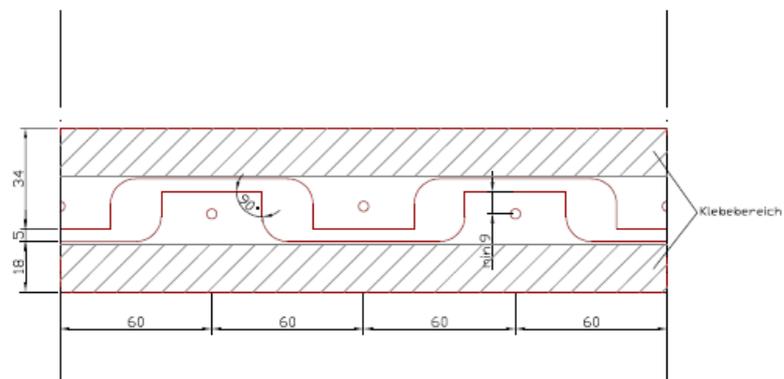
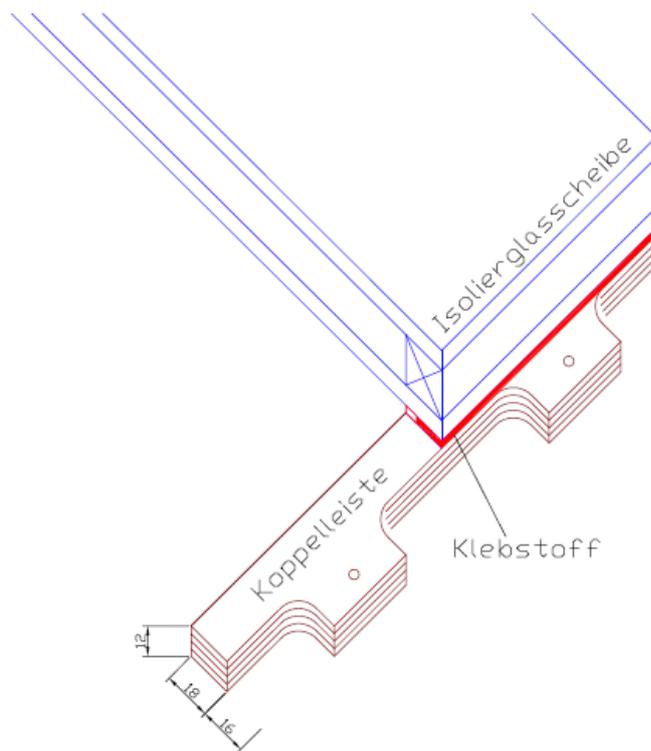


Abbildung 24: Geometrie der Koppelleiste, Fassadenprototyp 1



Abbildung 25: Ansicht Fassadenprototyp 1



Abbildung 26: Detail Fassadenprototyp 1

Untersuchungen

Luftdichtheit

Eine Klassifizierung gemäß ÖNorm EN 12152 [EN12152] konnte nicht durchgeführt werden. Die Luftdurchlässigkeit der Klasse A1 wurde um 7 % überschritten (vgl. Tabelle 13). Damit ist keine Klassifizierung der Fassade möglich. Es sind zusätzliche Dichtmaßnahmen notwendig, um die Luftundurchlässigkeit der Konstruktion zu gewährleisten.

Klassifizierung - Größte zulässige Luftdurchlässigkeit
nach EN 12152:2002, inkl. Fensterfugen

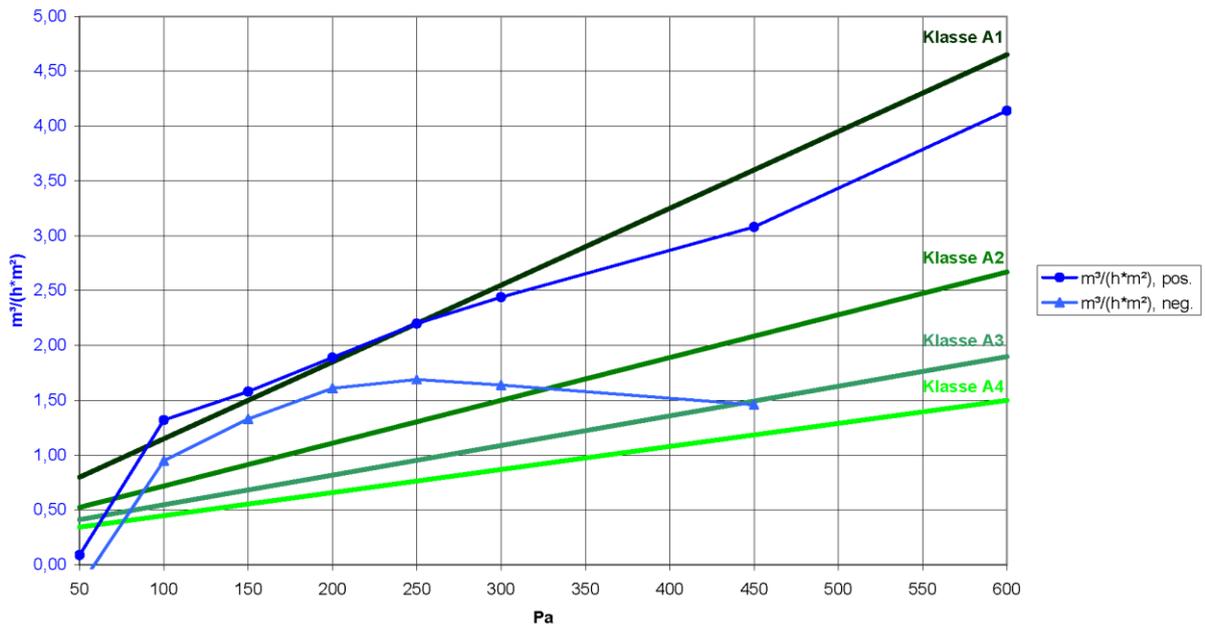


Diagramm 26: Prototyp 1:Klassifizierung der Luftdurchlässigkeit, inkl. Fensterfugen

Klassifizierung - Größte zulässige Luftdurchlässigkeit
nach EN 12152:2002, exkl. Fensterfugen

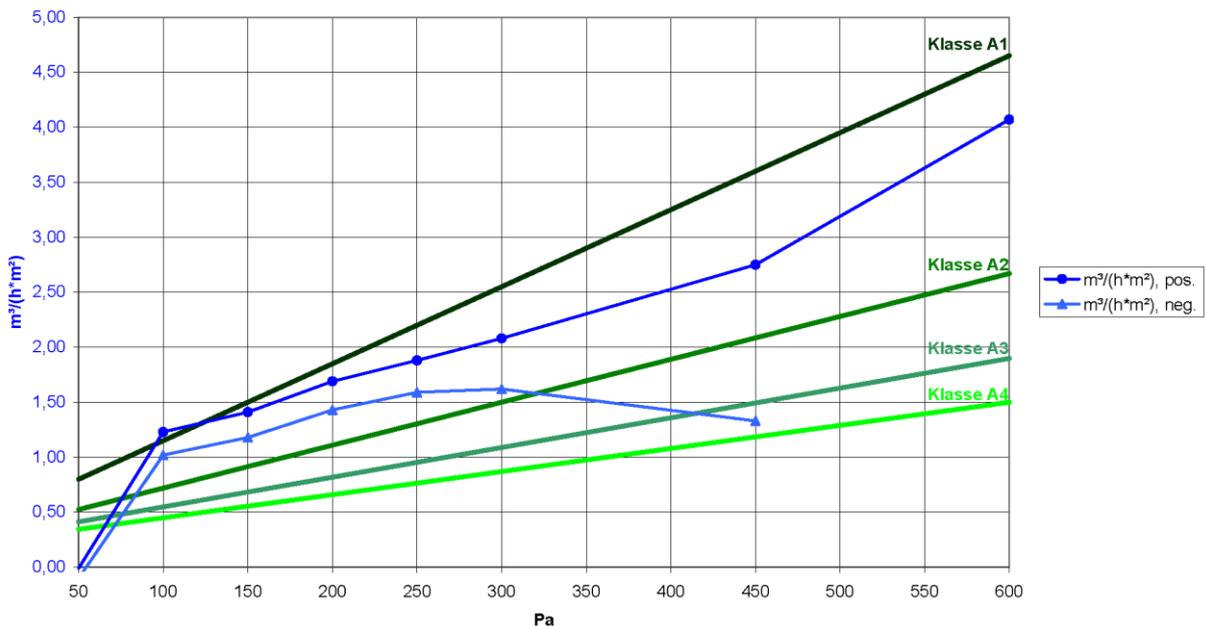


Diagramm 27: Prototyp 1:Klassifizierung der Luftdurchlässigkeit, inkl. Fensterfugen

Schlagregen

Die Fassade wurde im Prüfstand Schlagregen ausgesetzt (vgl. Kapitel „Methodik“ – „Schlagregendichtheit“).

Eine Klassifizierung gemäß ÖNORM EN 12154 [EN12154] ergab eine Schlagregendichtheit der Klasse R5, was einer mittleren Schlagregendichtheit entspricht (vgl. Tabelle 14).

Es sind zusätzliche Dichtmaßnahmen notwendig, um die Anforderungsklasse zu steigern. Besonders große Undichtigkeiten konnten im Bereich der Eckausbildung der Koppelleiste sowie der fehlenden Abdichtung zwischen Pfosten-Riegel-Konstruktion und Koppelleiste festgestellt werden (vgl. Abbildung 23).

Windwiderstand

Die Fassade wurde im Prüfstand Winddruck und –sog ausgesetzt (vgl. Kapitel „Methodik“ – „Windwiderstand“) und dadurch das Verformungsverhalten des Elements bei Wind festgestellt.

Die Messung der Verformungen wurde mittig an allen 4 Pfosten der Tragkonstruktion ermittelt. Die maximale Verformung ergab bei einem Winddruck von $1,9 \text{ kN} / \text{m}^2$ $5,1 \text{ mm}$. Eine Extrapolation dieser Ergebnisse durch Ermittlung einer polynomischen Regressionskurve 3. Ordnung lässt den Schluss zu, dass die Verformung bei der Bemessungswindlast von $2,2 \text{ kN} / \text{m}^2$ bei $6,5 \text{ mm}$ liegt. Dies ist auf die Elementhöhe bezogen $6,5 / 2700 = 1 / 415$. Die aus der Gebrauchstauglichkeit maximal zulässigen Verformungen von $l / 200 = 2700 / 200 = 13,5 \text{ mm}$ sind damit weit unterschritten und in einem unkritischen Bereich für die Gebrauchstauglichkeit.



Abbildung 27 – Messung der Durchbiegung unter Winddruck und –sog an 4 Messstellen

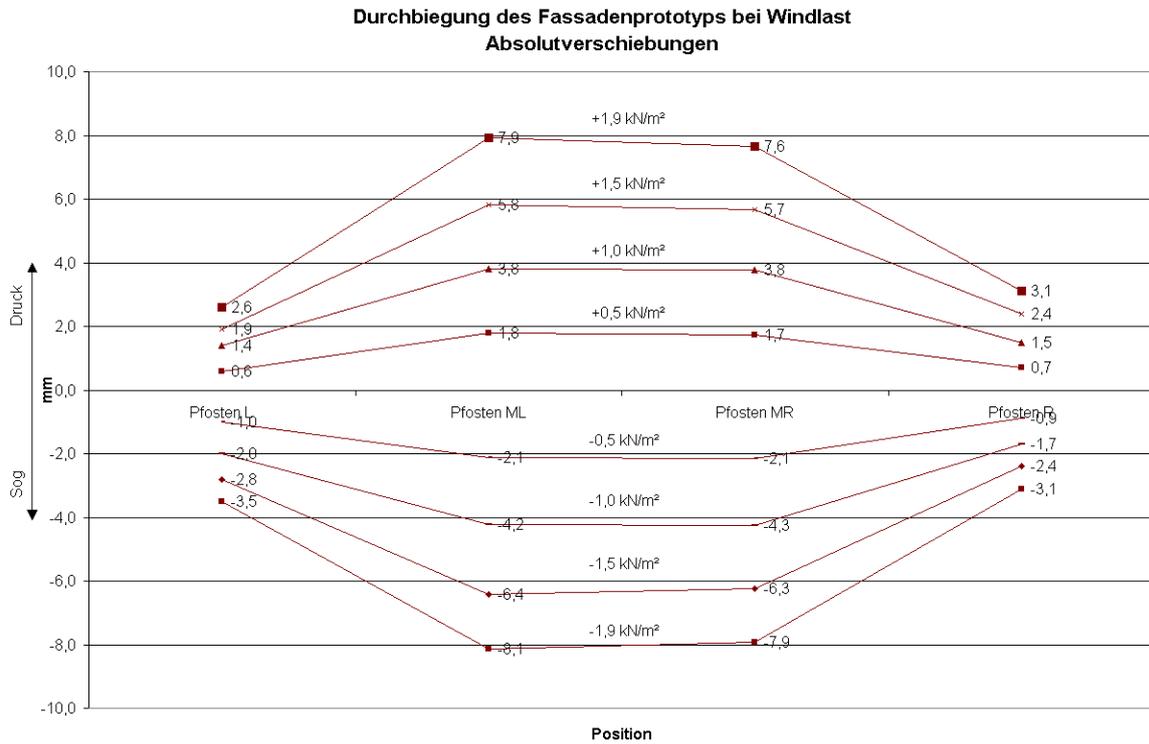


Diagramm 28: Durchbiegung unter Windlast

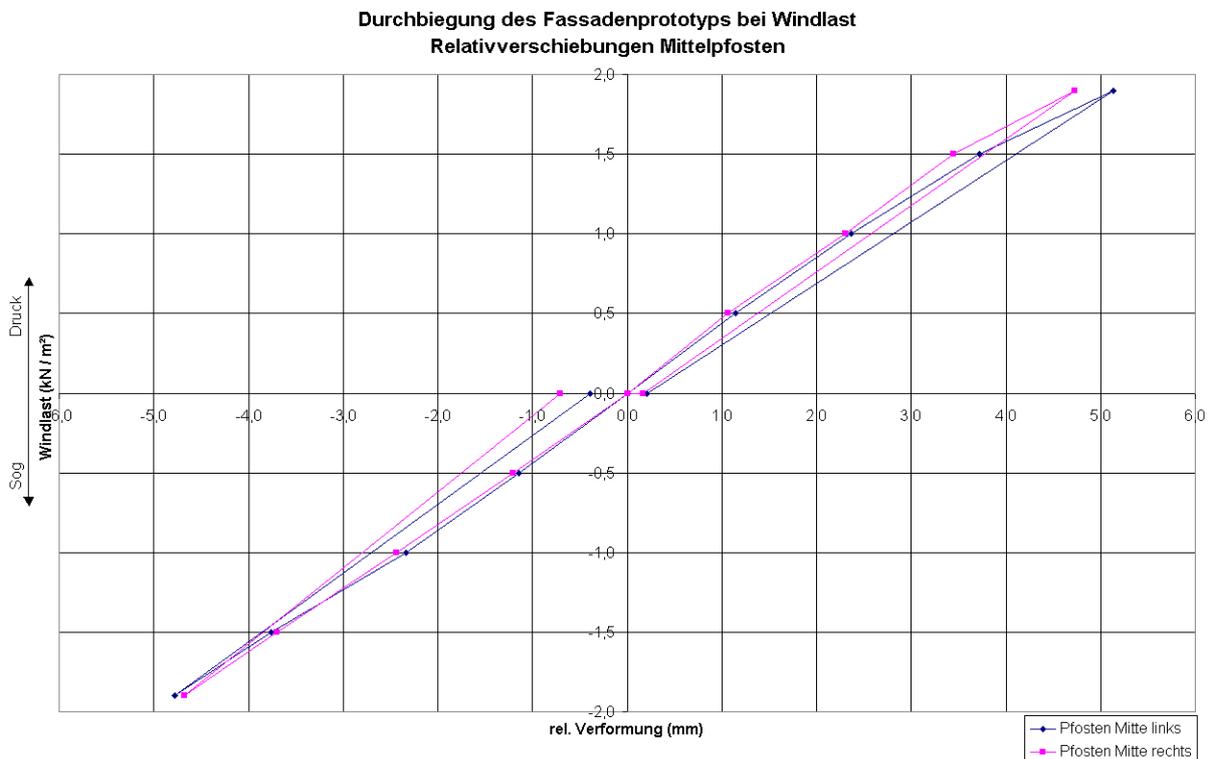


Diagramm 29: Durchbiegung unter Windlast

Differenzklima

Die Fassade wurde an Ihrer Außenseite einer Temperatur von -15 °C über den Zeitraum von 17 Tagen im Prüfstand ausgesetzt. Das Innenklima betrug dabei in der Prüfhalle durchschnittlich $20\text{ °C} / 50\text{ \% RF}$ und wurde nicht geregelt jedoch aufgezeichnet.

Mittels elektrischer Widerstandsmessung wurde an 36 Messstellen die Holzfeuchtigkeit der Pfosten – Riegel – Konstruktion sowie der Koppelleiste ermittelt.

Eine Auswertung ergab nur einen geringfügigen Anstieg der Feuchte in der Pfosten-Riegel-Konstruktion weit unter dem kritischen Niveau. Durch die Wärmebrücke des Glasrandverbundes entstand ein ca. 4 cm breiter Kondensatbereich am Glasrand. Dieser wurde am unteren Rand der großelementigen Glasscheiben noch durch einen Kaltluftsee verstärkt. Das aus dem Kondensatbereich abrinne Wasser verursachte starke Durchfeuchtung der unbeschichteten BFU-Leiste im unteren Bereich sowie eine moderate Aufwechtlung der Koppelleiste an den vertikalen und damit nicht unter direktem Flüssigwassereinfluss stehenden Bereichen. In den Eckbereichen der Koppelleiste war stellenweise Eisbildung festzustellen, welche auf Konvektion feuchter Luft zurückzuführen ist. Diese kann durch eine Dichtung der Eckstöße der Koppelleiste und damit Verbesserung der Luftundurchlässigkeit verhindert werden.

Innenliegende Oberflächentemperaturen (mit / ohne Heizdraht)

Beim Differenzklimaversuch im Fassadenprüfstand wurde ein 4 cm breiter Kondensatbereich am Glasrand durch den kälteren Glasrandverbund beobachtet. Das entstehende Kondenswasser führt besonders bei den unmittelbar darunter liegende horizontalen Koppelleisten zu Beeinträchtigungen in Punkto Dauerhaftigkeit und Optik.

Die an den innenliegenden Oberflächen gemessenen Temperaturen des Glases lagen in diesen Bereichen durchschnittlich bei $2,9\text{ °C}$. Diese Temperatur ist weit unter dem $9,6\text{ °C}$ -Taupunkt des Innenklimas ($20\text{ °C} / 50\text{ \% RF}$) und führen zu massivem Kondensatanfall.

Zur Reduktion des Kondensats wurden zwei unterschiedliche Heizdrahtpositionen untersucht (Heizdraht-Variante 1 und 2).



Abbildung 28 – Oberflächenkondensat am Glasrandverbund ca. 40 mm breit



Abbildung 29 – Oberflächenkondensat durch Einsatz des Heizdrahtes vermieden

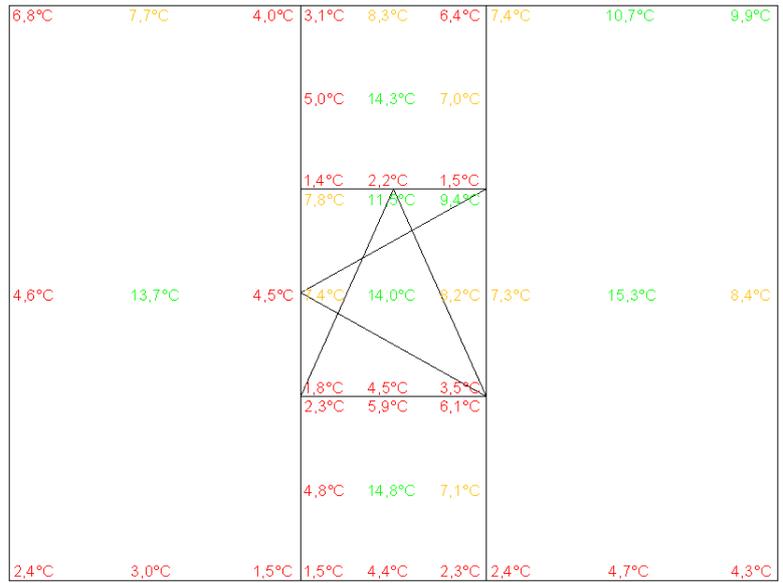


Abbildung 30 – Innenliegende Oberflächentemperaturen der Glasscheibe bei -15 °C Außenklima

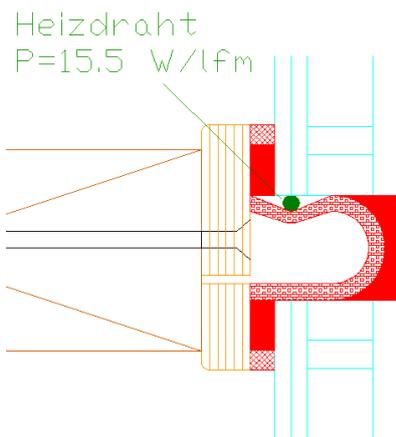


Abbildung 31 – Heizdraht-Variante 1: Lokale Erwärmung des Glasrandes, keine Konvektion im Falzraum

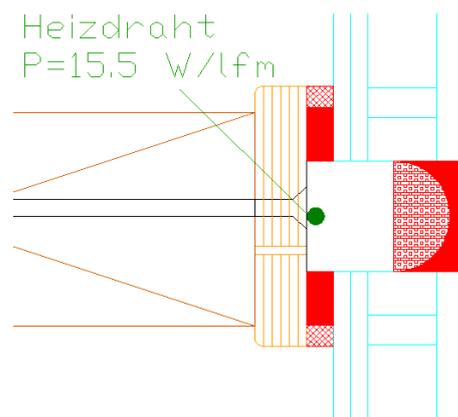


Abbildung 32 – Heizdraht-Variante 2: Indirekte Erwärmung des Glasrandes, Positionierung im Falzraum

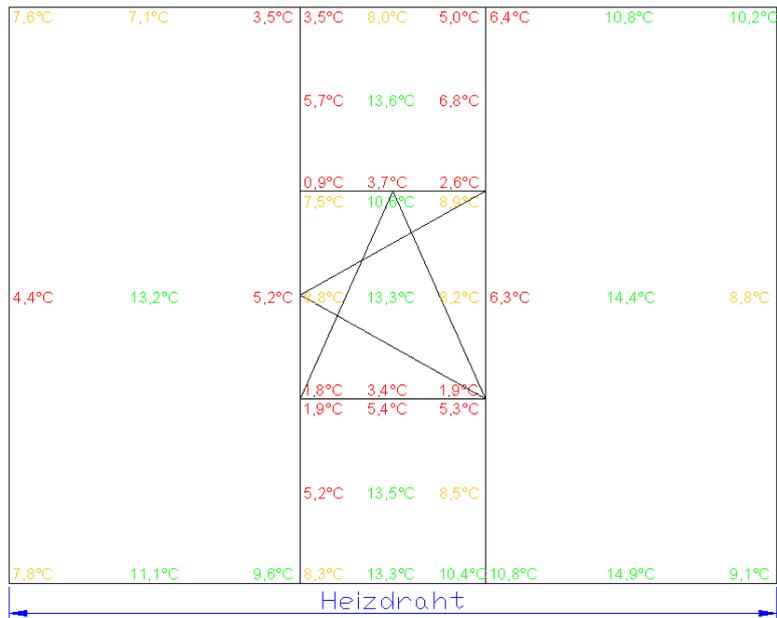


Abbildung 33 – Innenliegende Oberflächentemperaturen der Glasscheibe bei -15 °C Außenklima und aktiviertem Heizdraht, Heizdraht-Variante 1

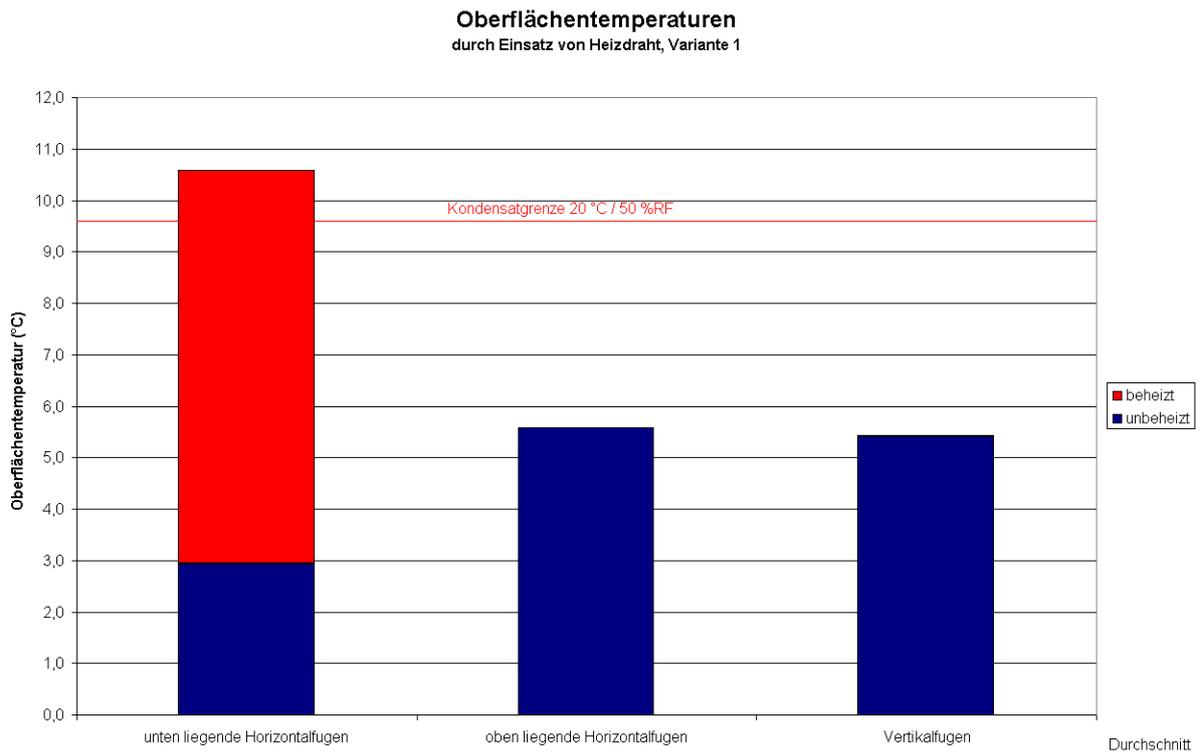


Diagramm 30: Erhöhung der Oberflächentemperaturen durch Heizdrahteinsatz, Variante 1

Eine Aktivierung des, in die Horizontalfuge des Fassadenprototypen eingebauten, Heizdrahtes mit einer Leistung von 15,5 W / lfm bei Einbauvariante 1 führte zu einer Erhöhung der Temperaturen in diesem Bereich auf durchschnittlich 10,6 °C. Kondensat wurde nicht mehr festgestellt. Die auf der Abbildung ersichtliche Positionierung des Heizdrahtes hinter dem U-förmigen Dämmprofil erwirkt zwar eine lokale Erwärmung des Glasrandverbundes, jedoch keine Erhöhung der gesamten Temperatur im Falzraum. Die Temperaturen in den oben liegenden Horizontalfugen bzw. Vertikalfugen blieb unverändert. Eine Anfeuchtung des Holzsubstrates durch ablaufendes Oberflächenkondensat ist damit verhindert.

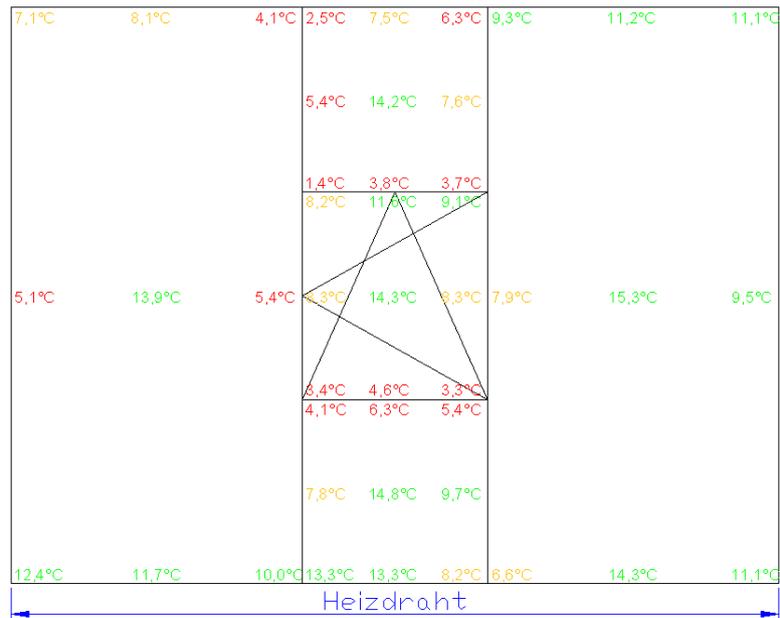


Abbildung 34 – Innenliegende Oberflächentemperaturen der Glasscheibe bei -15 °C Außenklima und aktiviertem Heizdraht, Heizdraht-Variante 2

Oberflächentemperaturen Einsatz von Heizdraht, Variante 2

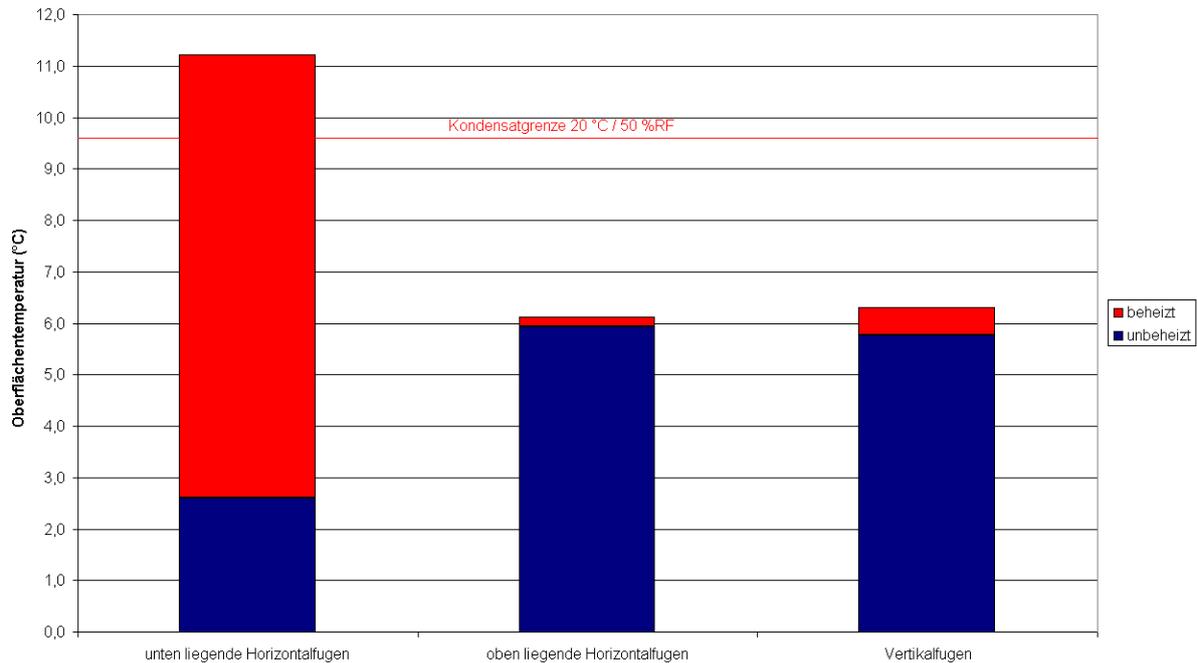


Diagramm 31: Erhöhung der Oberflächentemperaturen durch Heizdrahteinsatz, Variante 2

Eine andere Einbauposition, welche eine Erhöhung der Temperatur im gesamten Falzraum und damit Konvektion und Erwärmung der vertikalen Fugen bewirken soll, wurde zusätzlich untersucht (Heizdraht-Variante 2). Dazu wurde das Fugenfüllmaterial des Fassadenprototyps entfernt, der Heizdraht an einer anderen Position eingebaut und die Fugenfüllung wieder eingebracht.

Die Einbauvariante 2 bewirkt eine Erhöhung der Temperaturen in diesem Bereich auf durchschnittlich 11,2 °C. Kondensat wurde auch hier nicht mehr festgestellt. Durch den direkten Einbau im Falzraum wurde auch eine leichte Erhöhung der Temperaturen an den oben liegenden Horizontalfugen bzw. Vertikalfugen um durchschnittlich 0,4 °C beobachtet. Eine Anfeuchtung des Holzsubstrates durch ablaufendes Oberflächenkondensat ist auch bei Variante 2 verhindert.

Fassadenprototyp 2

Herstellung / Materialien

Materialien:

- Glasscheibe: 4 Isolierglasscheiben 1,25 x 1,25 m, Spezifikation gemäß Kapitel „Methodik“.
- Koppelleiste: Birkenfurnierschichtholzleiste Spezifikation gemäß Kapitel „Methodik“ (Geometrie gemäß Abbildung 36)
- Pfosten – Riegelkonstruktion: Brettschichtholz GL 24 h, Querschnitt: 50 / 140 mm
- Holzbauschrauben gemäß DIN 1052, 5 x 70 mm, alle 120 mm umlaufend
- Klebstoffe: Acrylat, Silikon A und B

Es wurde ein Fassadenprototyp mit 4 quadratischen Glaselementen mit unterschiedlichen Klebstoffen auf einer Pfosten-Riegel-Tragstruktur hergestellt.

Die verzahnte Koppelleiste wurde in Ihrer Geometrie im Vergleich zum Prototyp 1 verändert (Abbildung 36) und mit zwei unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen (Abbildung 44) versehen. Die Eckstöße der Koppelleiste wurden mit unterschiedlichen Varianten an Dichtmaßnahmen ausgeführt. Zwischen Koppelleiste und Pfosten-Riegel-Konstruktion wurden zwei unterschiedliche Varianten an Dichtebenen (Abbildung 42) eingebracht.

Die Fuge wurde mit einer halbkreisförmigen PE-Rundschnur bestückt und nach dem SG-Prinzip mit Silikon Sealant versiegelt (Abbildung 40). Im Sockelbereich sowie oben ist eine Entwässerungs- bzw. Hinterlüftungsöffnung der Fuge vorgesehen.



Abbildung 35: Fassadenprototyp 2

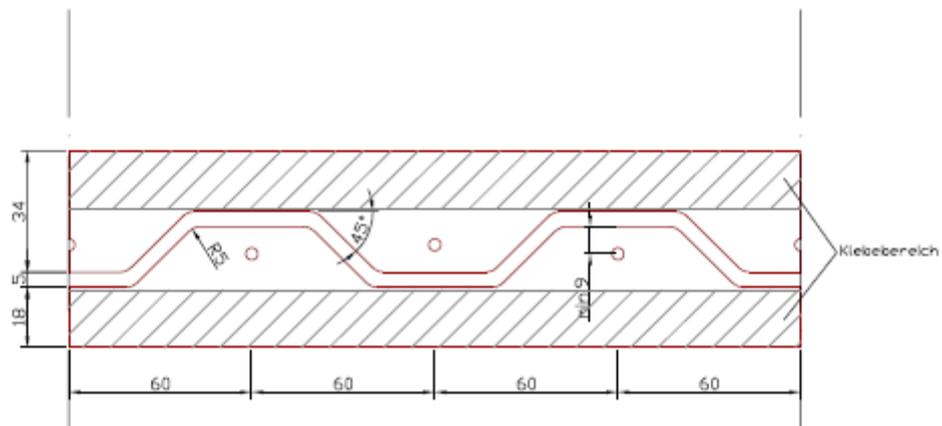
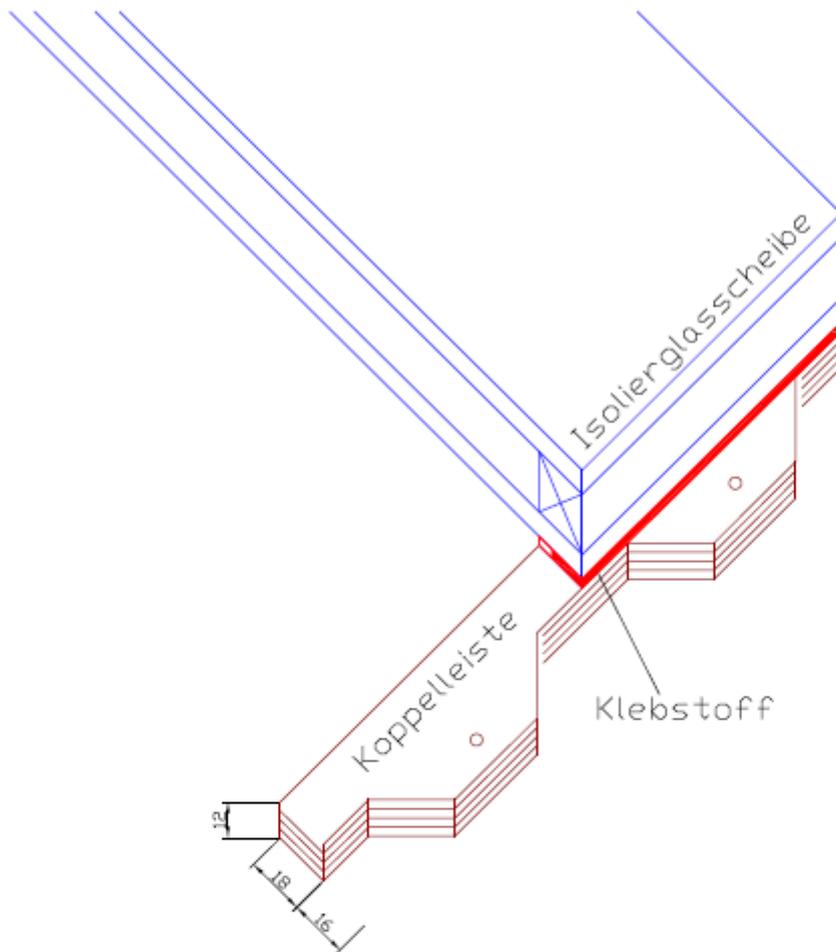


Abbildung 36: Geometrie der Koppelleiste, Fassadenprototyp 2

Glasscheiben

Die 4 verwendeten Isolierglasscheiben hatten eine Dimension von 1250 x 1250 mm. Der Glasaufbau hatte folgende Spezifikation: 6 mm ESG-HST - 16 mm SZR - 8 mm VSG (2 x 4 mm float). Der Randverbund wurde tragend mit einer Dimension von 16 x 10 mm ausgeführt wobei Abstandhalter aus Edelstahl zum Einsatz kamen. Der U-Wert der Verglasung betrug 1,1 W/m²K

Koppelleisten

Die Koppelleiste wurde aus 12 mm Birkenfurniersperrholz (gem. EN 636 [EN636], Klasse 2) hergestellt. Die Geometrie der Koppelleiste wurde dahingehend modifiziert, eine verbesserte Wasserführung auf der Koppelleiste zu gewährleisten und keine horizontalen Flächen für stehendes Wasser zu bieten (Abbildung 36).

Die Oberflächenbehandlung der Koppelleisten wurde mit 2 unterschiedlichen Materialien durchgeführt (Abbildung 44):

Dicklasur (Farbe weiß):

Sikkens Rubbol WP 175 Acryl-Alkydharz-Kombination (Grundierung)

Sikkens Rubbol WF 380 Reinacrylat-Dispersion (Deckschicht)

Versiegelung (Farbe grau):

Disbopox 442 Teflon-verstärkte 2K-Epoxydharzbeschichtung

Die Beschichtung erfolgte in 2 Anstrichen um eine vollständige Flächendeckung zu gewährleisten. Der Bereich für die Verklebung wurde durch Abdeckbänder ausgespart.

Es wurden 3 unterschiedliche Eckverbindungen der Koppelleiste hergestellt.

Hoffmannschwalbe

In beide Leistenenden wurde ein Profil eingefräst, um durch das Kunststoffprofil der Hoffmannschwalbe die beiden, auf Gehrung geschnittenen Enden der Leiste zusammenzuziehen. Die Hoffmannschwalbe wurde zu einer Tiefe bis 10 mm eingebracht. Die Fräsung für die Hoffmannschwalbe erfolgte bei einem projektbeteiligten Fensterhersteller.

Offen

Die Leistenenden wurden auf Gehrung geschnitten und stumpf gestoßen.

Abgedichtet

Die Leistenenden wurden auf Gehrung geschnitten und mit Silikon versiegelt.

HGV-Element

Zur Verklebung der Glasscheiben mit der umlaufenden Koppelleiste wurde die Herstellung im Richtrahmen wie in Kapitel „Methodik“ durchgeführt.

Eine Glasscheibe wurde mit Silikon B mit einer Klebefugendicke von 6 mm, zwei Scheiben mit Acrylatklebstoff mit einer Klebefugendicke von 2 mm und eine weitere Scheibe mit Silikon A mit einer Klebefugendicke von 3 mm verklebt (Abbildung 37).

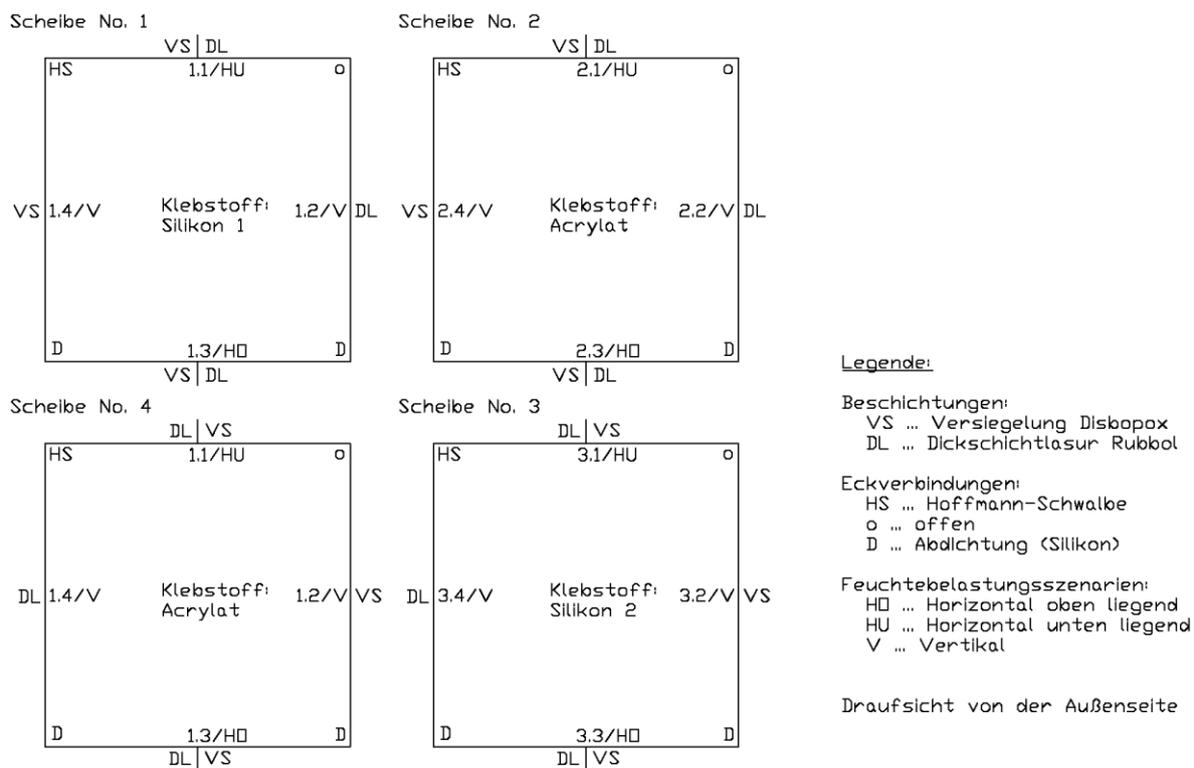


Abbildung 37: Geometrische Anordnung der Fassadenkomponenten, Fassadenprototyp 2

Im Bereich der unbehandelten Stelle der Koppelleiste zeigten sich teilweise offene Stellen, an denen die Oberfläche der Koppelleiste im Falzraum unbehandelt bleibt (Abbildung 38). Diese Stellen sind schwer vermeidbar und wurden bewusst nicht nachbehandelt, um den Einfluss von Fehlstellen in der Beschichtung zu untersuchen. Etwaige Fehlstellen im Bereich des Hirnholzanteils der Koppelleiste müssen unbedingt vermieden werden.

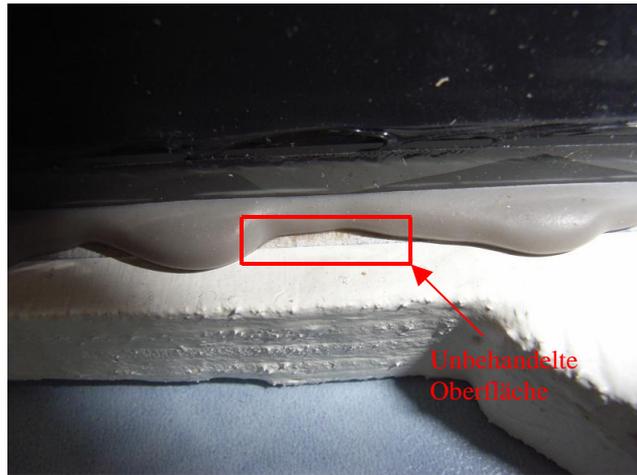


Abbildung 38: Lokale Fehlstelle der Oberflächenbeschichtung, Koppelleiste

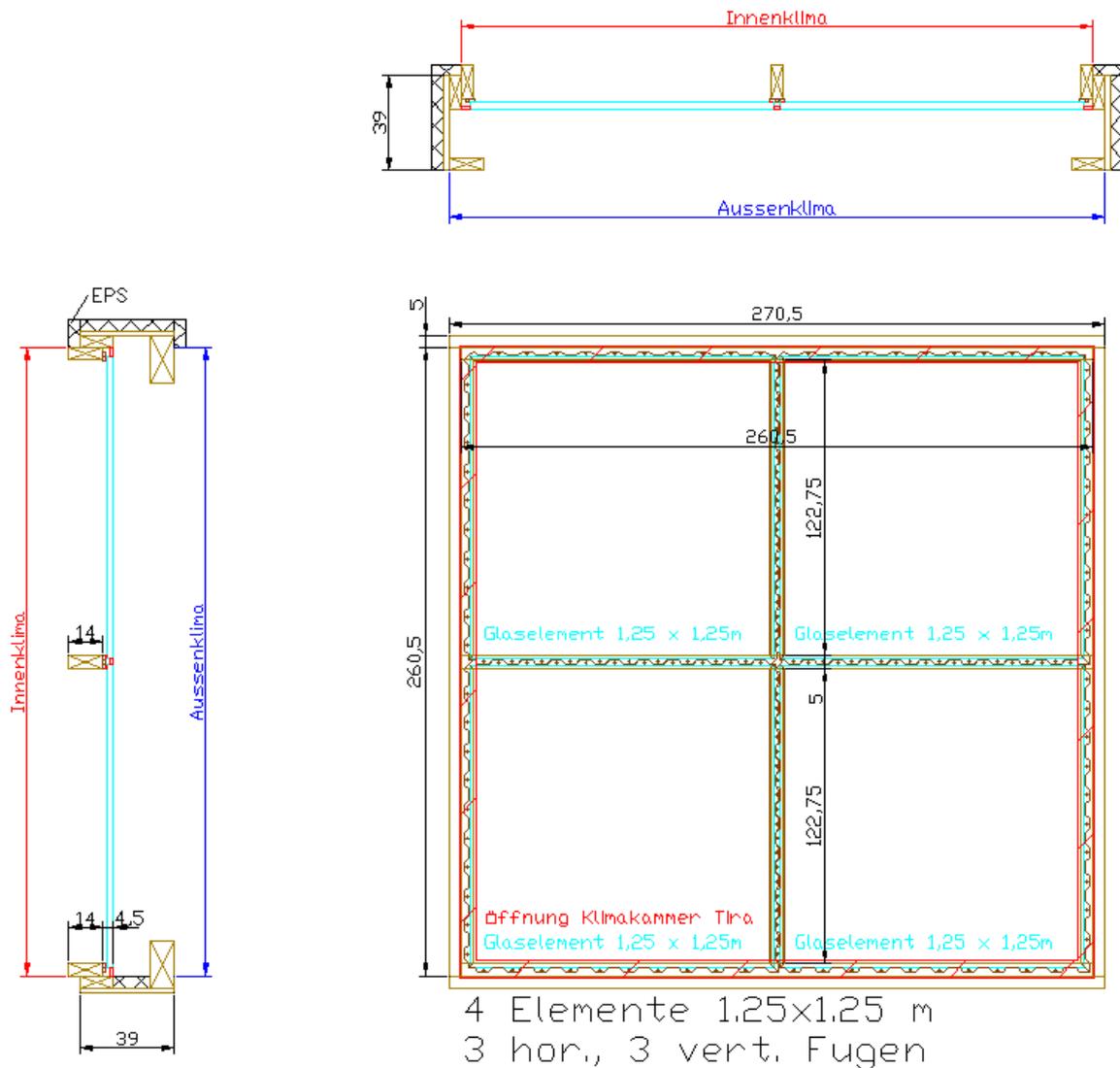


Abbildung 39: Aufbau Fassadenprototyp 2

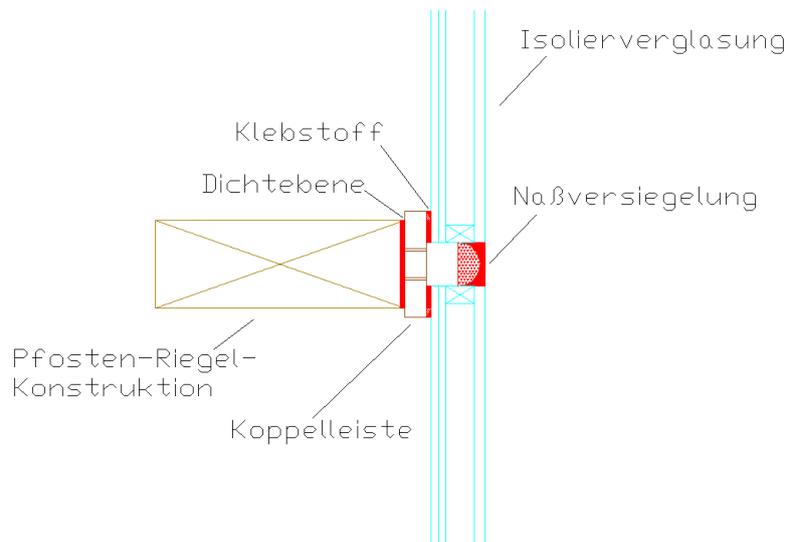


Abbildung 40: Fugengeometrie Fassadenprototyp 2

Zwischen Tragkonstruktion und Koppelleiste wurde eine Dichtebene eingezogen. Diese bestand aus 2 verschiedenen Materialien:

- Typische Fassadensystemdichtung eines Fassadenherstellers
Die untere Nut wurde vor dem Einbau entfernt (siehe Abbildung 41)

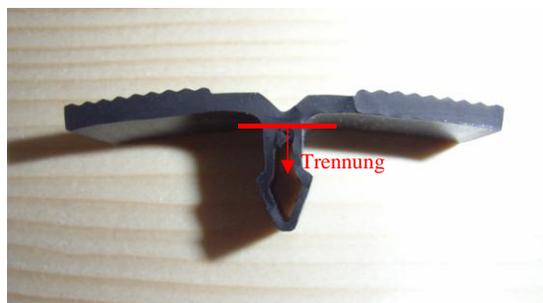
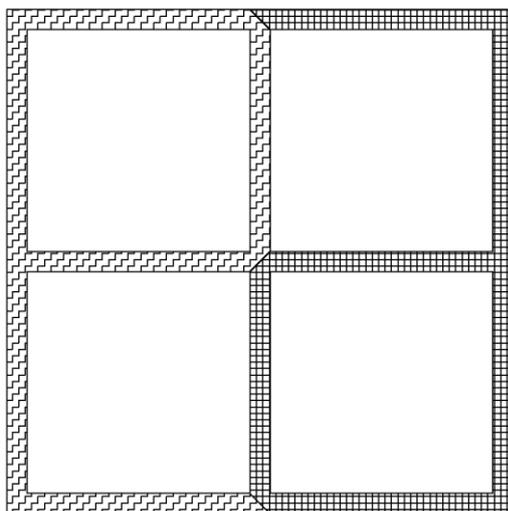


Abbildung 41: Fassadensystemdichtung

- Kompressibles Klebeband der Firma Lohmann, dampfdicht auf Polyesterbasis mit 1 mm kompressiblem Schaumstoffkörper DUPLOCOLL 3702



Abbildung 42: Zwei Dichtungssysteme Tragstruktur / Koppelleiste



-  Fassadensystemdichtung
-  Klebeband

Draufsicht von der
Außenseite

Abbildung 43: Geometrische Anordnung der Dichtungssysteme, Fassadenprototyp 2

Nach Montage der Koppelleiste auf die Tragkonstruktion mittels 5x70 Holzbauschrauben gemäß DIN 1052 wurden die Fassadenfugen mittels einer halbierten Dichtschnur (Durchmesser 30 mm) und Structural Glazing Sealant versiegelt.



Abbildung 44: Fassadenfuge von außen, offen



Abbildung 45: Fassadenfuge von außen, nassversiegelt

Untersuchungen

Luftdichtheit

Der Fassadenprototyp wurde auf einem Fassadenprüfstand luftdicht angeschlossen. Anschließend wurden mehrere Druckstufen (50 Pa, 100 Pa, 150 Pa, 200 Pa, 250 Pa, 300 Pa, 450 Pa und 600 Pa) für eine bestimmte Zeit aufgebracht und der Luftverlust bezogen auf die Fläche und die Fugenlänge ermittelt. Diese Prüfung wurde nach ÖNORM EN 12153 [EN12153] durchgeführt. Die Klassifizierung erfolgte nach ÖNORM EN 12152 [EN12152].

Die aufgebrachten Druckstufen wurden sowohl als Druck (positiv) als auch Sog (negativ) appliziert. Der Luftverlust bezogen auf die Fläche ist Diagramm 32 zu entnehmen. Die Prüfung erreichte die zweitbeste Klasse A3 (Klasse A1 bis Klasse A4). Somit wurde durch die zusätzlichen Abdichtungsmaßnahmen ein gutes Luftdichteverhalten erreicht (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Erreichte Luftdurchlässigkeitsklasse

Höchstdruck P_{\max} (Pa)	Luftdurchlässigkeit $\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$	Klasse
150	1,5	A 1
300	1,5	A 2
450	1,5	A 3
600	1,5	A 4
> 600	1,5	A E

Klassifizierung - Größte zulässige Luftdurchlässigkeit
nach EN 12152:2002

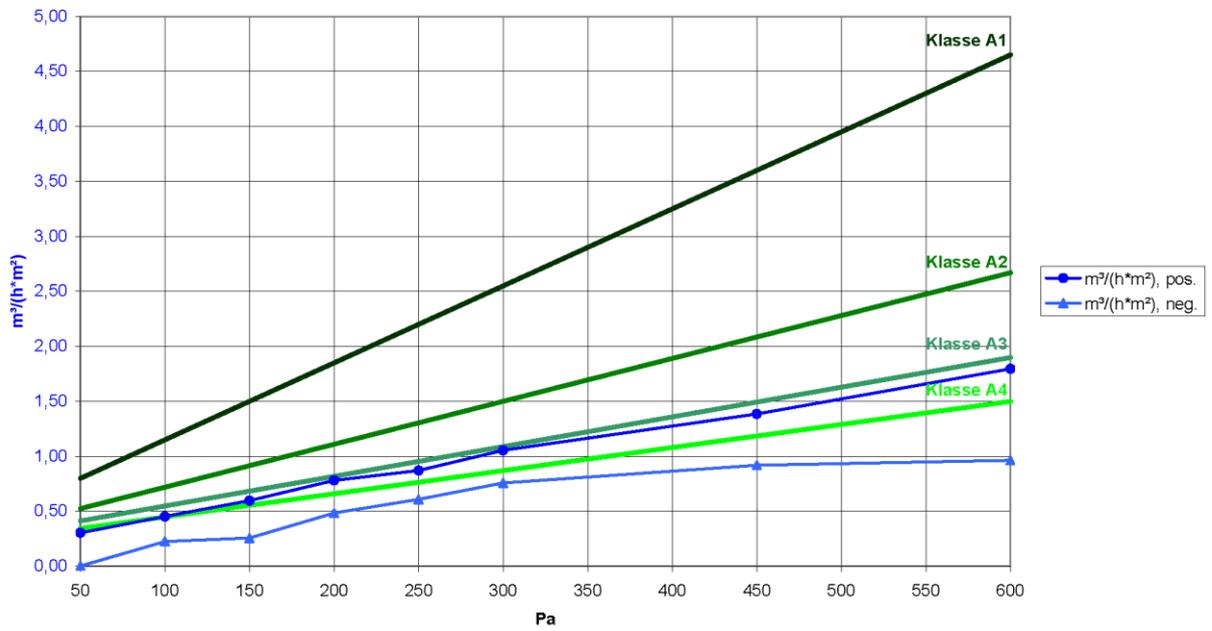


Diagramm 32: Prototyp 2: Klassifizierung der Luftdurchlässigkeit



Abbildung 46: Fassadenprototyp 2 im Fensterprüfstand

Schlagregen

Der Fassadenprototyp wurde auf dem Fassadenprüfstand unter steigenden Druckstufen Schlagregen ausgesetzt. Die dabei aufgebrauchte Wassermenge betrug dabei $2 \text{ l} / \text{m}^2 \cdot \text{min}$.

Es wurden mehrere Druckstufen für eine bestimmte Zeit aufgebracht, bis eine undichte Stelle visuell detektiert wurde. Diese Prüfung wurde nach ÖNORM EN 12155 [EN12155] durchgeführt. Die Klassifizierung erfolgte nach ÖNORM EN 12154 [EN12154]

Beim Eindringen des Schlagregens in die Konstruktion kann ein Zusammenhang mit der Art der Eckausbildung (Abbildung 47) hergestellt werden:

Offene Ecke (O): Klasse R4 (Wassereintritt bei 300 Pa)

Silikon-abgedichtet (D): Klasse R5 (WE bei 450 Pa)

Hoffmann-Schwalbe inkl. Silikon (HS): Klasse R7 (kein Wassereintritt bis 600 Pa)

Somit kann das Verhalten des Fassadensystems gegenüber Schlagregen über die Ausbildung der Eckverbindung der auf Gehrung geschnittenen Koppelleisten gesteuert werden und erreicht bei vollen Abdichtungsmaßnahmen (Hoffmann-Schwalbe inkl. Silikonversiegelung) die höchste Klasse R7 nach ÖNORM EN 12154 [EN12154]. Somit kann eine sehr gute Schlagregendichtheit erreicht werden.

Zwischen Koppelleiste und Pfosten-Riegel-Konstruktion wurde kein eindringendes Wasser detektiert. Die beiden Dichtbandsysteme (Fassadensystemdichtung und Lohmann Klebeband) bieten ausreichende Schlagregendichtheit (siehe Tabelle 17).



Abbildung 47: Lokale Undichtheitsstellen unter Schlagregenbeanspruchung

Tabelle 17: Erreichte Schlagregendichtheitsklassen

Höchstdruck P_{\max} (Pa)	Klasse
150	R 4
300	R 5
450	R 6
600	R 7
> 600	RE xxx

Differenzklimabeanspruchung

Der Fassadenprototyp wurde über den Zeitraum von 57 Tagen in einem Differenzklimaprüfstand untersucht. Hierbei wurden an der raumseitig gerichteten Fassadenseite die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit geregelt. An der außenklimazugewandten Fassadenseite wurde die Lufttemperatur mittels Kühlaggregat geregelt.

Über den Beobachtungszeitraum wurde die Holzfeuchtigkeit in der Pfosten-Riegel-Konstruktion sowie im Koppelleistensubstrat gemessen.

Je nach Position der Messstelle ergeben sich für die Koppelleiste verschiedene Feuchtebelastungsszenarien:

V: Die Koppelleiste liegt vertikal. Sie ist durch Feuchtigkeitsdiffusion beansprucht. Im Falzraum anstehende Feuchtigkeit kann abrinnen.

HU: Die Koppelleiste liegt horizontal an der unteren Seite des Falzes. Die Leiste ist durch anstehende Feuchtigkeit im horizontalen Falzraum stärker als im vertikalen Falzraum belastet. [FEL]

HO: Die Koppelleiste liegt horizontal an der oberen Seite des Falzes. Die Leiste ist durch abrinnendes Kondensat des Glasrandverbundes belastet.

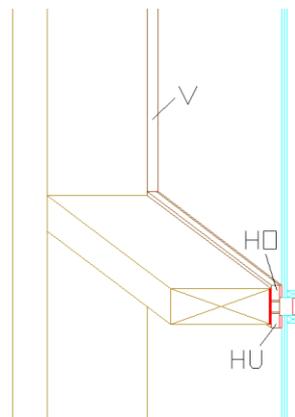


Abbildung 48: Geometrische Anordnung der Holzfeuchtemessstellen

Über den Beobachtungszeitraum wurden drei unterschiedliche Differenzklimata aufgebracht und über einen definierten Zeitraum konstant gehalten.

Ermittelt wurden dabei die Temperatur in der Pfosten-Riegel-Konstruktion sowie in der Koppelleiste und das Außen- sowie Innenklima. Weiters wurde die Holzfeuchtigkeit an 6 Stellen im Konstruktionsvollholz sowie an 21 Stellen in der Koppelleiste mittels elektrischer Widerstandsmessung ermittelt.

Phase 1: Kältephase 1, Innenklima 20 °C / 50 % RF, Außenklima –10 °C / 56 % RF

Die Differenzklimaphase wurde über einen Zeitraum von 25 Tagen gehalten. Auf der Innenseite wurde ein konstantes Klima von 20 °C und 50 % RF gehalten. Auf der Außenseite wurde ein durchschnittliches Klima von im Mittel -10 °C / 56 % RF gehalten. Alle 12 Stunden wurde eine Abtauphase des Kühlaggregates eingeleitet. Die Abtauphasen sind in der Temperaturverlaufskurve des Außenklimas als Zacken zu erkennen.

Phase 2: Kältephase 2, Innenklima 20 °C / 65 % RF, Außenklima –10 °C / 61 % RF

Die Luftfeuchtigkeit im Innenklima wurde für den Zeitraum von 14 Tagen auf 65 % RF erhöht. Auf der Außenseite wurde ein durchschnittliches Klima von im Mittel –10 °C / 61 % RF gehalten.

Phase 3: Rücktrocknungsphase, Innenklima 20 °C / 50 % RF, Außenklima 29 °C / 44 % RF

Auf der Innenseite wurde ein konstantes Klima von 20 °C und 50 % RF gehalten. Auf der Außenseite wurde ein durchschnittliches Klima von im Mittel 29 °C / 44 % RF für 18 Tage gehalten.

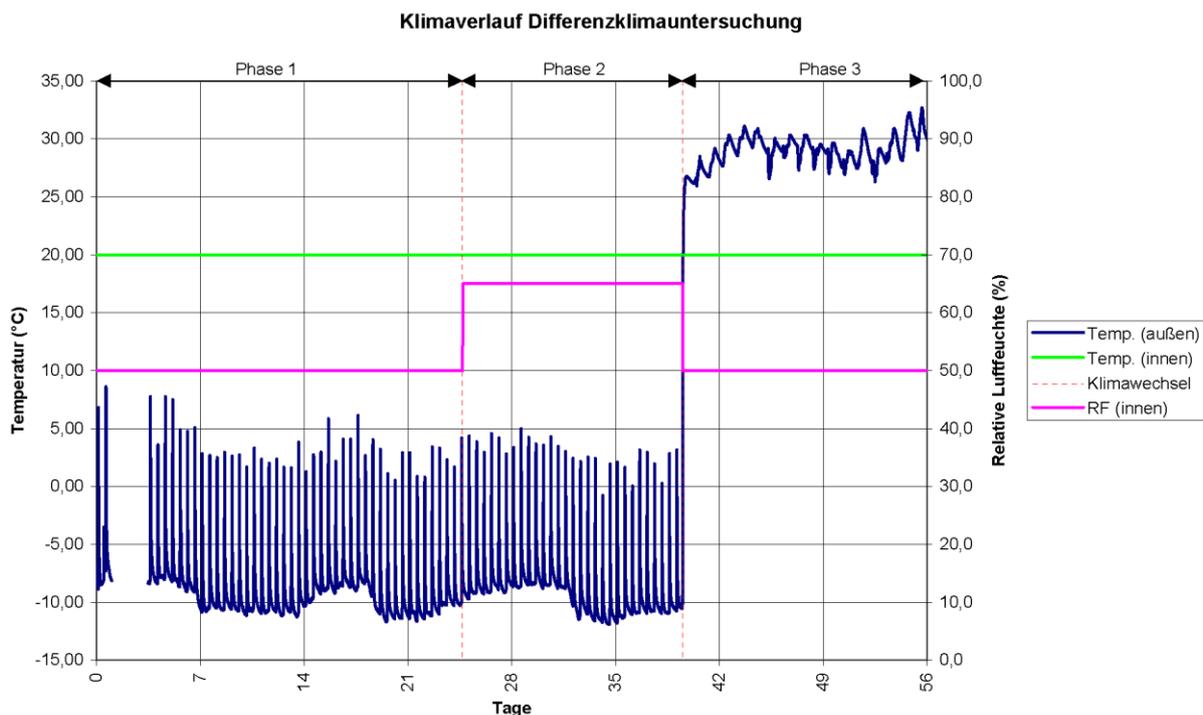


Diagramm 33: Klimaverlauf über Untersuchungszeitraum

Änderungen der Holzfeuchtigkeit

Pfosten-Riegel-Konstruktion

Diagramm 34: Die Pfosten-Riegel-Konstruktion zeigt bei beiden Dichtsystemen (Fassadensystemdichtung und Lohmann Klebeband) keine nennenswerte Erhöhung der Holzfeuchte in der Phase 1. In der Phase 2 zeigt sich eine leichte Zunahme der Holzfeuchtigkeit, insbesondere im Bereich der Fassadensystemdichtung. Die Feuchtezunahme erreicht aber bis auf eine Messstelle kein kritisches Maß und reduziert sich

schnell wieder nach Einleitung der Umkehrphase (Phase 3). Die dampfsperrenden Systeme haben also keine negativen Auswirkungen (Sperrschicht im Wasserdampfpartialdruckgefälle) auf das Feuchteverhalten und sind beide gleich funktionell. Die Applikation des Klebebandes (Firma Lohmann) erweist sich im Holzbau als einfacher.

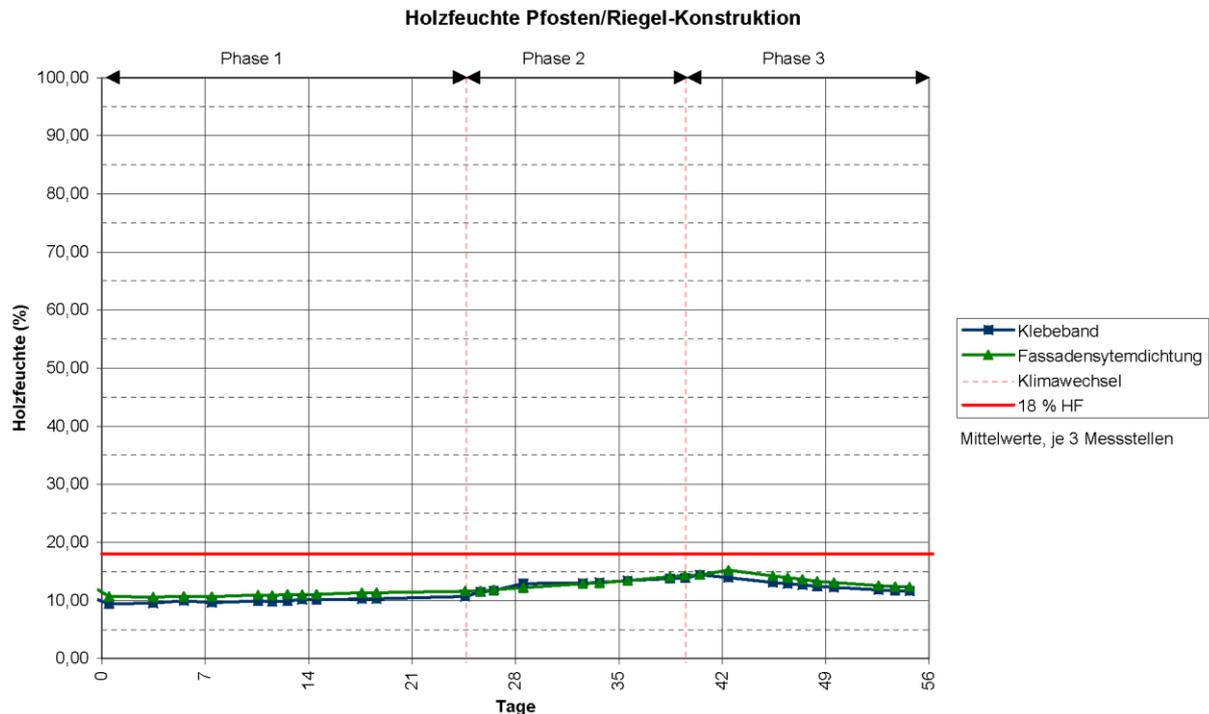


Diagramm 34: Holzfeuchteverlauf Pfosten-Riegel-Konstruktion

Koppelleiste

Bei Erfassung der Holzfeuchtigkeiten in der Koppelleiste wurde nach Position und Beschichtungssystem unterschieden.

Positionen (siehe Abbildung 48):

HO ... Position horizontal oben

HU ... Position horizontal unten

V ... Position vertikal

Beschichtungssystem (siehe Abbildung 37):

DL ... Dickschichtlasur

BS ... Versiegelung

Position horizontal oben:

Diagramm 35: In der Phase 1 bildet sich bereits Oberflächenkondensat an der Glasscheibe im Bereich des Randverbundes (siehe Abbildung 49). Das ablaufende Kondensat bildet einen Wasserfilm auf der Oberflächenbehandlung der Koppelleiste. Dies führt bei der Dickschichtlasur zu einer langsam steigenden Holzfeuchtigkeit. Die Versiegelung zeigt keine Anfeuchtung des Holzsubstrates. In der Phase 2 vermehrt sich das Oberflächenkondensat merkbar. Ein Abfließen des Kondensats auf die Pfosten-Riegel-Konstruktion ist zu beobachten. Des Weiteren steigen die Holzfeuchten in der Koppelleiste rasant auf volle Sättigung des Holzsubstrates. Auch hier ist zu beobachten, dass sich die Dickschichtlasur wesentlich wasserdurchlässiger verhält als die Versiegelung. Ein Quellen der Koppelleiste aus Furnierschichtholz bewirkt in der Dickschichtlasur Risse, welche die Anfeuchtung weiter begünstigen. (Abbildung 50)

In Phase 3 kann eine schnelle Rücktrocknung der mit Dickschichtlasur behandelten Koppelleiste beobachtet werden. Der Feuchterückgang bei der mit Versiegelung behandelten Leiste ist deutlich langsamer.

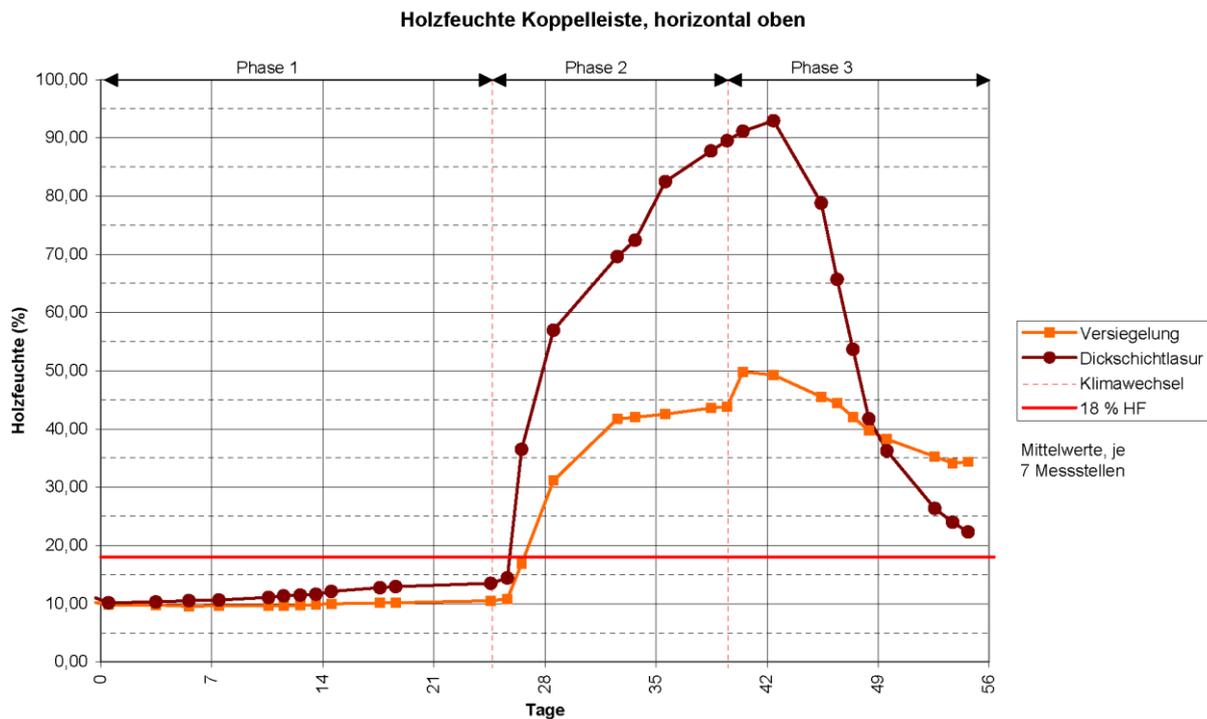


Diagramm 35: Holzfeuchteverlauf Koppelleiste, HO



**Abbildung 49: Oberflächenkondensat
Glasrandverbund**



**Abbildung 50: Quellrisse in der
Dickschichtlasur**

Position horizontal unten:

Diagramm 36: In der Phase 1 ist bei beiden Oberflächenbehandlungen ein leichter Anstieg der Holzfeuchtigkeiten unterhalb des kritischen Maßes von 18 % zu beobachten. Die Versiegelung zeigt keinen Anstieg der Holzfeuchtigkeiten. Nach Umstellung des Innenklimas auf Phase 2 ist ein stärkerer Anstieg der Holzfeuchtigkeit zu beobachten. Insbesondere im Bereich der Dickschichtlasur erhöht sich der Feuchtegehalt auf durchschnittlich 27 % HF. Die Erhöhung des Wasserdampfpartialdrucks im Innenraumbereich bewirkt eine Verschiebung des Taupunkts in die Konstruktion. Dies bewirkt die Anfeuchtung des Substrates. Die Umkehr des Partialdruckgefälles in Phase 3 führt daher schnell zu einer Reduktion der Feuchtigkeiten unterhalb eines kritischen Maßes.

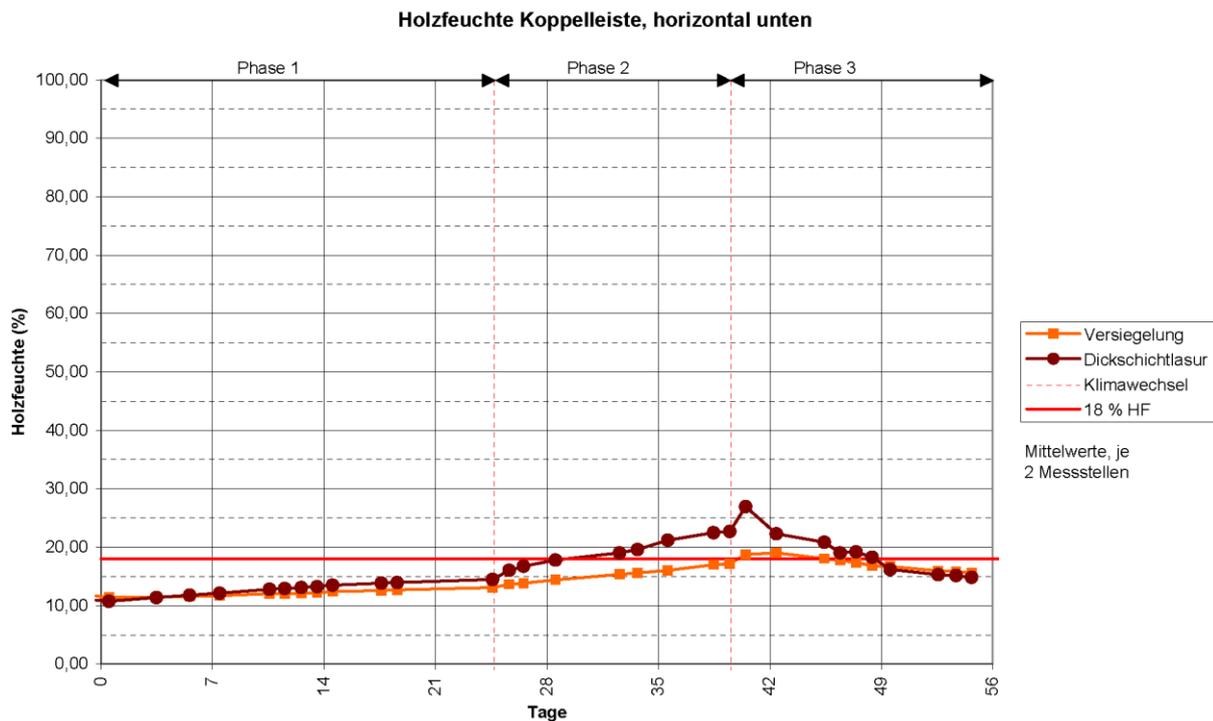


Diagramm 36: Holzfeuchteverlauf Koppelleiste HU

Position vertikal:

Diagramm 37: Die Holzfeuchtigkeiten verhalten sich in Phase 1 und Phase 2 analog zu den Messstellen „horizontal unten“. Auch hier ist ein leichter Feuchteanstieg in Phase 1 sowie eine Verschiebung des Taupunkts in das Holzsubstrat in Phase 2 erkennbar. Auch der Vorgang des Rücktrocknens in Phase 3 geht ähnlich schnell vor sich und lässt auf ein gutmütiges Verhalten im Hinblick auf sommerliche Rücktrocknung zu.

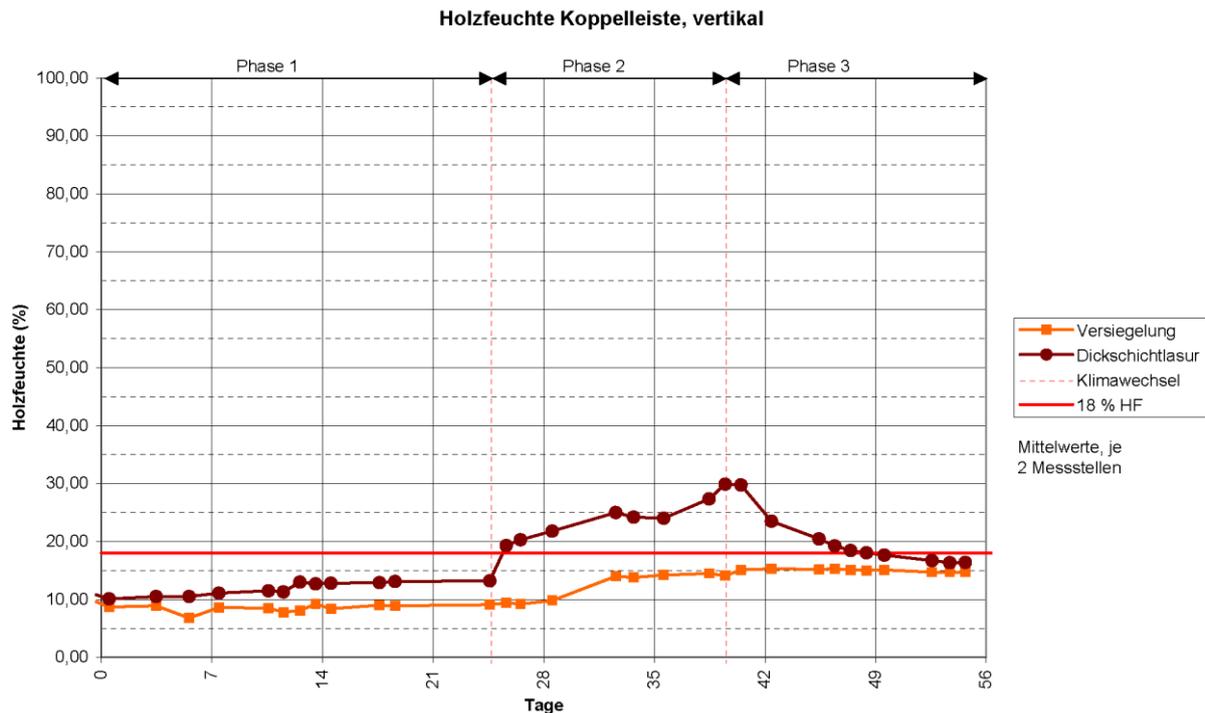


Diagramm 37: Holzfeuchteverlauf Koppelleiste V

Revision des zerlegten Prüfkörpers:

Bei der Luftdichtemessung wurden lokale Undichtigkeiten mittels Thermoanemometer gemessen. Diese zeigten sich nur bei den acrylatverklebten Glasscheiben. Die undichten Stellen wurden temporär mittels Silikondichtmasse verschlossen, um eine Luftdichtepfung durchführen zu können.

Eine Revision des zerlegten Prüfkörpers zeigte ein stellenweise adhäsives Ablösen des Acrylatklebstoffes zwischen Klebstoff und Glassubstrat mit Längen bis zu 30 cm, welches durch die klimatischen Beanspruchungen hervorgerufen wurden (Abbildung 51 - Abbildung 54). Die Anfeuchtung des Klebstoffes sowie die Zwängungen aus dem Quellverhalten der Koppelleiste haben zu einem lokalen Versagen der Klebstoffverbindung geführt.



Abbildung 51: Ablösung des Acrylatklebstoffs im Eckbereich

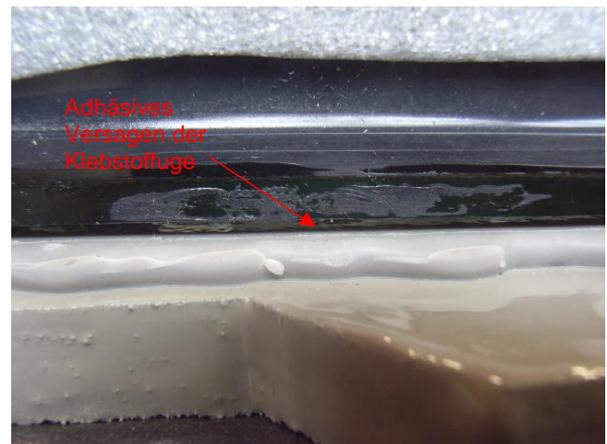


Abbildung 52: Adhäsive Ablösung, Glas und Klebstoff

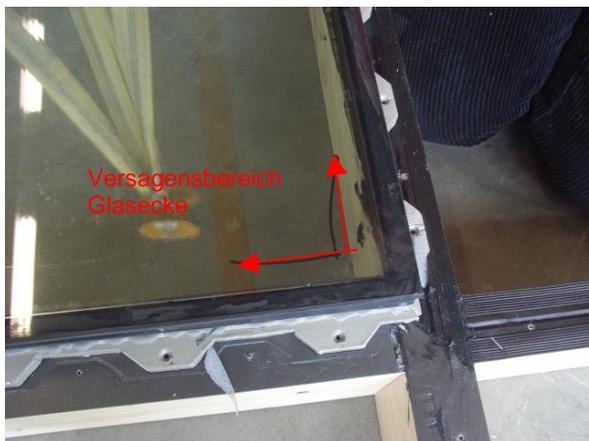


Abbildung 53: Ablösung des Acrylatklebstoffs im Eckbereich

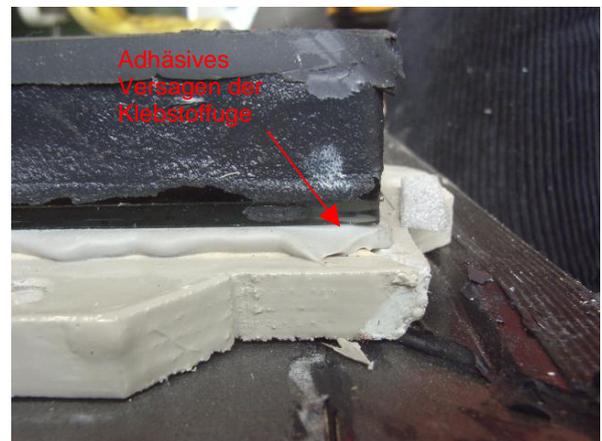


Abbildung 54: Adhäsive Ablösung, Glas und Klebstoff

Eine weitere Quelle für Undichtigkeiten kann durch ein Ausfransen der obersten Furnierschicht der Koppelleiste hervorgerufen werden. Solche Fehlstellen konnten beim Zerlegen als Negativabdruck im Dichtband beobachtet werden und sind auf folgender Abbildung zu erkennen. Um solche Fehlstellen zu vermeiden, ist auf eine plane Beschaffenheit der Koppelleiste Augenmerk zu legen.

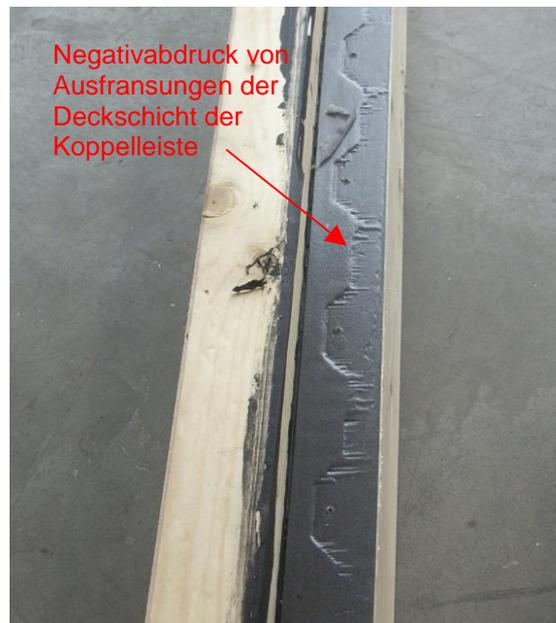


Abbildung 55: Lokale Undichtheiten, Ausfransung der Koppelleiste

Fassadenprototyp 3 (Zweigeschoßige Fassade)

Herstellung / Materialien

Materialien:

- Glasscheibe: 4 Floatglasscheiben 1,25 x 2,50 m, Spezifikation gemäß Kapitel „Ermittlung der statischen Leistungsfähigkeit von HGV-Elementen“ – „Herstellung der HGV-Elemente“.
- Koppelleiste: Birkenfurnierschichtholzleiste Spezifikation gemäß Kapitel 4.2 (Geometrie gemäß Abbildung 36)
- Pfosten-Riegel-Konstruktion: Brettschichtholz GL 24 h, Querschnitt: 50 / 140 mm
- Holzbauschrauben gemäß DIN 1052, 5 x 70 mm, alle 120 mm umlaufend
- Klebstoffe: Acrylat und Silikon A

Geprüft wurde ein zweigeschoßiger Prüfkörper mit insgesamt 4 Scheibenelementen (je 1250 x 2500 mm). Bei der Untersuchung wurde lediglich ein Hauptaugenmerk auf die Luftdichtheit gelegt. Daher kam eine Einfachverglasung aus 8 mm Floatglas zum Einsatz. Die eingesetzten Klebstoffe waren bei drei Glasscheiben der Acrylat-Klebstoff sowie bei einer Glasscheibe der Silikonklebstoff.

Zwischen Koppelleiste und P/R-Konstruktion wurde das im Fassadenprototyp 2 verwendete Klebeband DUPLOCOLL 3702 eingebracht. Die Verschraubung erfolgte mit den Standard-Holzbauschrauben 5/70. Die P/R-Konstruktion bestand aus BS11 (60 / 160 mm) mit ausgeklinkter Eckverbindung (siehe Kapitel „Ermittlung der statischen Leistungsfähigkeit von HGV-Elementen“ – „Herstellung der HGV-Elemente“).

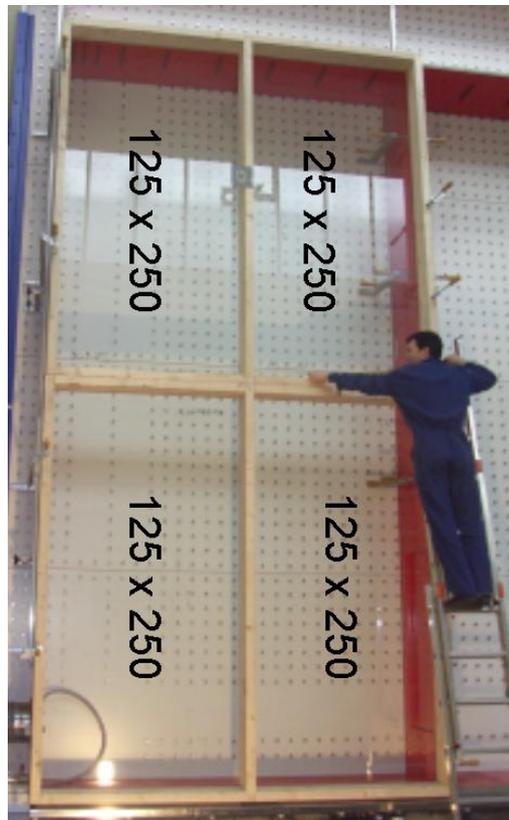


Abbildung 56: Fassadenprototyp 3

Untersuchungen

Luftdichtheit

Der Fassadenprototyp wurde auf einem Fassadenprüfstand luftdicht angeschlossen. Anschließend wurden mehrere Druckstufen (50 Pa, 100 Pa, 150 Pa, 200 Pa, 250 Pa, 300 Pa, 450 Pa und 600 Pa) für eine bestimmte Zeit aufgebracht und der Luftverlust bezogen auf die Fläche und die Fugenlänge ermittelt. Diese Prüfung wurde nach ÖNORM EN 12153:2000 durchgeführt. Die Klassifizierung erfolgte nach ÖNORM EN 12152:2002.

Die aufgetragenen Druckstufen wurden sowohl als Druck (positiv) als auch Sog (negativ) appliziert. Es wurde keine Nullmessung mit Folie durchgeführt. Die Messungen sind also inklusive Undichtigkeiten des Prüfstandes welche im Allgemeinen als sehr gering einzuschätzen sind. Der Luftverlust bezogen auf die Fläche bzw. Fugenlänge ist Abbildung 58 zu entnehmen. Die Prüfung erreichte die beste Klasse A4 (Klasse A1 bis Klasse A4) (siehe Tabelle 18).



Abbildung 57: Zweigeschoßiger Prototyp im Fassadenprüfstand

Im Versuch zeigte sich eine lokale Undichtheit im Bereich der Ausklinkung der P/R-Konstruktion. Hier kann mittels Kompribändern eine verbesserte Luftdichtheit der Holztragstruktur selbst erreicht werden.

Tabelle 18: Erreichte Luftdurchlässigkeitsklasse

Höchstdruck P_{\max} (Pa)	Luftdurchlässigkeit $\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$	Klasse
150	1,5	A 1
300	1,5	A 2
450	1,5	A 3
600	1,5	A 4
> 600	1,5	A E

Klassifizierung - Größte zulässige Luftdurchlässigkeit
nach EN 12152:2002

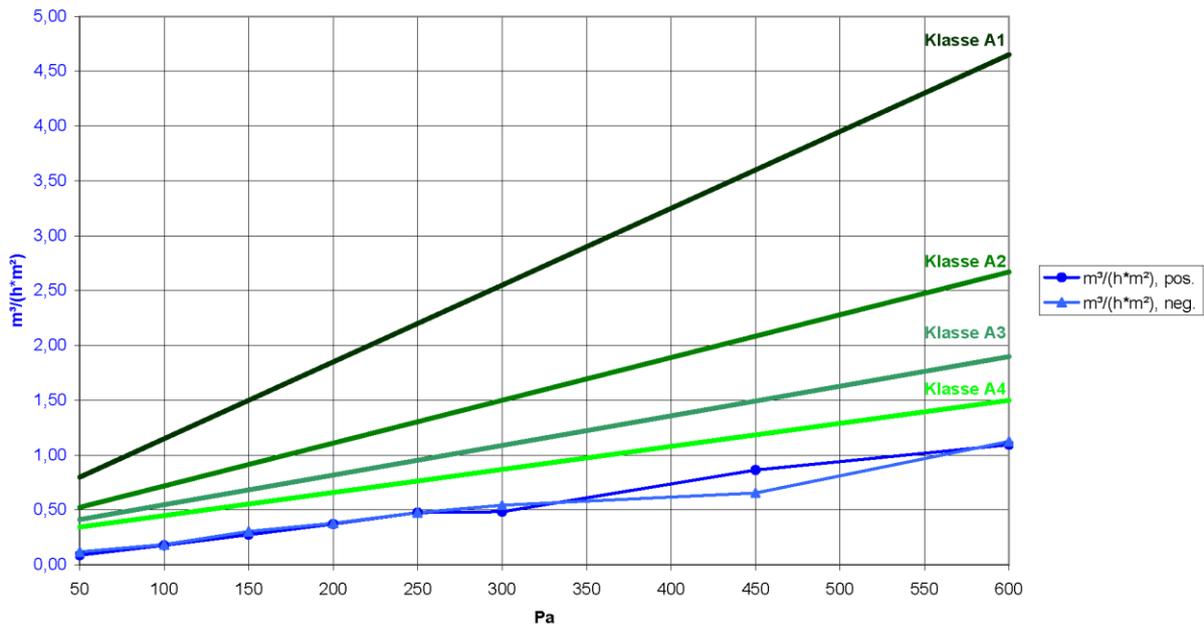


Abbildung 58: Prototyp 3: Klassifizierung der Luftdurchlässigkeit

Forschungsgebäude Arsenalgelände

Herstellung / Materialien

Die Herstellung der HGV-Elemente und verwendeten Materialien wurde analog zu Kapitel 0 - Fassadenprototyp 2 ausgeführt. Aufbau und Montage werden unter Kapitel „Technische Umsetzung“ – „Forschungsgebäude Arsenalgelände“ genauer beschrieben.

Untersuchungen

Die am Forschungsgebäude angestellten Untersuchungen sollen ergänzend zu den Laborversuchen Erkenntnisse über das Verhalten des Fassadensystems unter klimatischen Einflüssen bieten. Schwerpunkt bei der Betrachtung wird vor allem auf das Langzeitverhalten unter realen Bedingungen gelegt. Die komplexen Zusammenhänge aus Wärmeeintrag zufolge Sonneneinstrahlung, Dampfdiffusion und -konvektion können nicht durch Computersimulationen und nur erschwert unter Laborbedingungen quantifiziert werden.

Hier soll das Forschungsgebäude qualitative Aussagen zu den einzelnen Untersuchungsschwerpunkten zulassen.



Abbildung 59: Fassadenprototyp Forschungsgebäude

Luftdichtheit (Blower Door)

Am 11.03.2008 wurde beim Forschungsgebäude ein Blower Door Test durchgeführt. Hierbei wurde die Gesamtluftdichtheit des Gebäudes beurteilt. Das Gebäude hat ein Netto-Volumen von 218 m³. Es wurden Druckstufen von 10 bis 60 Pascal aufgebracht. Das Ergebnis ergab einen Wert von $n_{50} = 1,3 \pm 7 \%$. Das Resultat bietet keine Aussage über die Luftdichtheit der Glasfassade. Die Messung lieferte jedoch eine qualitative Aussage über lokale Undichtigkeiten. Bei der durchgeführten Leakage-Ortung wurden keine nennenswerten lokalen Undichtigkeiten festgestellt.



Abbildung 60: Blower Door Messung im Versuchsgebäude

Feuchtigkeit in der Koppelleiste

Der Feuchtegehalt des Holzsubstrates hat einen großen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Fassadenkonstruktion. Eine ständige Durchfeuchtung ist zu vermeiden und die Rücktrocknung des Systems ist sicherzustellen. Da die Differenzklimaversuche im Labor stets unter konstanten klimatischen Randbedingungen durchgeführt wurden, ist das Verhalten der Fassadenstruktur unter instationären Klimabedingungen von zusätzlichem Interesse. Die Messungen im Forschungsgebäude bieten die Möglichkeit, das Verhalten der Fassadenstruktur unter wechselnden Tages- und Jahresganglinien zu beobachten und zu bewerten.

Gemessen wurde Außen- und Innenklima, Temperaturen in der Fassade (Diagramm 38 - Diagramm 42) sowie die Holzfeuchtigkeiten der Koppelleiste mittels elektrischer Widerstandsmessung (Abbildung 62).

Außen- und Innenklimate

Die Außen- und Innenklimate sind folgenden Ganglinien zu entnehmen:

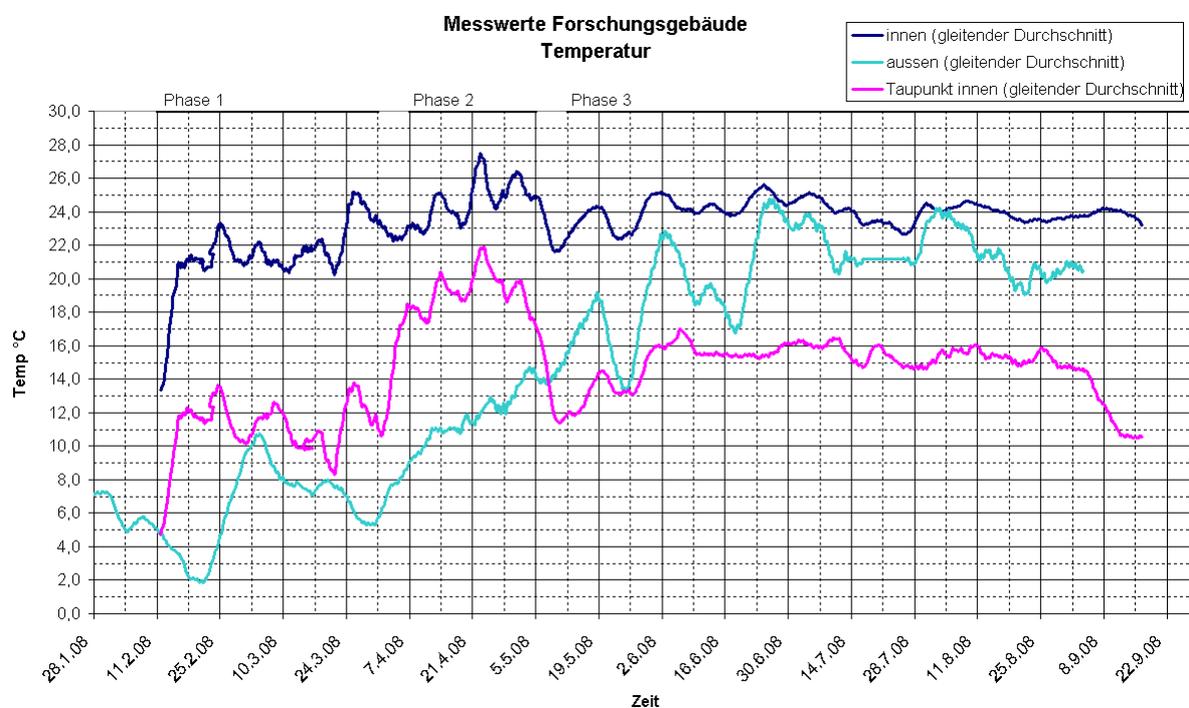


Diagramm 38: Temperatur außen und innen sowie Taupunkt des Innenklimas

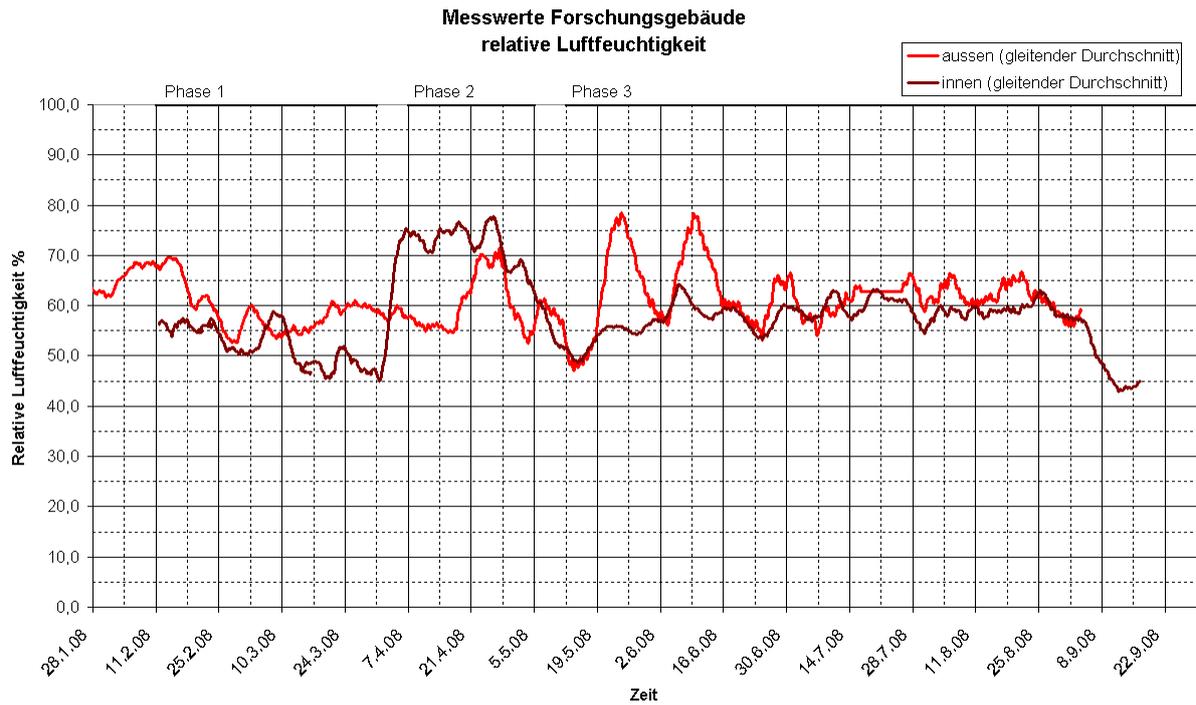


Diagramm 39: Relative Luftfeuchtigkeit außen und innen

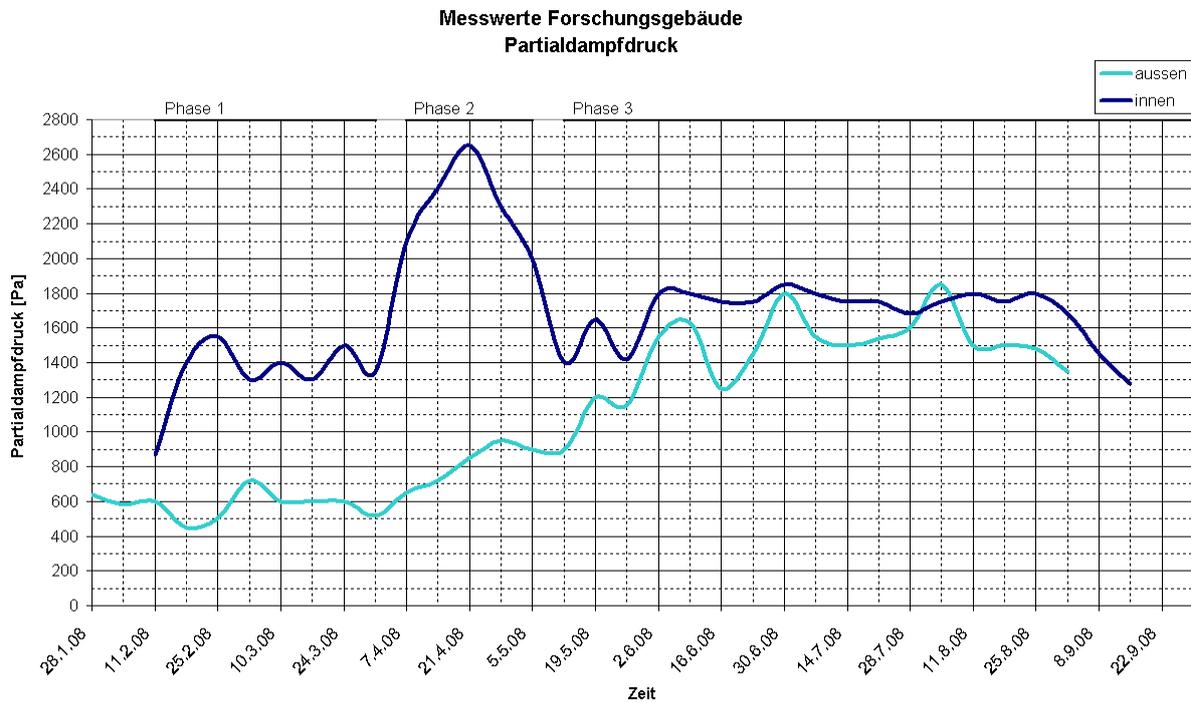


Diagramm 40: Partialdampfdruck außen und innen

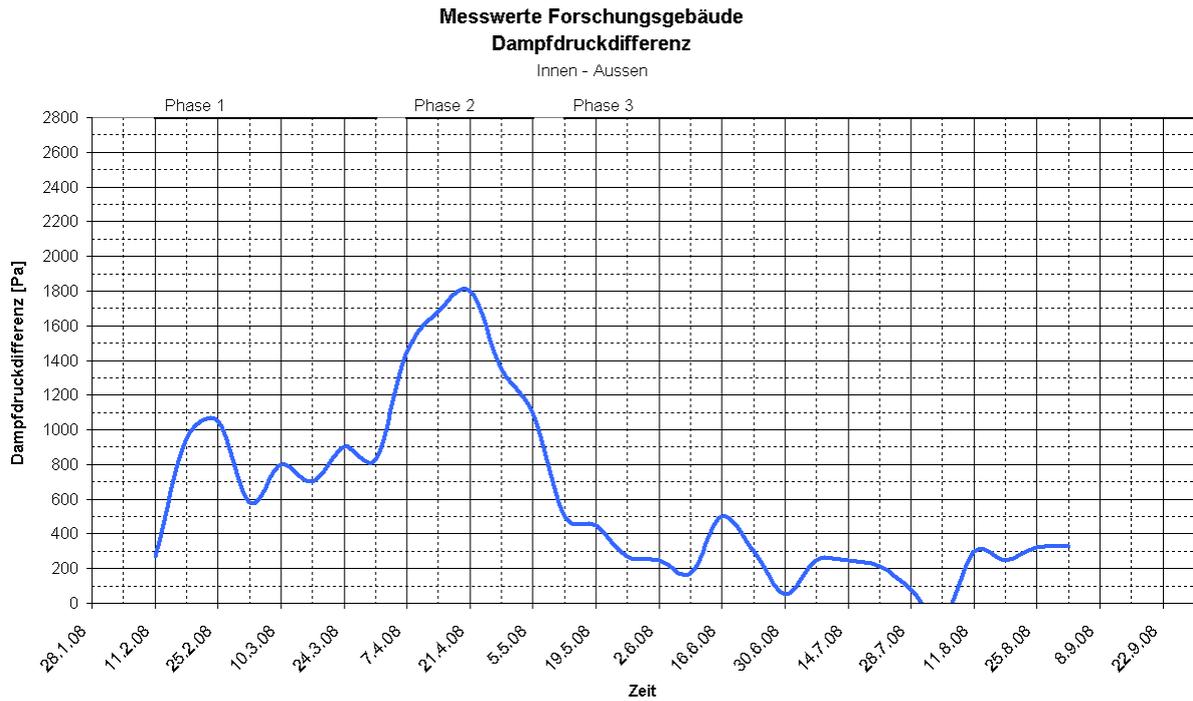


Diagramm 41: Partialdampfdruck außen und innen

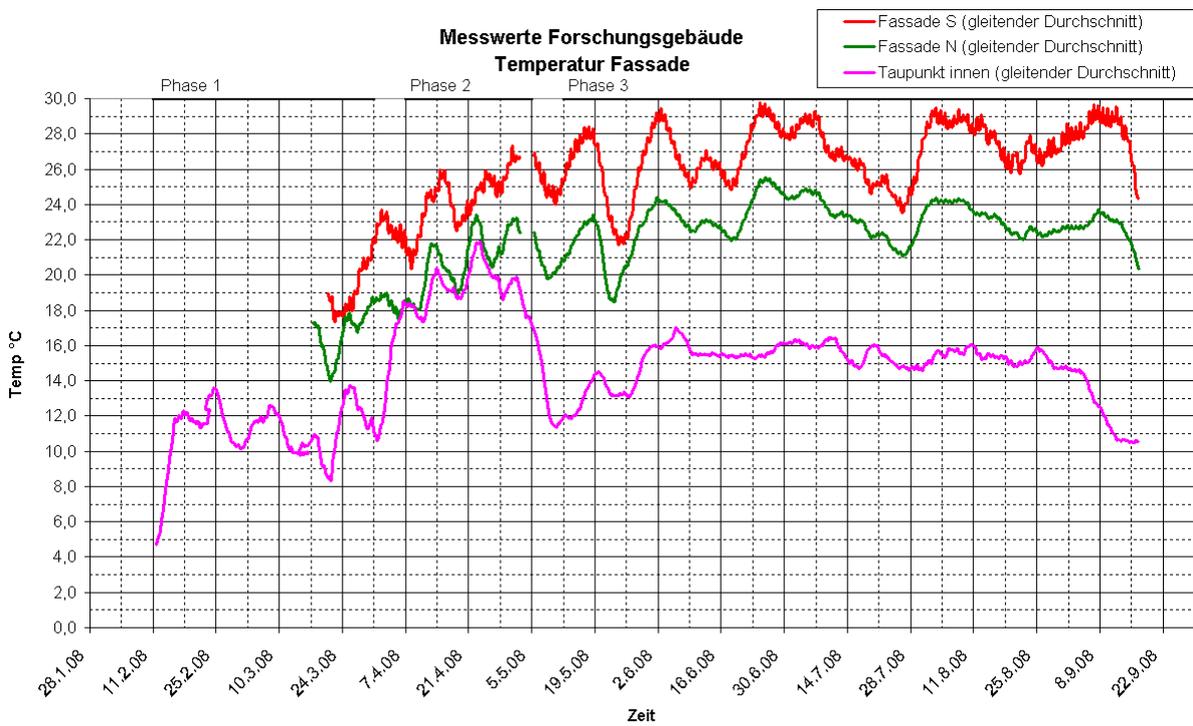


Diagramm 42: Temperaturen in der Fassade (geglättet) Nord und Süd sowie Taupunkt (Innenklima)

Im Beobachtungszeitraum wurden 3 unterschiedliche Innenklimate eingeregelt. In der **Phase 1 vom 11.02.2008 bis 31.03.2008** wurde ein moderates Innenklima mit durchschnittlich **20 °C / 50 % RF** eingestellt. Auf Grund der warmen Außentemperaturen zwischen 7 und 14 °C wurde in **Phase 2 vom 07.04.2008 bis 05.05.2008** das Innenklima auf durchschnittlich **24 °C / 75 % RF** hochgeregelt um ein starkes Dampfdruckgefälle zu erreichen. Dabei wurde zeitweise eine Dampfdruckdifferenz von bis zu 1800 Pa erreicht. Dies entspricht der 1,4-fachen Dampfdruckdifferenz bei einem Differenzklima von 20 °C / 65 % RF und -12 °C / 80 % RF. Dabei wurden zeitweise Taupunkttemperaturen von +22 °C im Innenklima erreicht, welche schon bereichsweise oberhalb der Temperaturen in der Nordfassade liegt. Durch das hohe Dampfdruckgefälle sowie die hohen Taupunkttemperaturen in Phase 2 soll eine starke Anfeuchtung des Holzsubstrates provoziert werden, wie sie im Winter stattfinden könnte. In **Phase 3 vom 12.05.2008** wurde das Innenklima mit durchschnittlich **23 °C / 60 % RF** eingestellt, dies entspricht etwa dem sommerlichen Innenklima eines Wohnbereiches.

Feuchteverlauf im Holzsubstrat

Die Messung der Holzfeuchtigkeit wurde mittels elektrischer Widerstandsmessung ca. alle 1-2 Wochen durchgeführt. Insgesamt wurden an 16 Messstellen Werte erfasst. Dabei wurde nach folgenden Kriterien unterschieden:

- Beschichtungsart (Dickschichtlasur und Versiegelung, vgl. Diagramm 46)
- Position (vertikale und horizontale Koppelleiste, vgl. Diagramm 45)
- Ausrichtung der Fassade (Nord und Süd, vgl. Diagramm 44)

Der Verlauf der Holzfeuchtigkeiten in der Koppelleiste sind folgenden Diagrammen zu entnehmen:

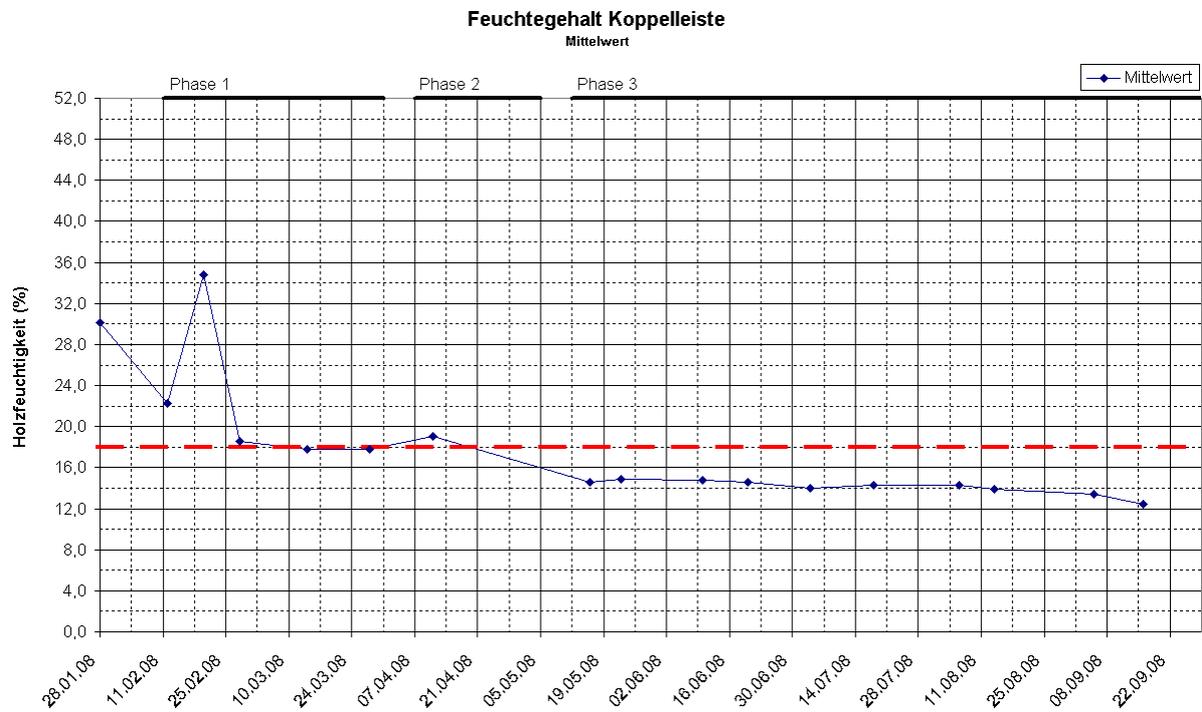


Diagramm 43: Feuchtegehalt der Koppelleiste, Mittelwert

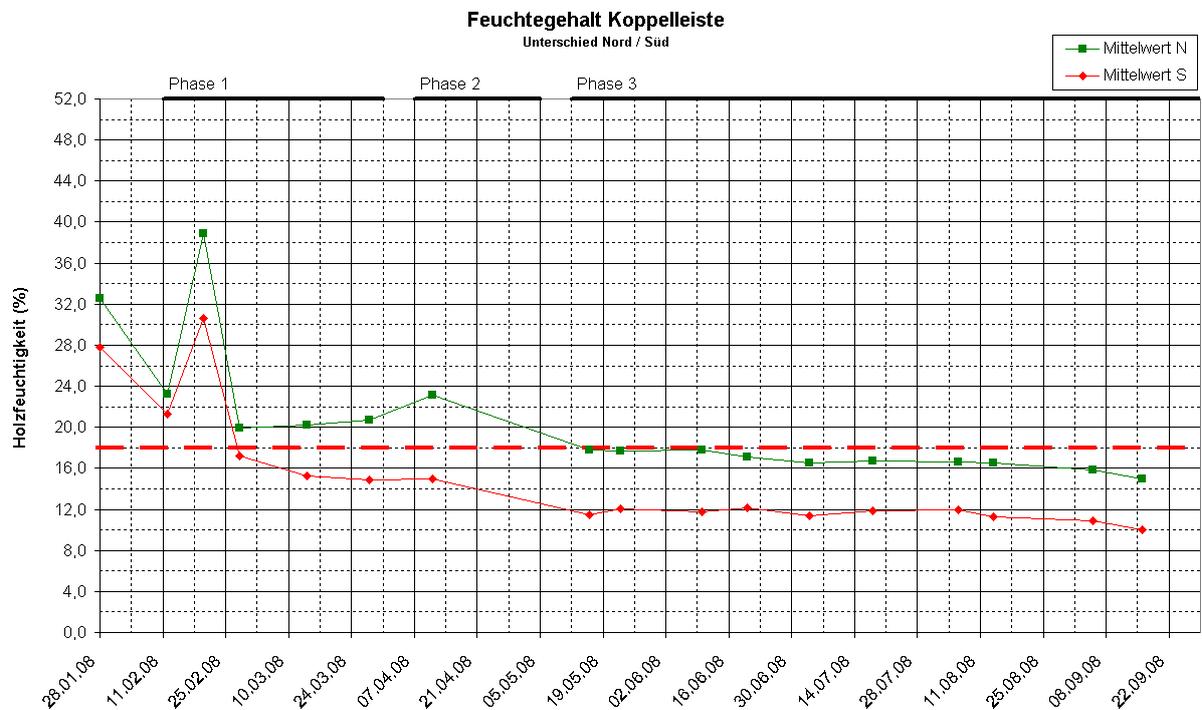


Diagramm 44: Feuchtegehalt der Koppelleiste, Unterschied Nord / Süd

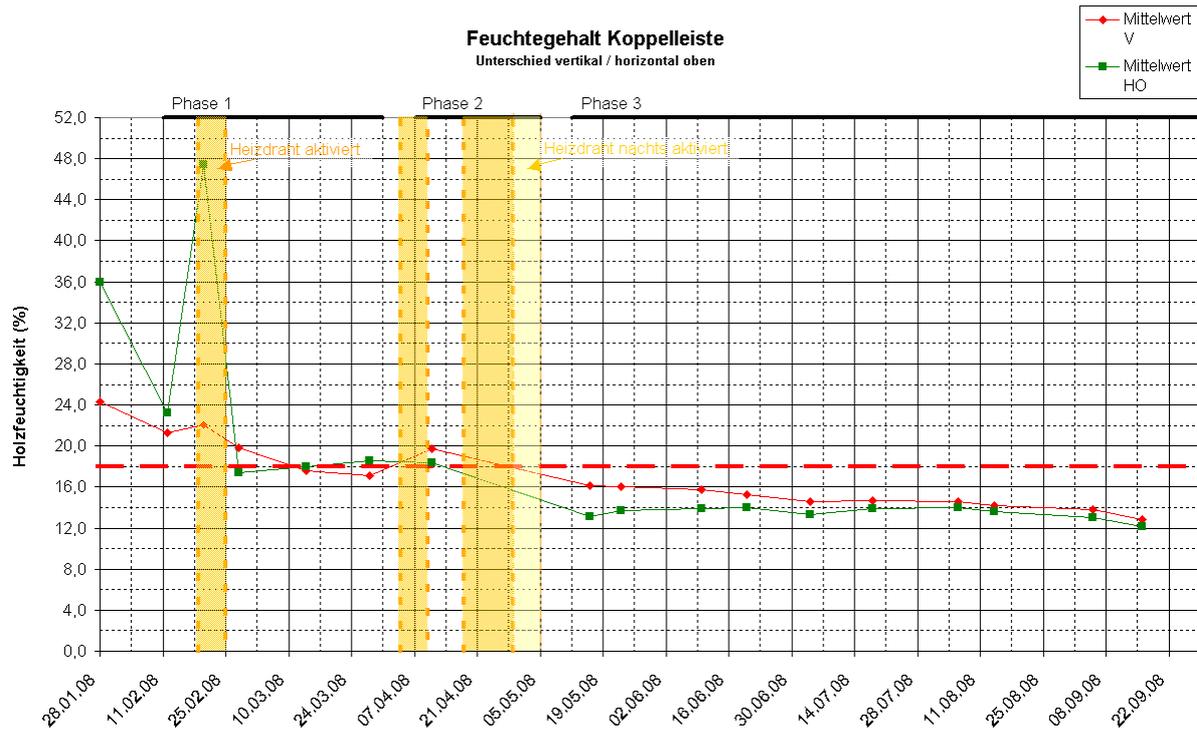


Diagramm 45: Feuchtegehalt der Koppelleiste, Unterschied horizontal / vertikal

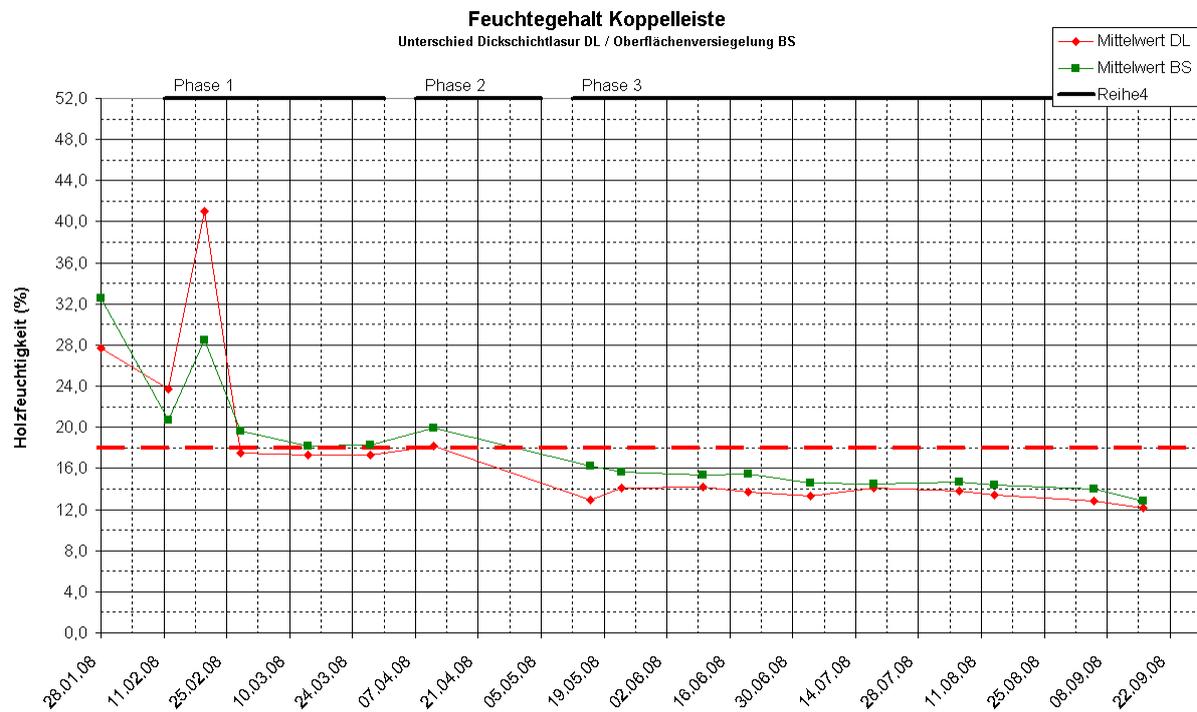


Diagramm 46: Feuchtegehalt der Koppelleiste, Unterschied Oberflächenbeschichtung

Der Aufbau des Gebäudes erfolgte unter regnerischen Wetterbedingungen. Die Wandkonstruktion wurde nass. Bei der ersten Holzfeuchtemessung wurde daher eine durchschnittliche Holzfeuchtigkeit von 30 % gemessen. Es zeigt sich, dass die horizontalen Leisten stärker dem Regen exponiert waren und daher höhere Feuchtigkeiten besitzen. Innerhalb der ersten beiden Wochen ist eine Reduktion der Holzfeuchtigkeit von durchschnittlich 8 % zu erkennen. Bei Phase 1 startet die Klimatisierung des Innenraums. Durch vorherrschende kalte Außenklimate (Einzelwerte bis -7 °C) stieg die Holzfeuchtigkeit an. Der Anstieg ist bei der Dickschichtlasur stärker als bei der Oberflächenversiegelung. Hauptsächlich betroffen von der Holzfeuchtigkeitszunahme sind die horizontalen Leisten im Schwellenbereich, die von am Glas entstehenden Oberflächenkondensat beansprucht werden. Durch Aktivierung des Heizdrahtes am 18.02.2008 für eine Woche kann das Oberflächenkondensat vermieden werden und ein Rückgang der Holzfeuchtigkeiten unterhalb der durchschnittlich 18 % ist zu beobachten.

Ab 07.04.2008 wurde ein starkes Dampfdruckgefälle von bis zu 1800 Pa erzeugt. Es herrschte ein feuchtwarmes Innenklima von 24 °C / 75 % RF. Der Taupunkt erreichte zeitweise Temperaturen von 22 °C und reichte damit bereits an Temperaturen heran, die an der innenliegenden Fassadenstruktur selbst gemessen wurden. Die extremen Klimabedingungen hatten zum Ziel, ungünstige Differenzklimate zu erschaffen um die Holzstruktur künstlich anzufeuchten.

Anfänglich wurde starkes Oberflächenkondensat am Glas festgestellt. Dieses wurde in weiterer Folge durch Aktivierung des beheizten Randverbundes verhindert. Das extreme Innenklima wurde über 4 Wochen gehalten. Trotzdem konnte eine kontinuierliche *Reduktion* der Holzfeuchtigkeiten beobachtet werden. Zu Beginn der Klimaphase 3 befanden sich die gemessenen Holzfeuchtigkeiten bereits durchschnittlich unterhalb von 16 %.

Ein weiterer interessanter Punkt ist der Einfluss der Ausrichtung des Fassadensystems. Die Holzfeuchtigkeiten in der nördlich ausgerichteten Fassade betragen stets ca. 4 % mehr als die baugleiche südlich ausgerichtete Fassade. Der Energieeintrag der Sonneneinstrahlung reduziert die Holzfeuchtigkeiten deutlich.

Temperatur in der Fassadenfuge

Die Temperatur in der Fassadenfuge hat große Einflüsse auf das Kriechverhalten der Klebstofffuge (vgl. Kapitel „Leistungsfähigkeit der Klebstofffuge“ – „Dauerlast (Kriechen)“) aber auch auf die Rücktrocknung des Holzsubstrates unter Wärmeeinwirkung (vgl. Kapitel „Fassadenprototyp 2“ – „Differenzklimabeanspruchung“).

In der Literatur sind nur unzureichende Angaben über die tatsächlich entstehenden Temperaturen sowie dem Einfluss der Himmelsrichtung in Fassadensystemen zu finden. Aus diesem Grund wurde an den beiden baugleichen Fassadensystemen Temperaturmessungen durchgeführt. Es wurden zwei Messstellen je Himmelsrichtung jeweils in den vertikalen Koppelleisten in 1,25 m Höhe angebracht. Die Temperaturmessung erfolgte in der Koppelleiste nahe der Klebstofffuge.



Abbildung 61: Messung der Temperatur nahe der Klebstoffuge

Fassadentemperatur S (Extremwerte: MAX: +51 °C / MIN: 9,5 °C)

Fassadentemperatur N (Extremwerte: MAX: +30 °C/ MIN: 9,9 °C)

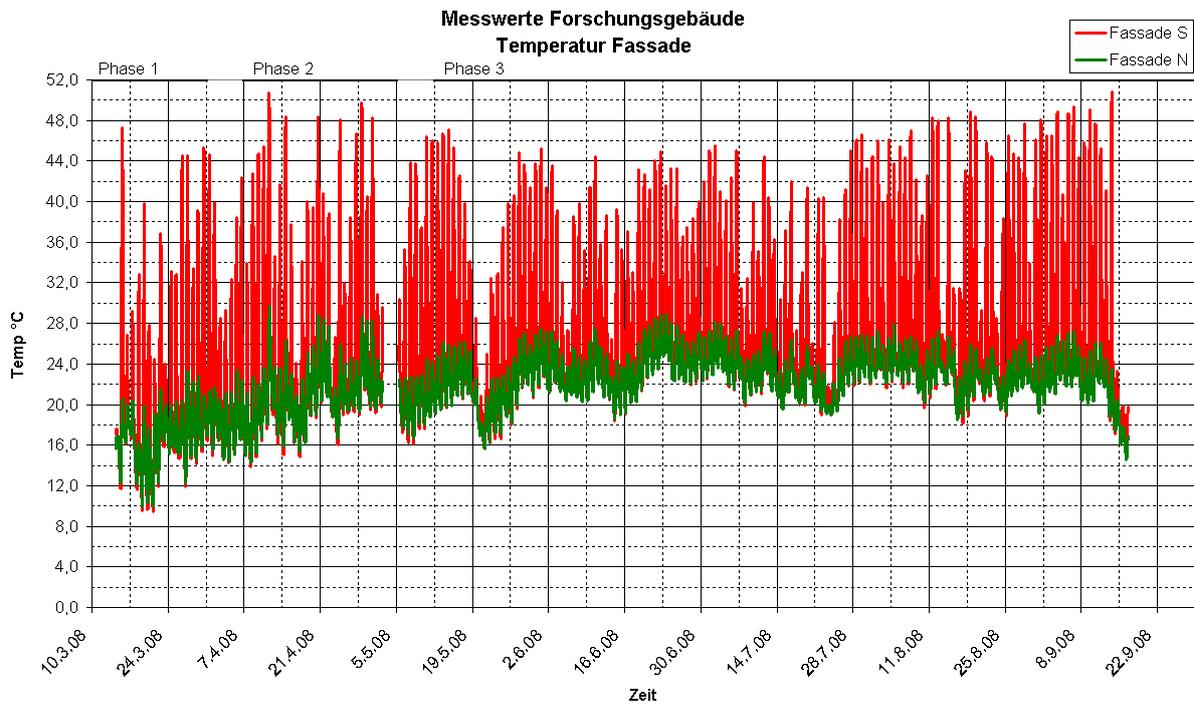


Diagramm 47: Temperaturverlauf Nord / Süd

Gemessen wurde an jeweils zwei Messstellen nördlich und zwei Messstellen südlich. Die beiden zusammengehörigen Messstellen weichen in Ihren gemessenen Werten durchschnittlich 0,2 bis 0,3 K voneinander ab. Der oben erkennbare Temperaturverlauf zeigt daher die Mittelwerte der beiden Messstellen.

Im Vergleich Nord / Süd zeigt sich ein deutlicher Unterschied in den gemessenen Maximaltemperaturen. Südlich wurden Maximalwerte von 51 °C erreicht. Diese liegen 21 K über den gemessenen Temperaturen im Norden. Im Diagramm ist auch deutlich erkennbar, das im Wesentlichen die Temperaturspitzen voneinander abweichen. Die erreichten Minimalwerte bzw. der durchschnittliche Temperaturverlauf sind gleich. Die durch Sonneneinstrahlung hervorgerufenen Temperaturspitzen haben einen deutlichen Einfluss auf das Verformungsverhalten unter Dauerlast der Klebstoffverbindung.

Absetzverhalten der Glasscheiben

An jeder der 8 Isolierglasscheiben wurde links und rechts die Vertikalbewegung erfasst. Die Messung erfolgte durch auf die Glasscheibe geklebte Stahlwinkel mittels Distanzmessverfahren. Die gemessenen Distanzen geben Auskunft über das Setzungsverhalten der Glasscheiben und deren Klebstoffverbindung. Die Messung wurde ca. jede Woche durchgeführt. Eine erste Messung (Nullmessung) wurde am 29.11.2007 im Herstellwerk unmittelbar nach der Scheibenmontage in der Wandkonstruktion durchgeführt. Die weiteren Messungen erfolgten nach Montage der Wandkonstruktion im Gebäude.

Es zeigt sich vor allem für den Acrylatklebstoff ein stark temperaturabhängiges Verformungsverhalten unter Dauerlast (analog zu Kapitel 0 - Dauerlast (Kriechen)).

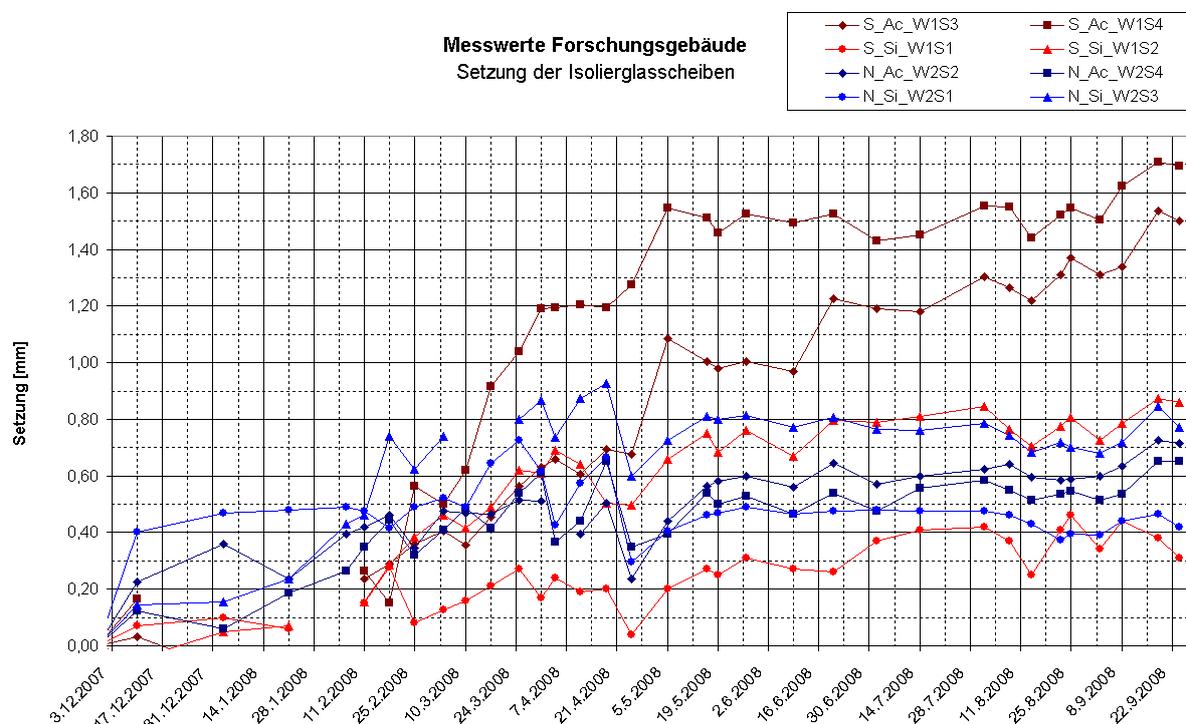


Diagramm 48: Zeitlicher Verlauf der Setzungen der Isolierglasscheiben

Messwerte Forschungsgebäude
Setzung der Isolierglasscheiben nach 295 Tagen

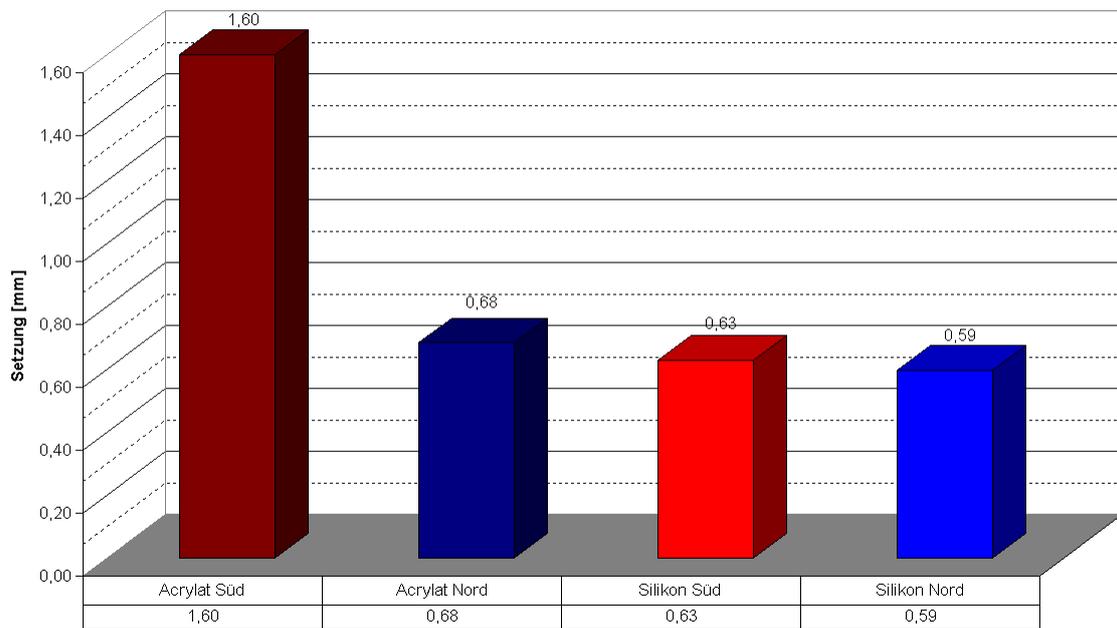


Diagramm 49: Setzungen der Isolierglasscheiben (nach 295 Tagen)



Abbildung 62: Messung des Scheibenabsetzverhaltens sowie der Holzfeuchtigkeit

Dauerhaftigkeit der Klebstoffverbindung

Bei den HGV-Elementen zeigte sich beim Acrylatklebstoff bereits nach kurzer Zeit eine kohäsive Ablösung des Klebstoffes vom Glassubstrat. Die Ablösung begann im Eckbereich und setzte sich bei manchen Elementen nahezu vollständig fort. Es konnte beobachtet werden, dass der Vorgang bei Durchfeuchtung des Klebstoffes ausgelöst und durch hohe Temperaturen begünstigt wurde.



Abbildung 63: Kohäsives Versagen des Acrylatklebstoffes zwischen Glas und Klebstoffsubstrat

4.2.2.2 Leistungsfähigkeit der Fassadenkomponenten / Zusammenfassung

Dichtungsebene zwischen Koppelleiste und P/R-Konstruktion

Aus den unterschiedlichen Untersuchungen an den Fassadenprototypen 1-3 ergeben sich folgende Luft- und Schlagregendichtheiten für die Abdichtungssysteme zwischen Koppelleiste und Pfosten-Riegel-Konstruktion:

Tabelle 19: Dichtebene zwischen Holztragstruktur und HGV

	Luftdichtheit	Schlagregendichtheit
Ohne weitere Dichtungsmaßnahmen	< 150 Pa (< Klasse A 1)	300 Pa (R 5)
Konventionelle Fassadensystemdichtung	450 Pa (Klasse A 3)	600 Pa (R 7)
Kompressibles Klebeband	600 Pa (Klasse A 4)	600 Pa (R 7)

In der Untersuchung hat sich das kompressible Klebeband als die praxistauglichste Möglichkeit erwiesen, eine Abdichtung herzustellen. Die Applikation ist durch die selbstklebende Beschaffenheit am einfachsten. Durch den weichen Schaumstoffkörper

werden Unebenheiten der Holztragstruktur sowie lokale Faserausrisse der Koppelleiste besser ausgeglichen als mit der vergleichsweise starrerem konventionellen Fassadensystemdichtung.

Abdichtung der Eckverbindung (Gehrung) der Koppelleiste

Aus den unterschiedlichen Untersuchungen an den Fassadenprototypen 1-3 ergeben sich folgende Luft- und Schlagregendichtheiten für die Abdichtung der Eckverbindung der rechtwinklig aufeinander stehenden Koppelleisten:

Tabelle 20: Eckausbildung der Koppelleiste

	Luftdichtheit	Schlagregendichtheit
Gehrungsschnitt ohne weitere Abdichtungsmaßnahmen	< 150 Pa (< Klasse A 1)	300 Pa (R 5)
Gehrungsschnitt mit Silikonversiegelung	450 Pa (Klasse A 3)	450 Pa (R 6)
Hoffmann-Schwalbe mit Silikonversiegelung	450 Pa (Klasse A 4)	600 Pa (R 7)
Silikonverfüllung einer definierten Stoßfuge	600 Pa (Klasse A 4)	600 Pa (R 7)

Das Setzen der Hoffmannschwalbe erweist sich bei der filigranen Dimension der Koppelleiste als schwierig und weniger praktikabel. In der Untersuchung hat sich das Einbringen von Silikon in eine definierte Fuge (3 – 5 mm) zwischen den beiden Koppelleisten als am praxistauglichsten erwiesen und erreicht die besten Werte hinsichtlich Luftdichtheit und Schlagregendichtheit. Weiters können etwaige Maßabweichungen der Glaskantenlänge und Koppelleistenlänge durch die Fuge ausgeglichen werden.

Oberflächenbeschichtung der Sperrholz-Koppelleiste

Aus den unterschiedlichen Untersuchungen an den Fassadenprototypen 1-3 sowie dem Forschungsgebäude ergeben sich folgende Erkenntnisse über die Feuchteaufnahme der Koppelleiste mit unterschiedlichen Oberflächenbeschichtungen:

Es zeigt sich unter Differenzklimabelastung eine Zunahme der Feuchtigkeit im Koppelleisten-Substrat. Besonders betroffen unter der Zunahme der Feuchtigkeit zeigen sich hier jene Koppelleisten, welche unter direktem Wasserandrang durch ablaufendes Oberflächenkondensat der Glasscheibe stehen. Das Abfließen des Kondensats auf die Holzstruktur ist daher zu verhindern oder der Einsatz eines Heizdrahtes zur Abdeckung der klimatischen Extremsituationen (hohen Luftfeuchtigkeit innen, niedrige Außentemperaturen) ist zu empfehlen um Oberflächenkondensat zu vermeiden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mittels Heizdraht (15,5 W/lfm) die gewünschten kondensatfreien Oberflächentemperaturen erreicht werden können.

Die Betrachtung der unterschiedlichen Beschichtungssysteme zeigt, dass dichtere Systeme prinzipiell einen Feuchteandrang stärker verzögern, aber unter direktem Wasserandrang (ablaufendes Oberflächenkondensat) eine Anfeuchtung nicht verhindern können. Eine Rücktrocknung wird durch die dichteren Systeme wiederum verzögert. Bei beiden untersuchten Systemen zeigt sich über den Jahresverlauf im Versuchsgebäude eine Rücktrocknung des Holzsubstrates unterhalb des kritischen Bereichs von 18 % Holzfeuchte.

4.2.2.3 Koppelleiste aus Alternativmaterialien

An die Leistungsfähigkeit des Koppelleistenmaterials werden große Anforderungen gestellt. So muss das Material eine **geringe Wärmeleitfähigkeit** besitzen, um Wärmebrücken zu vermeiden. Der **Wärmeausdehnungskoeffizient** sollte möglichst ähnlich dem des Fensterglases sein, um Zwängungen in der Klebstofffuge bei Temperaturschwankungen zu vermeiden. Die **Dauerhaftigkeit** des Materials sollte im Hinblick auf **UV-Beständigkeit, Kälte** und **Hitze** sowie **Feuchtigkeit** gegeben sein. Das Material muss eine gute **Verträglichkeit** mit den Bestandteilen des Klebstoffs aufweisen. Die **Oberflächenbeschaffenheit** muss eine gute Verklebbarkeit gewährleisten. Die **Verschraubung** des Materials muss durch eine gute Lochleibungsfestigkeit gewährleistet sein. Um die Produktionskosten gering zu halten ist eine gute **Bearbeitbarkeit** mit Werkzeugen notwendig. Nicht zuletzt ist auch das **Quell- und Schwindverhalten** des Materials unter Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe analog zu den Temperaturendehnungen ein Thema.

Unter den obigen Kriterien wurden folgende Materialien einer genaueren Untersuchung unterzogen:

- Birkenfurniersperrholz
- Aluminium
- Stahl
- Hartschaumstoffplatte Forex
- Hart-PVC
- Glasfaserverstärkte Kunststoffe

Birkenfurnierschichtholz

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,13 \text{ [W / (m K)]}$

Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha = 8 \times 10^{-6} \text{ [1 / K]}$

Dauerhaftigkeit:

UV-Beständigkeit: gut

Kälte- und Hitzeresistenz: Bis zu einer Temperatur von 102 °C keine Materialveränderungen.

Feuchtigkeit: Starke Wasseraufnahmefähigkeit. Wenn die Holzfeuchten nur über kurze Zeiträume oberhalb von 18 % liegen zeigt sich jedoch eine sehr gute Dauerhaftigkeit.

Verträglichkeit mit Klebstoffen: Wurde im Rahmen des Projekts nachgewiesen.

Verklebbarkeit: wurde im Rahmen des Projekts nachgewiesen.

Verschraubbarkeit: gut.

Quell- und Schwindverhalten: Längs der Leistenachse 0,01 % / % Holzfeuchteänderung

Bearbeitbarkeit: sehr gut

Aluminium

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 160 \text{ [W / (m K)]}$

Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha = 23 \times 10^{-6} \text{ [1 / K]}$

Dauerhaftigkeit:

UV-Beständigkeit: gut

Kälte- und Hitzeresistenz: gut

Feuchtigkeit: keine Wasseraufnahmefähigkeit, gute Korrosionsstabilität

Verträglichkeit mit Klebstoffen: prinzipiell vorhanden, Erfahrungen können aus der Verklebung im Fenster- und Fassadenbereich gewonnen werden, nicht im Projekt abgedeckt

Verklebbarkeit: prinzipiell vorhanden, Erfahrungen können aus der Verklebung im Fenster- und Fassadenbereich gewonnen werden, nicht im Projekt abgedeckt

Verschraubbarkeit: sehr gut

Quell- und Schwindverhalten: durch keine Feuchtigkeitsaufnahme keines

Bearbeitbarkeit: sehr gut

Stahl

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 15 - 58 \text{ [W / (m K)]}$
je nachdem, ob Edelstahl eingesetzt wird oder normaler Stahl

Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ [1 / K]}$

Dauerhaftigkeit:

UV-Beständigkeit: gut

Kälte- und Hitzeresistenz: gut

Feuchtigkeit: keine Wasseraufnahmefähigkeit, Korrosionsschutz unbedingt erforderlich

Verträglichkeit mit Klebstoffen: prinzipiell vorhanden, Erfahrungen können aus der Verklebung im Fenster- und Fassadenbereich gewonnen werden, nicht im Projekt abgedeckt

Verklebbarkeit: prinzipiell vorhanden, Erfahrungen können aus der Verklebung im Fenster- und Fassadenbereich gewonnen werden, nicht im Projekt abgedeckt

Verschraubbarkeit: sehr gut

Quell- und Schwindverhalten: durch keine Feuchtigkeitsaufnahme keines

Bearbeitbarkeit: sehr gut

Hartschaumstoffplatte Forex

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,06$ [W / (m K)]

Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha = 56 \times 10^{-6}$ [1 / K]

Dauerhaftigkeit:

UV-Beständigkeit: gut

Kälte- und Hitzeresistenz: gut

Feuchtigkeit: geringe Wasseraufnahmefähigkeit

Verträglichkeit mit Klebstoffen: müsste überprüft werden, nicht im Projekt abgedeckt

Verklebbarkeit: müsste überprüft werden, nicht im Projekt abgedeckt

Verschraubbarkeit: schlecht, keine Festigkeiten vorhanden (wurde mittels orientierender Kleinversuche nachgewiesen)

Quell- und Schwindverhalten: durch keine Feuchtigkeitsaufnahme keines

Bearbeitbarkeit: gut

Hart-PVC

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,17 \text{ [W / (m K)]}$

Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha = 50 \times 10^{-6} \text{ [1 / K]}$

Dauerhaftigkeit:

UV-Beständigkeit: gut

Kälte- und Hitzeresistenz: gute Erfahrungen in der Fensterindustrie

Feuchtigkeit: geringe Wasseraufnahmefähigkeit

Verträglichkeit mit Klebstoffen: prinzipiell vorhanden, Erfahrungen können aus der Verklebung im Fenster- und Fassadenbereich gewonnen werden, nicht im Projekt abgedeckt

Verklebbarkeit: prinzipiell vorhanden, Erfahrungen können aus der Verklebung im Fenster- und Fassadenbereich gewonnen werden, nicht im Projekt abgedeckt

Verschraubbarkeit: gut (wurde mittels orientierender Kleinversuche nachgewiesen)

Quell- und Schwindverhalten: durch geringe Feuchtigkeitsaufnahme keines

Bearbeitbarkeit: gut

Glasfaserverstärkte Kunststoffe

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = \text{ca. } 0,4 \text{ [W / (m K)]}$

Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha = 9 \times 10^{-6} \text{ [1 / K]}$

Dauerhaftigkeit:

UV-Beständigkeit: gut

Kälte- und Hitzeresistenz: gute Erfahrungen in der Fensterindustrie

Feuchtigkeit: geringe Wasseraufnahmefähigkeit

Verträglichkeit mit Klebstoffen: prinzipiell vorhanden, Erfahrungen können aus der Verklebung im Fenster- und Fassadenbereich gewonnen werden, nicht im Projekt abgedeckt

Verklebbarkeit: prinzipiell vorhanden, Erfahrungen können aus der Verklebung im Fenster- und Fassadenbereich gewonnen werden, nicht im Projekt abgedeckt

Verschraubbarkeit: gut, wenn auch eine Querlage Glasfasern in das Produkt eingewebt werden (wurde mittels orientierender Kleinversuche nachgewiesen)

Quell- und Schwindverhalten: durch geringe Feuchtigkeitsaufnahme keines

Bearbeitbarkeit: aufwendig

Zusammenfassung der Alternativmaterialien

Zusammenfassend zu den einzelnen Materialien kann eine Bewertungsmatrix zur Eignung im Einsatz als Koppelleistenmaterial erstellt werden:

Tabelle 21: Bewertungsmatrix der Alternativmaterialien

	Birkensperholz	Aluminium	Stahl	Hartschaumplatte	Hart-PVC	GFK
geringe Wärmeleitfähigkeit	++	-	-	++	+	+
geringe Wärmeausdehnung	++	-	-	-	-	++
Feuchtebeständigkeit	-	+	-	+	+	+
geringes Quell- / Schwindverhalten	-	+	+	+	+	+
Verschraubbarkeit	++	++	++	-	+	+
Verklebbarkeit	+	+	+	+	+	+

Vergleichsrechnungen Temperaturdehnungen / Quellen / Schwinden

Ein großes Thema hinsichtlich der Wahl des geeigneten Koppelleistenmaterials sind die Formänderungen des Materials, welche durch Temperaturdehnungen oder Quell- und Schwindverhalten zufolge Feuchteaufnahme auftreten.

Es wurden folgende Vergleichsrechnungen angestellt:

Temperaturänderung

Es wurden die Zwangsverformungen zufolge Temperaturänderung um 40 K bei einer maximalen Kantenlänge von 2,5 m berechnet.

In folgender Berechnung wird zu Grunde gelegt, dass eine Zwangsverformung zufolge Temperaturdehnung zu 75 % durch die Verschraubung alle 120 mm verhindert wird und zu 25 % durch die Verklebung abgetragen werden muss. Diese Aufteilung ergibt sich aus einer numerischen Berechnung welche im Rahmen des Projektes durchgeführt wurde.

Aufgrund der unterschiedlichen Klebstoffugendicken sowie Schubmodule der einzelnen Klebstoffe ergeben sich folgende Eigenspannungen im Klebstoff:

Tabelle 22: Eigenspannungen im Klebstoff zufolge Temperaturänderungen

Leistenlänge:	2500	[mm]
Temperaturdifferenz T:	40	[K]
Silikon A		
Klebefugendicke d =	3	[mm]
Schubmodul G =	0,37	[N/mm ²]
Silikon B		
Klebefugendicke d =	6	[mm]
Schubmodul G =	0,50	[N/mm ²]
Acrylat		
Klebefugendicke d =	2	[mm]
Schubmodul G =	2,00	[N/mm ²]

Material	Glas	GFK	BFU	Stahl	Aluminium	Hart-PVC	Forex
Ausdehnungskoeffizient [-]	9,00E-06	9,00E-06	8,00E-06	1,20E-05	2,30E-05	5,00E-05	5,60E-05
Längenänderung [mm]	0,11	0,11	0,10	0,15	0,29	0,63	0,70
Längenänderung (Differenz) [mm]	---	0,00	0,01	0,04	0,18	0,51	0,59
Schubspannungen zufolge Zwang							
Silikon A [N/mm ²]	---	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	0,07
Silikon B [N/mm ²]	---	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,05
Acrylat [N/mm ²]	---	0,00	0,01	0,04	0,18	0,51	0,59

Es zeigt sich anhand der Vergleichsrechnungen, dass für die Silikonklebstoffe folgende Materialien Verwendung finden könnten:

- Glasfaserverstärkte Kunststoffe
- Birkenfurniersperrholz
- Stahl
- Aluminium

Für den Acrylatklebstoff entstehen aufgrund der dünneren Klebstoffuge sowie der höheren Klebstoffsteifigkeiten stärkere Eigenspannungen. Daher können folgende Materialien zum Einsatz kommen:

- Glasfaserverstärkte Kunststoffe
- Birkenfurniersperrholz
- Stahl

Feuchteänderung

Es wurden die Zwangsverformungen zufolge Holzfeuchteänderung zwischen 0 und 18 % bei einer maximalen Kantenlänge von 2,5 m berechnet. Wenn man von einer Holzfeuchtigkeit zum Zeitpunkt des Verklebens von 12 % ausgeht, so sind +18 % die maximal erreichbare Holzfeuchtezunahme bis der Fasersättigungspunkt von 30 % erreicht wird.

In folgender Berechnung wird zu Grunde gelegt, dass eine Zwangsverformung zufolge Temperaturdehnung zu 75 % durch die Verschraubung alle 120 mm verhindert wird und zu 25 % durch die Verklebung abgetragen werden muss. Diese Aufteilung ergibt sich aus einer numerischen Berechnung welche im Rahmen des Projektes durchgeführt wurde.

Aufgrund der unterschiedlichen Klebstoffugendicken sowie Schubmodule der einzelnen Klebstoffe ergeben sich folgende Eigenspannungen im Klebstoff:

Tabelle 23: Eigenspannungen im Klebstoff zufolge Feuchteänderung

Leistenlänge:	2500 [mm]
Holzfeuchteänderung	18 [%]
Schwind- und Quellmaß BFU:	0,01% [/ % Holzfeuchteänderung]
Silikon A	
Klebefugendicke d =	3 [mm]
Schubmodul G =	0,37 [N/mm ²]
Silikon B	
Klebefugendicke d =	6 [mm]
Schubmodul G =	0,50 [N/mm ²]
Acrylat	
Klebefugendicke d =	2 [mm]
Schubmodul G =	2,00 [N/mm ²]

Holzfeuchteänderung	0%	3%	6%	9%	12%	15%	18%
Längenänderung (Differenz) [mm]	---	0,09	0,19	0,28	0,38	0,47	0,56
Schubspannungen zufolge Zwang							
Silikon A [N/mm ²]	---	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06	0,07
Silikon B [N/mm ²]	---	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
Acrylat [N/mm ²]	---	0,09	0,19	0,28	0,38	0,47	0,56

Es zeigt sich anhand der Vergleichsrechnungen, dass für die Silikonklebstoffe Holzfeuchteänderungen von mehr als **10 %** vermieden werden müssen.

Für den Acrylatklebstoff entstehen aufgrund der dünneren Klebstoffuge sowie der höheren Klebstoffsteifigkeiten stärkere Eigenspannungen. Daher erzeugen geringe Holzfeuchteänderungen bereits Zwänge im Klebstoff, welche unter Dauerlast nicht abgetragen werden können und zum Versagen der Klebstoffuge im Eckbereich der Glasscheibe führen. Dieser Umstand wurde auch beim Fassadenprototyp 2 sowie beim Forschungsgebäude beobachtet (vgl. Kapitel „Ergebnisse“ – „Fassadenprototypen“).

4.3 Ermittlung der statischen Leistungsfähigkeit von HGV-Elementen

4.3.1 Methodik

Für den Einsatz von gebäudeaussteifenden HGV-Elementen im Hochbau ist deren Tragfähigkeit und Verformbarkeit von Interesse. Als Grundlage einer rechnerischen Prognose der Traglast ist es dabei notwendig, eine Charakterisierung des Verbundelementversagens durchzuführen. Die Festlegung in welchem Fügepartner (Holz, Glas oder Klebstoff) der Bruch stattfindet ist unumgänglich, um eine Bruchhypothese aufstellen zu können. Es wurden daher am Silikon A und am Acrylatklebstoff an insgesamt 18 Wandscheiben mit HGV-Elementen 1,25 x 2,50 m mit 8 mm Floatglas im Statikprüffeld Steifigkeits- und Bruchuntersuchungen (siehe Abbildung 69) in Anlehnung an EN 594 „Holzbauwerke - Prüfverfahren - Tragfähigkeit und Steifigkeit von Wänden in Holztafelbauart (Wandscheiben)“ durchgeführt [EN594].

4.3.1.1 Herstellung der HGV-Elemente

Es wurden daher Großprüfkörper hergestellt, um diese im Statikprüffeld zu untersuchen.

Materialien:

- Glasscheibe: 8 mm Floatglasscheibe 1250 x 2500 mm, Kanten gebrochen
- Koppelleiste: Birkenfurnierschichtholzleiste gem. EN 636 [EN636], Klasse 2, Dicke 12 mm (Geometrie gemäß Abbildung 36)
- Pfosten – Riegelkonstruktion: Brettschichtholz GL 24 h, Querschnitt: 60 / 160 mm, Außenmaße: 2597 x 1347 mm
- Holzbauschrauben gemäß DIN 1052, 5 x 70 mm, alle 120 mm umlaufend

Herstellung:

Die Glasscheibe wurde auf die Koppelleiste geklebt. Dabei wurde folgende Vorgehensweise vorgenommen:

- Einklemmen der verzahnten Birkenfurnierschichtholzleiste in einen Richrahmen (siehe Abbildung 64)
- Auflegen der Glasscheibe auf den Richrahmen (siehe Abbildung 65). Die Glasscheibe lag dabei auf einer Klotzung alle 25 cm auf, um eine Durchbiegung der Glasscheibe zufolge Eigengewicht zu vermeiden.
- Durch den Richrahmen wird zwischen Glasscheibe und Furnierschichtholzleiste ein Abstand definiert (Klebefugendicke).
- Der Klebstoff wird von außen in das definierte Klebefugenvolumen eingepresst. (siehe Abbildung 66)

Herstellung der Pfosten-Riegel-Konstruktion:

- Die Pfosten-Riegel-Konstruktion wurde zugeschnitten und gemäß Abbildung 68 und Abbildung 69 zusammengeschaubt.
- Die Konstruktion wurde rechtwinkelig ausgerichtet.
- Nach Aushärten des Klebstoffes wurde das fertige HGV-Element aus dem Richrahmen entfernt und auf die Pfosten – Riegel – Konstruktion geschraubt.

Der so hergestellte Prüfkörper wurde mindestens 28 Tage im Innenklima der Prüfhalle gelagert, um eine volle Klebstoffaushärtung gewährleisten zu können.



Abbildung 64: Einklemmen der Koppelleiste in den Richrahmen



Abbildung 65: Einheben der Glasscheibe auf den Richrahmen

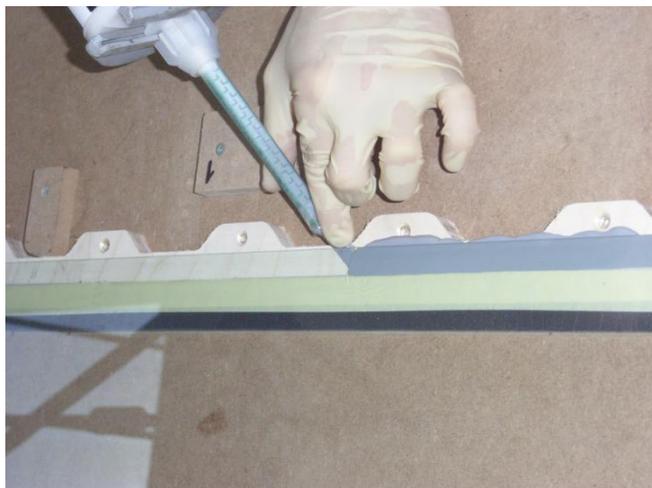


Abbildung 66: Verfllen der Klebefuge (hier: Acrylatklebstoff)

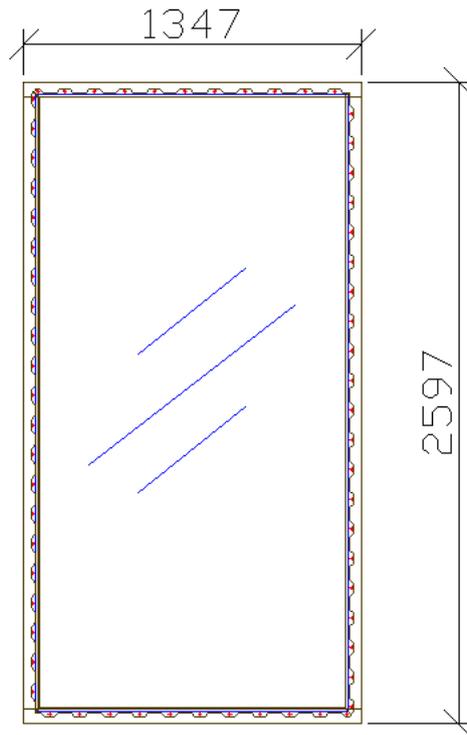


Abbildung 67: Großprüfkörper

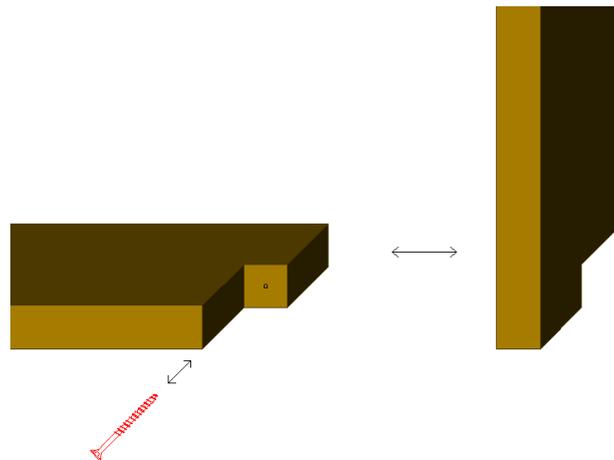


Abbildung 68: Eckverbindung der P/R-Konstruktion

4.3.1.2 Untersuchungsmethode am Grobelement

Die Untersuchungen am Grobelement erfolgten in Anlehnung an EN 594:1996 „Holzbauwerke - Prüfverfahren - Tragfähigkeit und Steifigkeit von Wänden in Holztafelbauart (Wandscheiben)“. Dabei wurde das Grobelement im Prüfstand verankert und mit einer Horizontalkraft mittels hydraulischem Prüfzylinder belastet (siehe Abbildung 69 – Abbildung 74). Die Belastung erfolgte hierbei weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 2 mm / min (Punkt 00 bis 34, Diagramm 50) und danach mit einer Geschwindigkeit von 4 mm / min. Als $F_{\max,est}$ wurde eine Kraft von 10 kN angenommen. Zur Ermittlung der Wandscheibensteifigkeit (für die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit wurde der Mittelwert der beiden Steifigkeiten aus den Belastungszyklen 00 – 04 und 20 – 24 ausgewertet).

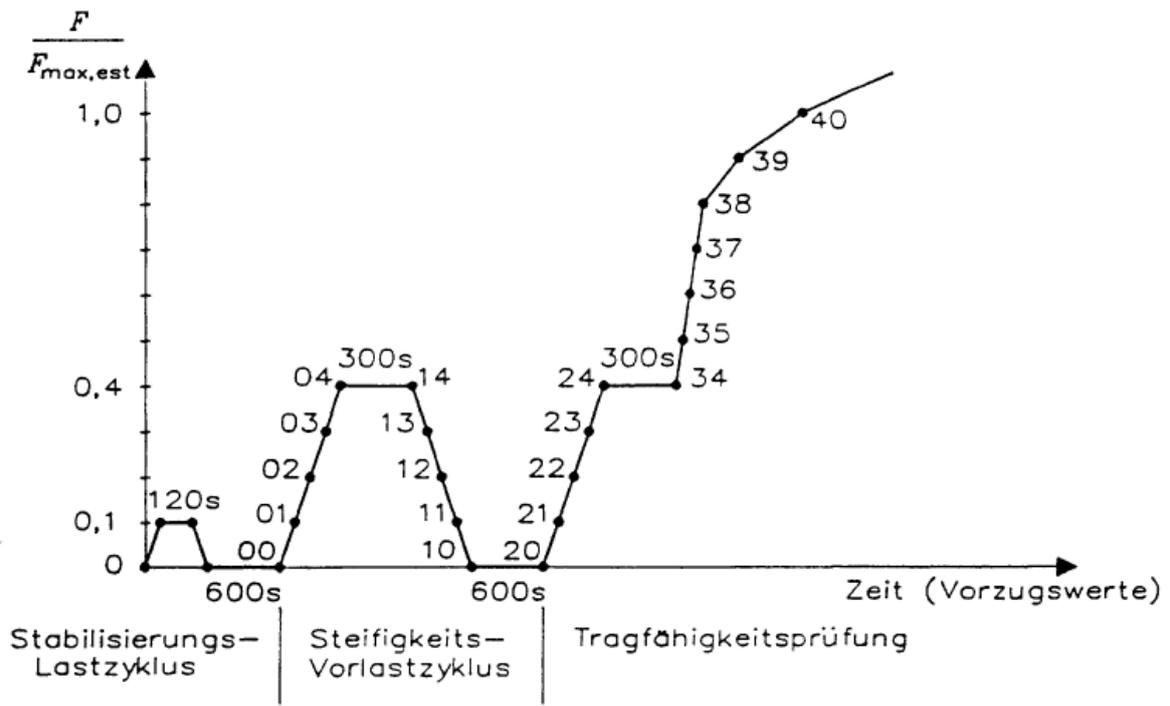


Diagramm 50: EN 594 - Kraft / Zeit-Diagramm

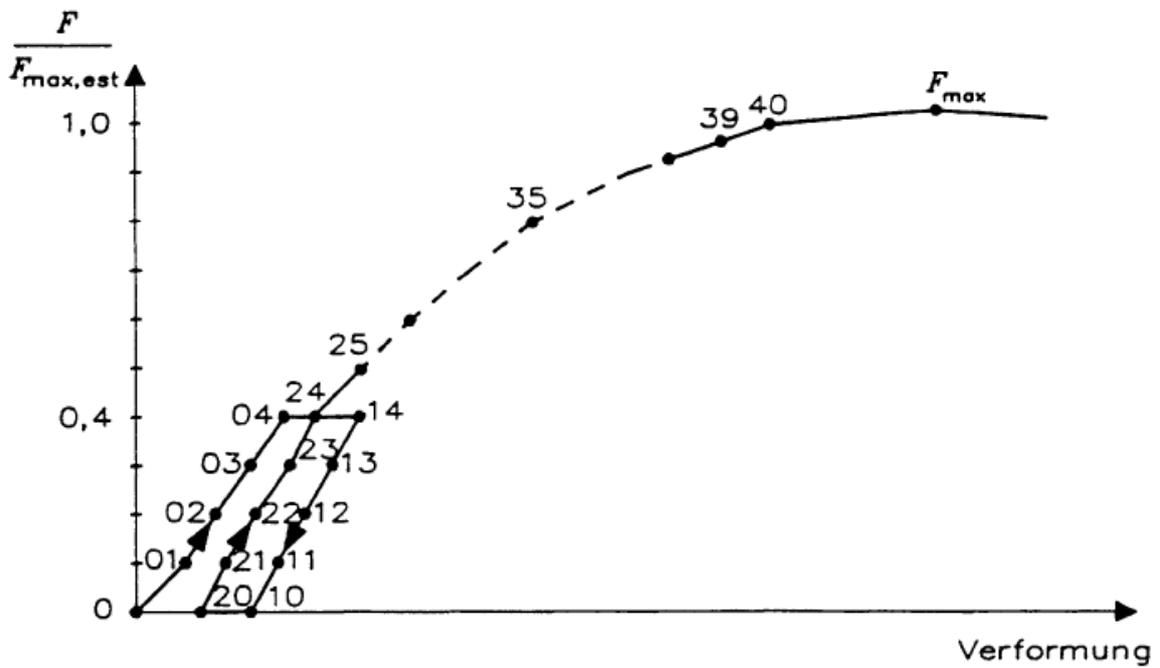


Diagramm 51: EN 594 - Kraft / Verformungs-Diagramm

Während der Untersuchung wurden sowohl die aufbrachte Horizontalkraft (Abbildung 70) als auch die globalen Verformungen (Abbildung 72 - Abbildung 74) der Wandscheibe sowie die lokalen Verformungen (Abbildung 75) in Schrauben- und Klebstoffebene erfasst.



Abbildung 69: Großelementuntersuchung; Messanordnung

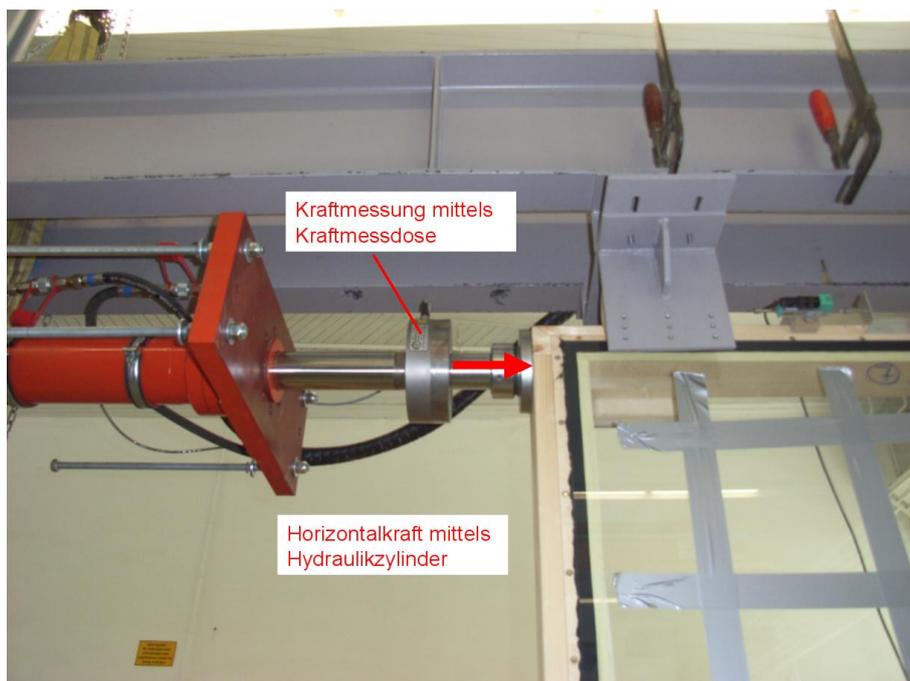


Abbildung 70: Horizontale Kraffteinleitung in die HGV-Scheibe

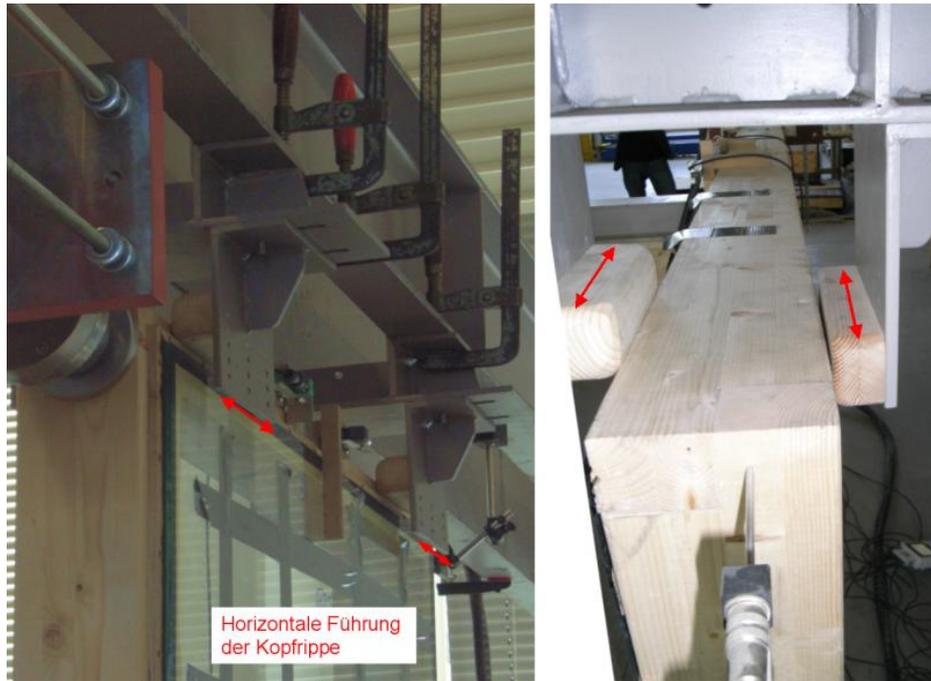


Abbildung 71: Horizontale Führung der Kopfrippe

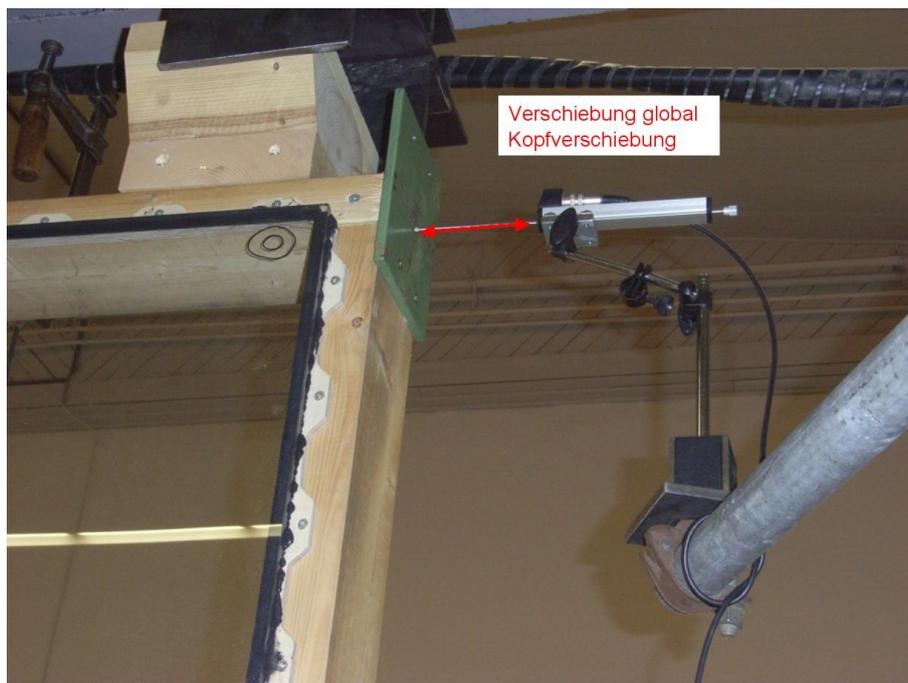


Abbildung 72: Globale Verschiebung: Kopfverschiebung



Abbildung 73: Globale Verschiebung: Abheben der Wandscheibe



Abbildung 74: Globale Verschiebung: Schieben der Wandscheibe

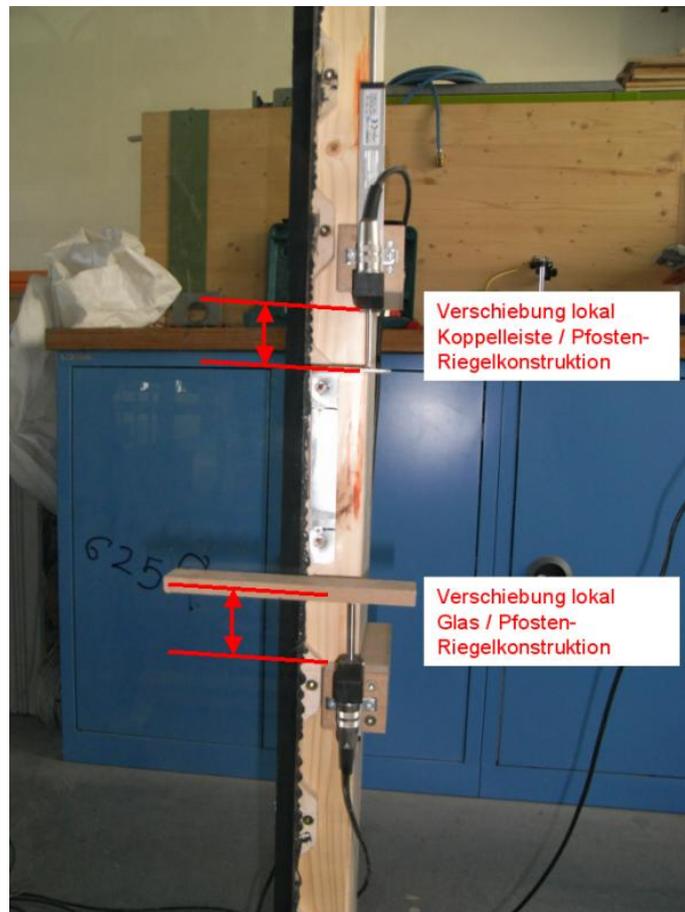


Abbildung 75: Lokale Verformungen: Klebstofffuge und Schrauben

Die **Resttragfähigkeit** bei einem Bruch der Glasscheibe, z.B. durch Vandalismus, zur Vermeidung eines plötzlichen Gebäudekollapses wurde bereits durch Niedermaier [NIE] behandelt und ist nicht Inhalt der Arbeit.

Zur Klärung, welchen Einfluss das **Längen - Höhen - Verhältnis** der HGV-Elemente, die **Klebstoffart** und **Klebefugengeometrie** oder die **Serienschaltung** mehrerer HGV-Elemente hintereinander (siehe Abbildung 76) auf das Trag- und Verformungsverhalten des Bauteils hat, wurden entsprechende Variationen im Statikprüffeld untersucht.



Abbildung 76: Variation der Einflussparameter, Großversuch

4.3.2 Ergebnisse

Zur Beurteilung der Tragfähigkeit und Verformung des Gesamtsystems ist es zusätzlich zu den Untersuchungen an Kleinproben notwendig, Wandscheibenuntersuchungen im Maßstab 1:1 durchzuführen. Materialien, Herstellung und Versuchsdurchführung sind Kapitel „Methodik“ zu entnehmen.

Des Weiteren sind die Untersuchungen am Grobelement für die Entwicklung eines Rechenverfahrens zur Bemessung der Wandscheibenelemente unumgänglich, um eine Überprüfung der Rechenmethoden durchführen zu können.

Bei der statischen Untersuchung der Wandscheibe wurden folgende Messstellen erfasst (vgl. Kapitel „Methodik“):

- Verschiebung der Kopfrippe der Wandscheibe u_{glob}
- Verformung der Klebstoffuge u_{lok}
- Bruchlast

4.3.2.1 Silikon A

Wandscheibenversuche (1,25 x 2,50 m)

Geometrie der Wandscheibe:

Breite (Glasscheibe) 1250 mm

Höhe (Glasscheibe) 2500 mm

Klebstoff:

Klebstoffart: Silikon A

Klebefugenbreite: 14 mm

Klebefugendicke: 3 mm

Ergebnisse

Anzahl der Prüfkörper: **n = 5**

Mittlere Bruchlast: **$F_x = 13,39$ kN**

Median der Bruchlast: **$F_{med} = 13,35$ kN**

Standardabweichung der Bruchlast: **$S_x = 0,80$ kN**

Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff

Mittelwert der Kopfverschiebung: $u_{glob} = 1,70$ mm / kN

Median der Kopfverschiebung: $u_{med} = 1,63$ mm / kN

Standardabweichung der Kopfverschiebung: $s_x = 0,18$ mm / kN

Mittelwert der Klebstoffverformung: $u_{lok} = 0,22$ mm / kN

Median der Klebstoffverformung: $u_{med} = 0,22$ mm / kN

Standardabweichung der Klebstoffverformung: $s_x = 0,04$ mm / kN

HGV-Elemente mit Silikonklebstoff
Variante I x h = 1,25 x 2,50 m; b x d = 14 x 3 mm

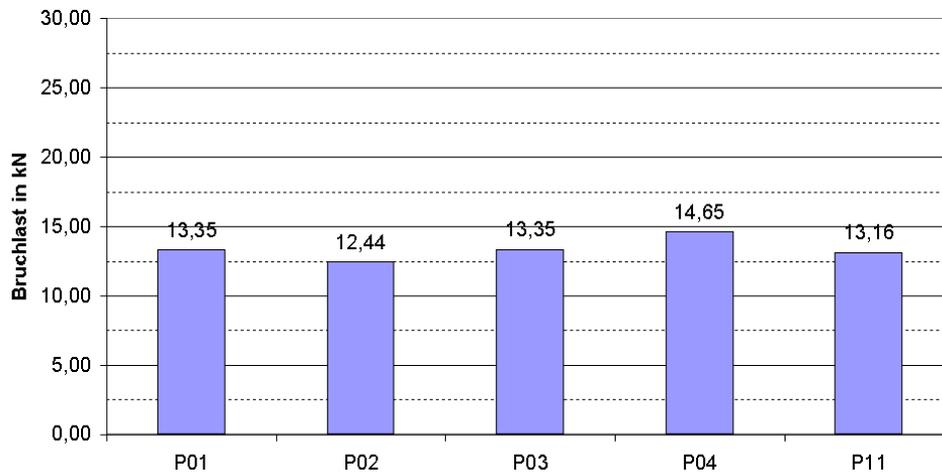


Diagramm 52: Bruchlasten der silikonverklebten Wandscheibenversuche

Verschiebung der Kopfrippe / Wandscheibensteifigkeit:

Die Kopfverschiebung wird pro kN Horizontalkraft angegeben und wurde zwischen 1 und 4 kN aus 10 Einzelmessungen an 5 Prüfkörpern ermittelt.

Verformung der Klebstofffuge:

Die Klebstoffverformung wird pro kN Horizontalkraft angegeben und wurde zwischen 1 und 4 kN aus 22 Einzelmessungen an 5 Prüfkörpern ermittelt.

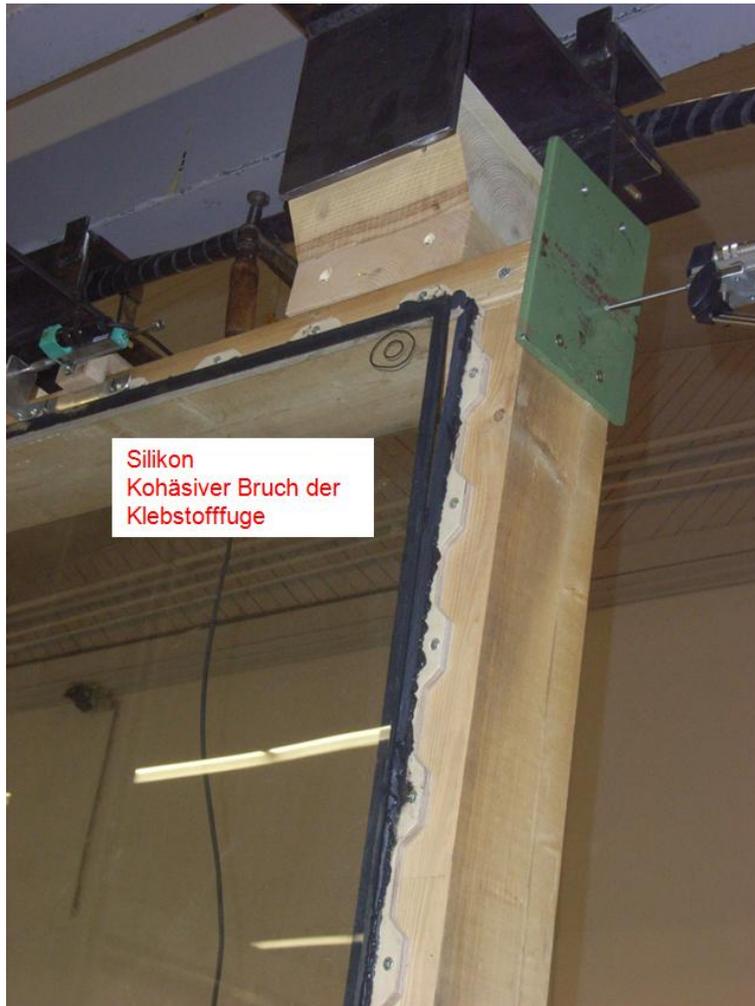


Abbildung 77: Kohäsionsbruch des Silikonklebstoffs im Großversuch

Wandscheibenversuche gekoppelt (2 x 1,25 x 2,50 m)

Geometrie der Wandscheibe:

Breite (Glasscheibe) 2 x 1250 mm

Höhe (Glasscheibe) 2500 mm

Klebstoff:

Klebstoffart: Silikon A

Klebefugenbreite: 14 mm

Klebefugendicke: 3 mm

Ergebnisse

Anzahl der Prüfkörper: **n = 2**

Mittlere Bruchlast: **$F_x = 24,74 \text{ kN}$**

Standardabweichung der Bruchlast: **$S_x = 0,18 \text{ kN}$**

Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff

Mittelwert der Kopfverschiebung: $u_{\text{glob}} = 0,74 \text{ mm / kN}$

Median der Kopfverschiebung: $u_{\text{med}} = 0,68 \text{ mm / kN}$

Standardabweichung der Kopfverschiebung: $s_x = 0,17 \text{ mm / kN}$

Mittelwert der Klebstoffverformung: $u_{\text{lok}} = 0,09 \text{ mm / kN}$

Median der Klebstoffverformung: $u_{\text{med}} = 0,09 \text{ mm / kN}$

Standardabweichung der Klebstoffverformung: $s_x = 0,01 \text{ mm / kN}$

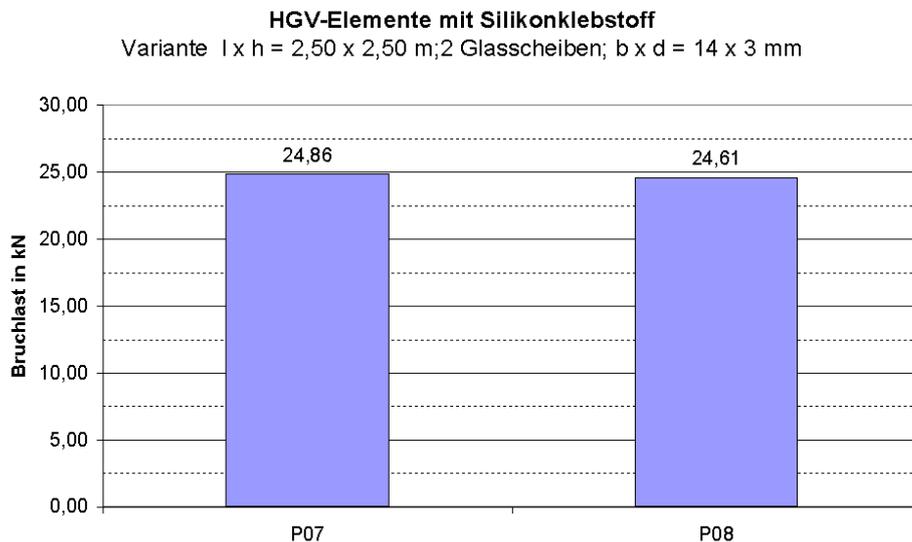


Diagramm 53: Bruchlasten der gekoppelten Wandscheibenversuche

Verschiebung der Kopfrippe / Wandscheibensteifigkeit:

Die Kopfverschiebung wird pro kN Horizontalkraft angegeben und wurde zwischen 2 und 8 kN aus 4 Einzelmessungen an 2 Prüfkörpern ermittelt.

Verformung der Klebstoffuge:

Die Klebstoffverformung wird pro kN Horizontalkraft angegeben und wurde zwischen 2 und 8 kN aus 12 Einzelmessungen an 2 Prüfkörpern ermittelt.

Wandscheibenversuch liegend (2,50 x 1,25 m)

Geometrie der Wandscheibe:

Breite (Glasscheibe) 2500 mm

Höhe (Glasscheibe) 1250 mm

Klebstoff:

Klebstoffart: Silikon A

Klebefugenbreite: 14 mm

Klebefugendicke: 3 mm

Ergebnisse

Anzahl der Prüfkörper: **n = 1**

Mittlere Bruchlast: **$F_x = 26,89 \text{ kN}$**

Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff

Mittelwert der Kopfverschiebung: $u_{\text{glob}} = 0,46 \text{ mm / kN}$

Standardabweichung der Kopfverschiebung: $s_x = 0,04 \text{ mm / kN}$

Mittelwert der Klebstoffverformung: $u_{\text{lok}} = 0,13 \text{ mm / kN}$

Median der Klebstoffverformung: $u_{\text{med}} = 0,13 \text{ mm / kN}$

Standardabweichung der Klebstoffverformung: $s_x = 0,01 \text{ mm / kN}$

Verschiebung der Kopfrippe / Wandscheibensteifigkeit:

Die Kopfverschiebung wird pro kN Horizontalkraft angegeben und wurde zwischen 2 und 8 kN aus 2 Einzelmessungen an einem Prüfkörper ermittelt.

Verformung der Klebstofffuge:

Die Klebstoffverformung wird pro kN Horizontalkraft angegeben und wurde zwischen 2 und 8 kN aus 6 Einzelmessungen an einem Prüfkörper ermittelt.

Wandscheibenversuch mit geänderter Klebefugengeometrie 3 x 19 mm (1,25 x 2,50 m)

Geometrie der Wandscheibe:

Breite (Glasscheibe) 1250 mm

Höhe (Glasscheibe) 2500 mm

Klebstoff:

Klebstoffart: Silikon A

Klebefugenbreite: 19 mm

Klebefugendicke: 3 mm

Ergebnisse

Anzahl der Prüfkörper: **n = 3**

Mittlere Bruchlast: **$F_x = 21,95 \text{ kN}$**

Median der Bruchlast: **$F_{\text{med}} = 21,87 \text{ kN}$**

Standardabweichung der Bruchlast: **$S_x = 0,49 \text{ kN}$**

Bruchart: ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff

Mittelwert der Kopfverschiebung: $u_{\text{glob}} = 1,00 \text{ mm / kN}$

Median der Kopfverschiebung: $u_{\text{med}} = 0,95 \text{ mm / kN}$

Standardabweichung der Kopfverschiebung: $s_x = 0,16 \text{ mm / kN}$

Mittelwert der Klebstoffverformung: $u_{\text{lok}} = 0,12 \text{ mm / kN}$

Median der Klebstoffverformung: $u_{\text{med}} = 0,12 \text{ mm / kN}$

Standardabweichung der Klebstoffverformung: $s_x = 0,01 \text{ mm / kN}$

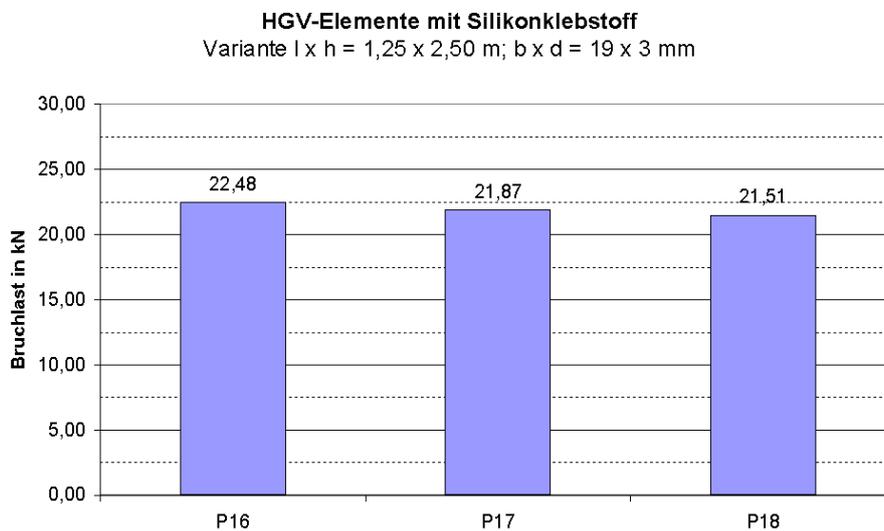


Diagramm 54: Bruchlasten der Wandscheibenversuche mit geänderter Klebefugengeometrie

Verschiebung der Kopfrippe / Wandscheibensteifigkeit:

Die Kopfverschiebung wird pro kN Horizontalkraft angegeben und wurde zwischen 1 und 4 kN aus 6 Einzelmessungen an 3 Prüfkörpern ermittelt.

Verformung der Klebstofffuge:

Die Klebstoffverformung wird pro kN Horizontalkraft angegeben und wurde zwischen 1 und 4 kN aus 18 Einzelmessungen an 3 Prüfkörpern ermittelt.

4.3.2.2 Acrylat

Wandscheibenversuche (1,25 x 2,50 m)

Geometrie der Wandscheibe:

Breite (Glasscheibe) 1250 mm

Höhe (Glasscheibe) 2500 mm

Klebstoff:

Klebstoffart: Acrylat

Klebefugenbreite: 14 mm

Klebefugendicke: 2 mm

Ergebnisse

Anzahl der Prüfkörper: **n = 6**

Mittlere Bruchlast: **$F_x = 38,68$ kN**

Median der Bruchlast: **$F_{med} = 39,59$ kN**

Standardabweichung der Bruchlast: **$S_x = 9,72$ kN**

Bruchart: Der Bruch wurde durch ein Versagen der Schrauben oder des Koppelleistensubstrates hervorgerufen. Daraus resultierte eine Lastumlagerung welche zum Bruch des Glassubstrates führte.

Mittelwert der Kopfverschiebung: $u_{glob} = 0,35$ mm / kN

Median der Kopfverschiebung: $u_{med} = 0,32$ mm / kN

Standardabweichung der Kopfverschiebung: $s_x = 0,13$ mm / kN

Mittelwert der Klebstoffverformung: $u_{lok} = 0,006$ mm / kN

Median der Klebstoffverformung: $u_{med} = 0,006$ mm / kN

Standardabweichung der Klebstoffverformung: $s_x = 0,003$ mm / kN

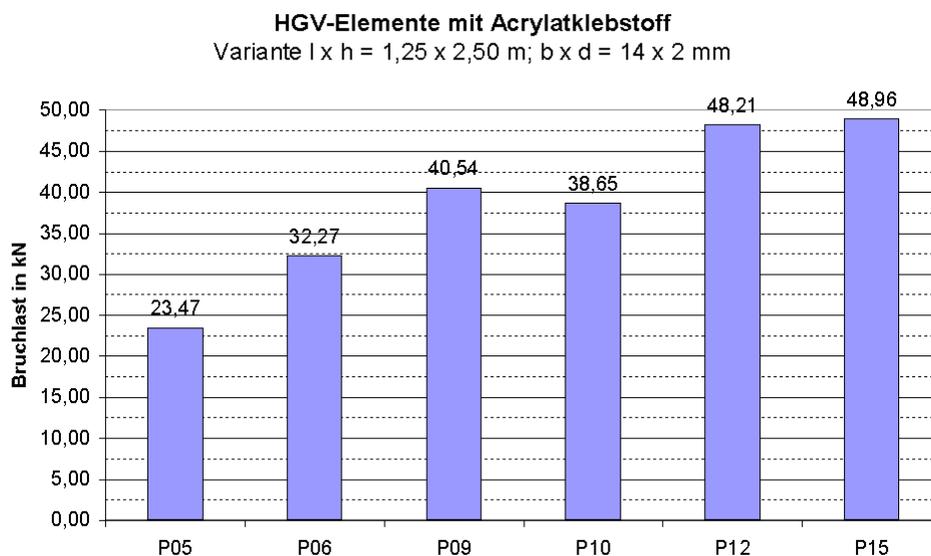


Diagramm 55: Bruchlasten der acrylatverklebten Wandscheibenversuche

Brucharten:

P05: Durch geringere Vorspannung der Schrauben wurde ein duktiler Versagen der Schraubenebene eingeleitet, es kam zu keinem Glasbruch.

P06, P09, P10: Im Eckbereich kam es zum Versagen der Schrauben. Die daraus resultierenden Spannungsumlagerungen führten in weiterer Folge zum Glasbruch.

P12: Die Schrauben wurden mit halbem Schraubenabstand ($e = 60 \text{ mm}$) gesetzt. Es kam zum duktilen Versagen der Schrauben in der Zugverankerung der Wandscheibe im Prüfstand. Es kam zu keinem Glasbruch.

P15: Die Schrauben wurden mit halbem Schraubenabstand ($e = 60 \text{ mm}$) gesetzt. Die Zugverankerung im Prüfstand wurde verstärkt. Es kam zum Bruch der Furnierschichtleiste. Die daraus resultierenden Spannungsumlagerungen führten in weiterer Folge zum Glasbruch.

Verschiebung der Kopfrippe / Wandscheibensteifigkeit:

Die Kopfverschiebung wird pro kN Horizontalkraft angegeben und wurde zwischen 2 und 8 kN aus 10 Einzelmessungen an 6 Prüfkörpern ermittelt.

Verformung der Klebstoffuge:

Die Klebstoffverformung wird pro kN Horizontalkraft angegeben und wurde zwischen 1 und 4 kN aus 22 Einzelmessungen an 5 Prüfkörpern ermittelt.

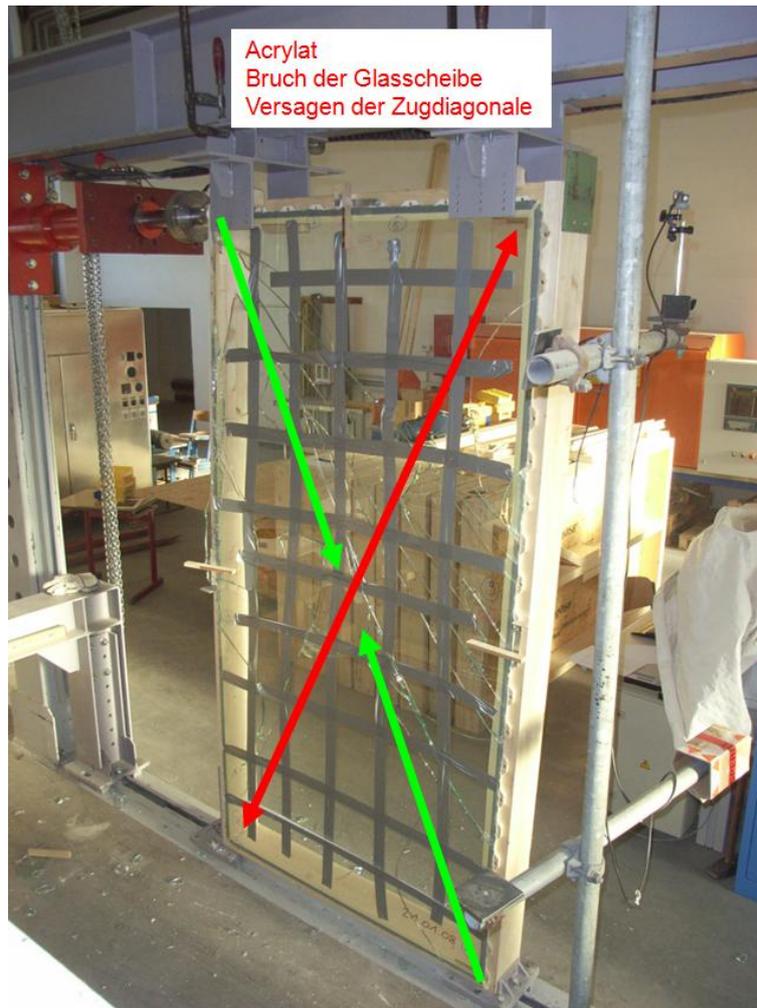


Abbildung 78: Glasbruch des acrylatverklebten Prüfkörpers im Großversuch

4.3.2.3 Zusammenfassung

Die Leistungsfähigkeit der HGV-Elemente zur Gebäudeaussteifung mittels Großversuchen wurde nachgewiesen. Hierbei wurden unterschiedliche Geometrievariationen und Systemkopplungen untersucht und das Bruchverhalten charakterisiert.

Der steifere Acrylat-Klebstoff zeigt eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit. Durch die komplexeren Bruchmechanismen ist jedoch eine größere Streuung der Ergebnisse zu beobachten. Der weichere Silikon-Klebstoff zeigt geringere Festigkeiten. Die Ergebnisse sind jedoch durch das Versagen in der Klebstofffuge selbst deutlich gleichbleibender und in weiterer Folge einfacher zu prognostizieren.

5 Bemessungsmodelle zur Prognose der Tragfähigkeit und Verformbarkeit

5.1 Methodik

Zur rechnerischen Prognose der Verformbarkeit und Traglast von HGV-Elementen musste als nächster Schritt ein **Rechenmodell** entwickelt werden, das mit ausreichender Sicherheit eine Bemessung von HGV-Elementen unterschiedlicher Dimension möglich macht. Dieses Rechenmodell ist mit den Großversuchen zu validieren und gegebenenfalls zu kalibrieren (siehe Abbildung 79). Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein eigens entwickeltes numerisches Rechenverfahren nach FE-Methode sowie ein bestehendes analytisches Modell (Federmodell) nach Kreuzinger / Niedermaier [KREU] angewendet (siehe Abbildung 80).

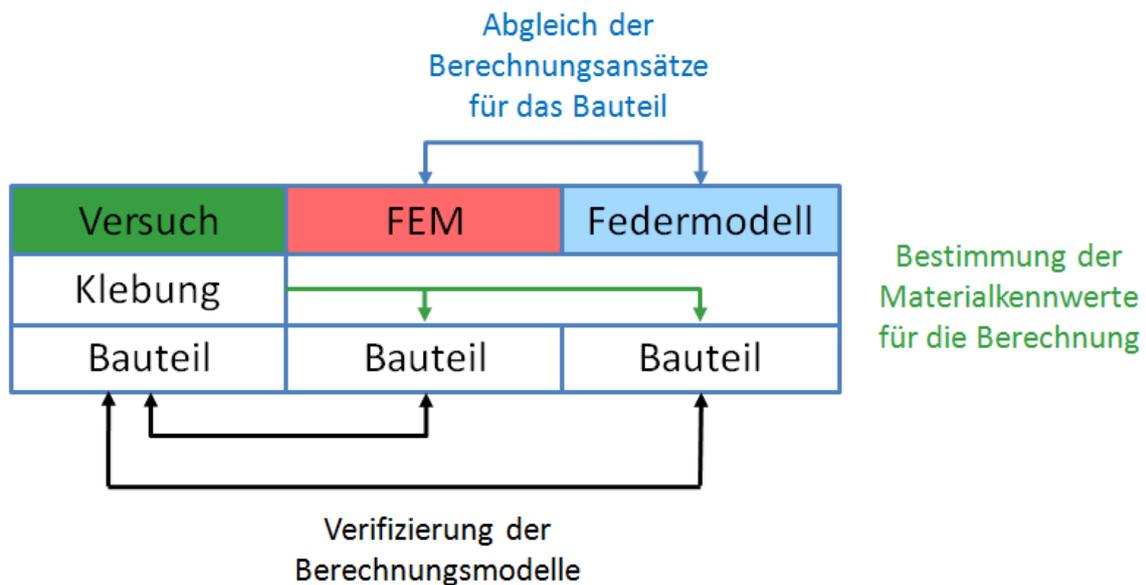


Abbildung 79: Erarbeitung des Berechnungsmodells

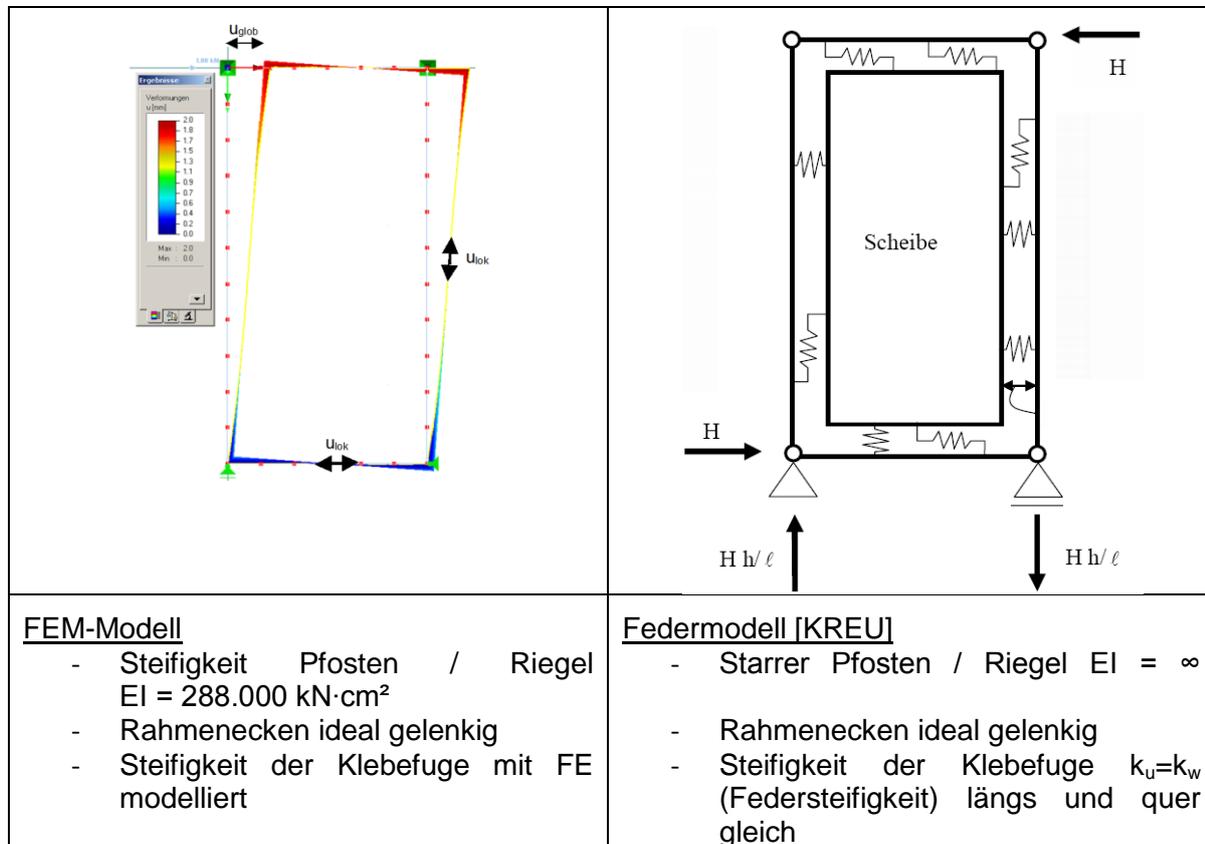


Abbildung 80: Randbedingungen der beiden Berechnungsmodelle

5.2 Ergebnisse

Zur Bemessung eines HGV-Elements müssen zwei Kriterien erfüllt werden:

- Tragsicherheitsnachweis:
Die maximal auftretende Schubspannung in der Klebstoffuge darf den Bemessungswert der Schubspannung nicht überschreiten
- Gebrauchstauglichkeitsnachweis:
Die maximale Verformung der Wandscheibe (Verschiebung der Kopfrippe) muss begrenzt werden.

Durch die veränderlichen Bauteildimensionen im Bauwesen muss ein Bemessungsmodell entwickelt werden, damit die Grenzzustände der Verformbarkeit und Tragsicherheit nicht überschritten werden.

Im Projekt wurde ein numerisches Rechenmodell nach Finiter Elemente-Methode entwickelt, um Spannungen und Verformungen des Bauteils vorauszusagen. Das numerische Modell wurde mit einem analytischen Rechenverfahren verifiziert. Es handelt sich hierbei um ein, von Kreuzinger / Niedermaier entwickeltes Federmodell [KREU].

Im zweiten Schritt wurden die Rechenmodelle mit den 18 durchgeführten Großversuchen an Bauteilen im Maßstab 1:1 verifiziert.

5.2.1 Rechenmodelle zur Prognose der Spannungen und Verformungen im Wandscheibenelement

5.2.1.1 Numerisches Modell nach Finite Elemente Methode

Programm

Die Berechnungen wurden mit einem handelsüblichen FE-Programm RFEM, Version 1.13.084 von Dlubal Software durchgeführt.

Modellstruktur

Als FE-Modell wurde eine Wandscheibe mit 2500 mm Höhe und 1250 mm Breite analog zu den Versuchen erstellt. Die Glasscheibe wurde als FE-Fläche mit einer Stärke von 8 mm eingegeben.

Die Pfosten-Riegel-Struktur wurde als Stäbe mit einer Dimension von 60 / 160 mm definiert, die Eckverbindungen der Holzstruktur wurde als ideal gelenkig definiert.

Die Ränder der Glasscheibe wurden mit der umlaufenden Pfosten-Riegel-Tragstruktur mittels nachgiebigen Flächenelementen verbunden, deren Steifigkeit dem Klebstoff entspricht.

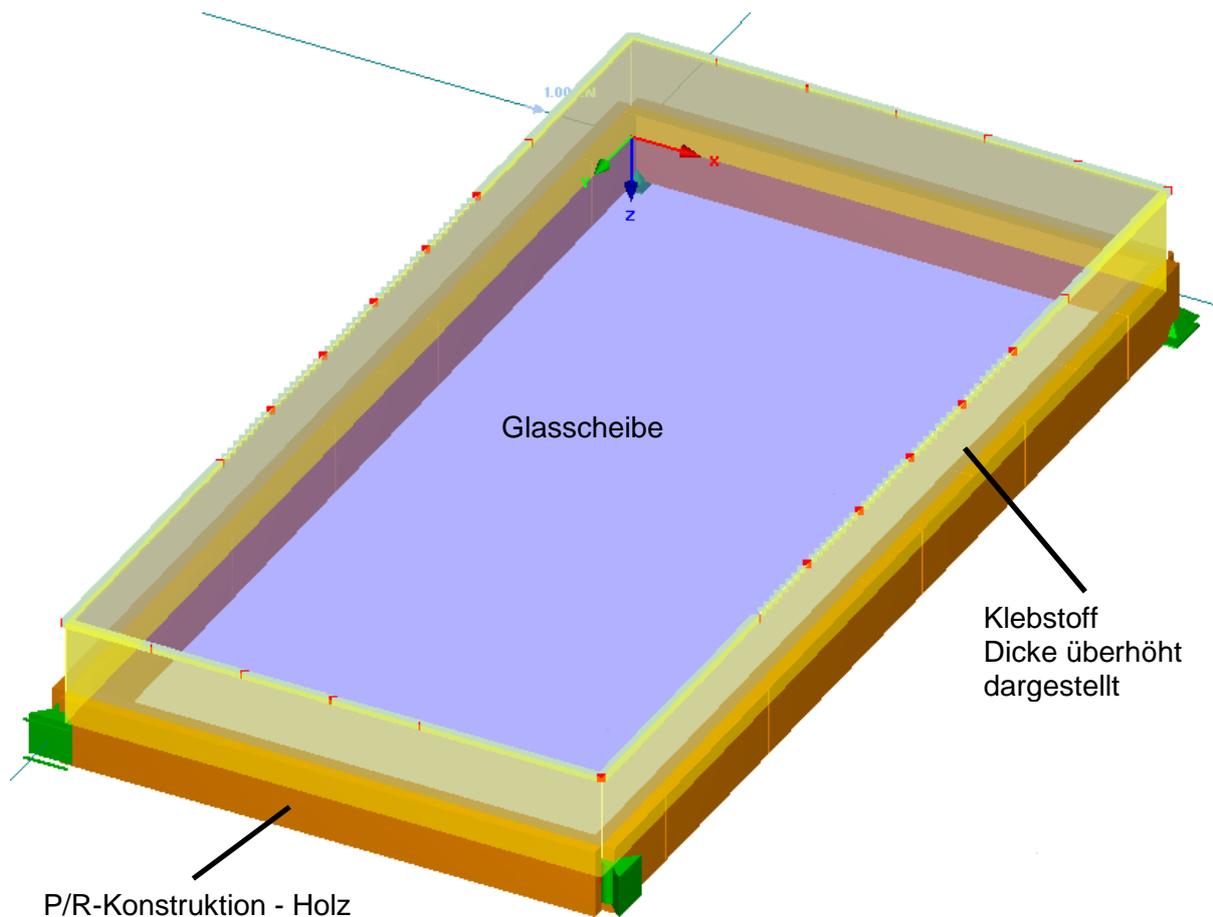


Abbildung 81: FE-Modell

Materialien

Holz: Dimension 60 / 160 mm, Nadelholz S10, $E = 10.000 \text{ N / mm}^2$

Glas: Dimension 2500 x 1250 x 8 mm, $E = 70.000 \text{ N / mm}^2$

Klebstoff: Silikon, Dicke 3 mm, Breite 14 mm, $G = 0,37 \text{ N / mm}^2$

Der Schubmodul des Klebstoffs wurde aus den Kleinversuchen (siehe Kap. „Leistungsfähigkeit der Klebstoffuge“) ermittelt.

Einwirkungen und Auflagerbedingungen

Auf das Scheibenelement wurde eine Horizontalkraft von 1 kN an der Kopfrippe der Holzstruktur angesetzt.

Als Auflager wurde ein Gleit- und ein Fixlager an den Wandfußpunkten definiert. An der Kopfrippe wurden zwei Gleitlager definiert, welche ein Ausweichen der Wandscheibe aus der Ebene verhindern.

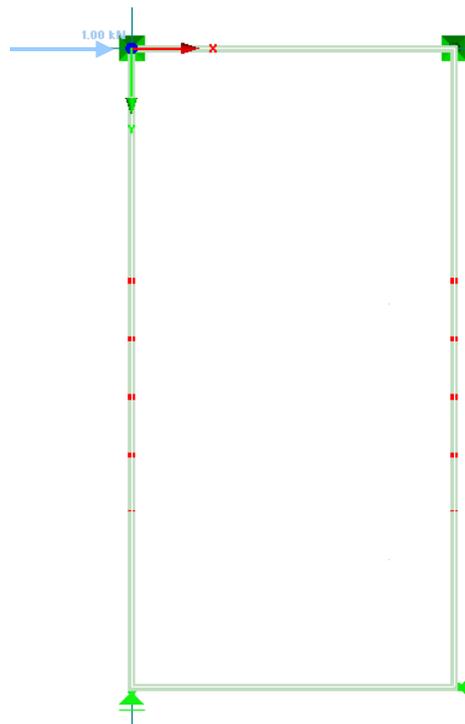


Abbildung 82: Einwirkungen und Auflagerbedingungen

FE – Netz

Als Standardgröße des FE-Netzes wurde eine Quadratgröße von 208 mm eingegeben. Das FE-Netz wurde zu Rand der Glasscheibe und insbesondere im Eckbereich stark verdichtet.

FE – Knoten: 8888

2D – Elemente: 9767

1D – Elemente: 2702

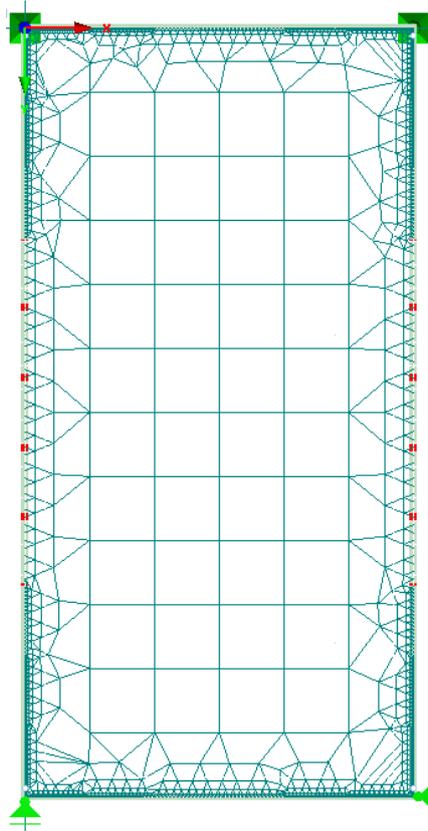


Abbildung 83: FE-Netz

Ergebnisse

Die einwirkende Horizontalkraft bewirkt zum einen eine Biegung in den vertikalen Holzpfeosten (Abbildung 84) sowie eine Verdrehung der, beim elastischen Klebstoff als starr annehmbaren Glasscheibe (Abbildung 85).

In Wechselwirkung zu dieser Biegeverformung und Starrkörperbewegung steht die Verformung des Klebstoffes selbst (Abbildung 86).

Durch die maximale Verformung des Klebstoffes im Eckbereich des Scheibenelements ist zu erkennen, dass dort die maximalen Schubspannungen zu erwarten sind (Abbildung 87).

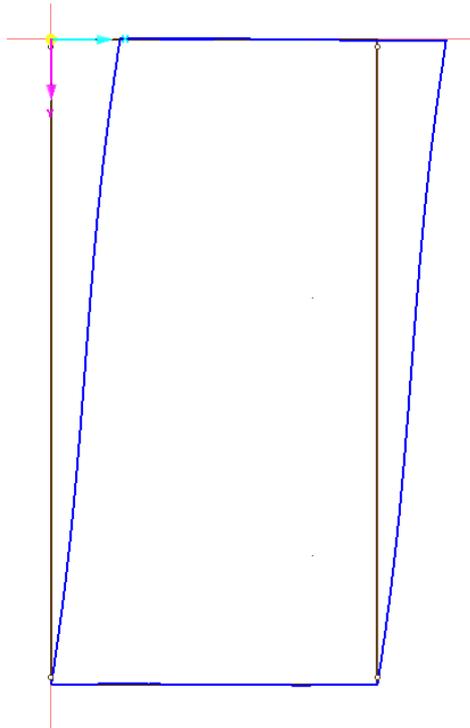


Abbildung 84: Biegung der Holzpfosten unter Horizontalkraft

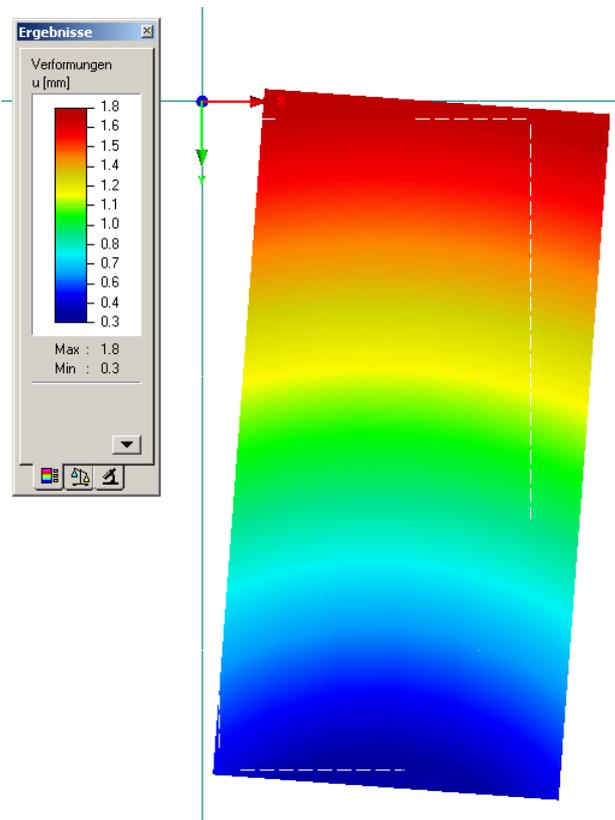


Abbildung 85: Verdrehung der Glasscheibe unter Horizontalkraft

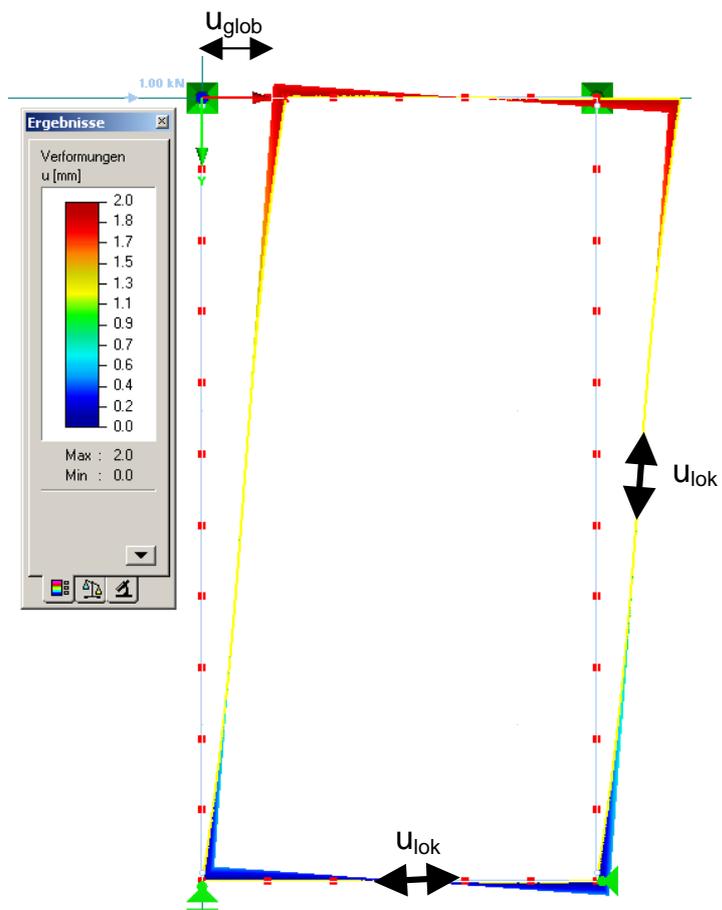


Abbildung 86: Verformung des Klebstoffs

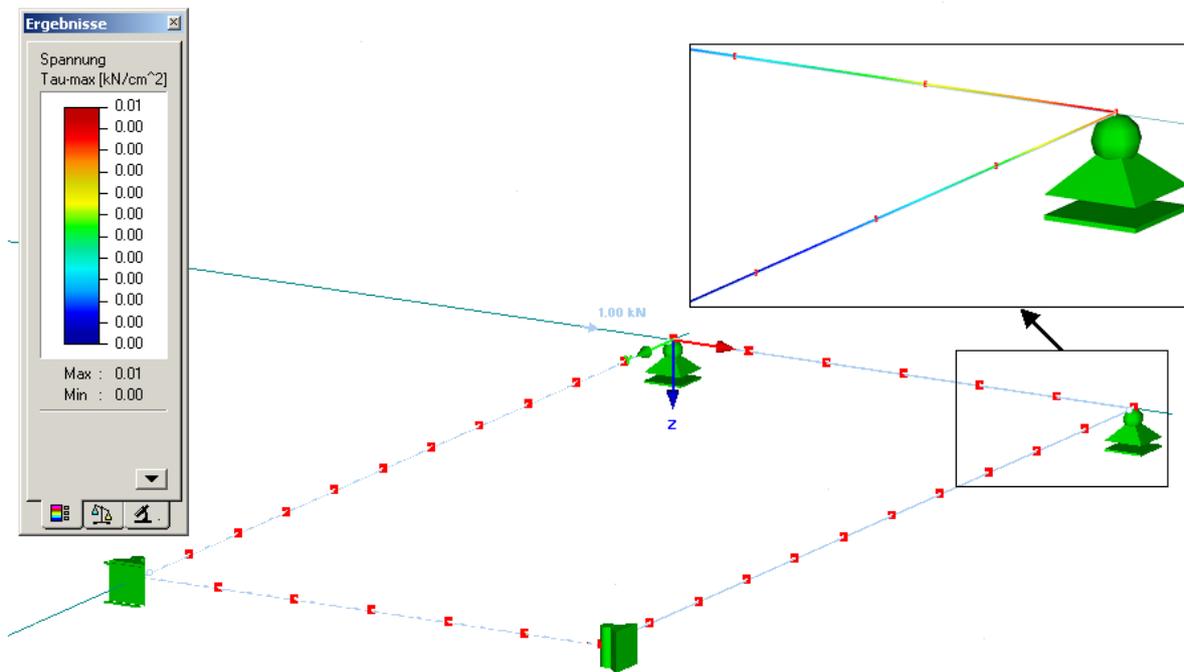


Abbildung 87: Schubspannungen im Klebstoff

Unter 1 kN Horizontalkraft ergeben sich folgende Verformungen:

$$u_{\text{glob}} = 2,03 \text{ [mm]} / 1 \text{ kN}$$

$$u_{\text{lok}} = 0,32 \text{ [mm]} / 1 \text{ kN}$$

Unter 1 kN Horizontalkraft ergibt sich folgende maximale Schubspannung in der Klebstoffguge:

$$\tau_{\text{max}} = 0,055 \text{ [N / mm}^2\text{]} / 1 \text{ kN}$$

Geometrische Variationen

Die Geometrie des FE-Modells wurde verändert. Die daraus gewonnenen Ergebnisse sollen mit den 1:1 Realversuchen verglichen werden.

Variante 1: siehe oben

Holz: Dimension 60 / 160 mm, Nadelholz C 24, $E = 10.000 \text{ N / mm}^2$

Glas: Dimension 2500 x 1250 x 8 mm, $E = 70.000 \text{ N / mm}^2$

Klebstoff: Silikon, Dicke $d = 3 \text{ mm}$, **Breite $b = 14 \text{ mm}$, $G = 0,37 \text{ N / mm}^2$**

Elementabmessungen: Länge (l) x Höhe (h) = **1250 mm x 2500 mm**

Der Schubmodul des Klebstoffs wurde aus den Kleinversuchen (siehe Kap. „Leistungsfähigkeit der Klebstoffuge“) ermittelt.

Variante 2:

Holz: Dimension 60 / 160 mm, Nadelholz C 24, $E = 10.000 \text{ N / mm}^2$

Glas: Dimension 2500 x 1250 x 8 mm, $E = 70.000 \text{ N / mm}^2$

Klebstoff: Silikon, Dicke $d = 3 \text{ mm}$, **Breite $b = 19 \text{ mm}$, $G = 0,45 \text{ N / mm}^2$**

Elementabmessungen: Länge (l) x Höhe (h) = **1250 mm x 2500 mm**

Der Schubmodul des Klebstoffs wurde aus den Kleinversuchen (siehe Kap. „Leistungsfähigkeit der Klebstoffuge“) ermittelt.

Variante 3:

Holz: Dimension 60 / 160 mm, Nadelholz S10, $E = 10.000 \text{ N / mm}^2$

Glas: Dimension 2500 x 1250 x 8 mm, $E = 70.000 \text{ N / mm}^2$

Klebstoff: Silikon, Dicke $d = 3 \text{ mm}$, **Breite $b = 14 \text{ mm}$, $G = 0,37 \text{ N / mm}^2$**

Elementabmessungen: Länge (l) x Höhe (h) = **2500 mm x 1250 mm**

Der Schubmodul des Klebstoffs wurde aus den Kleinversuchen (siehe Kap. „Leistungsfähigkeit der Klebstoffuge“) ermittelt.

Ergebnisse:

In Tabelle 24 sind die Spannungen und Verformungen der drei unterschiedlichen Geometrien dargestellt.

Tabelle 24: Spannungen und Verformungen im FE-Modell

	Abmessungen Element B x H	Abmessungen Klebstoff b x d	u_{glob} [mm] / 1 kN	u_{lok} [mm] / 1 kN	τ_{max} [N / mm ²] / 1 kN
Variante 1	1,25 x 2,50 m	14 x 3 mm	2,03	0,32	0,055
Variante 2	1,25 x 2,50 m	19 x 3 mm	1,27	0,19	0,041
Variante 3	2,50 x 1,25 m	14 x 3 mm	0,5	0,15	0,027

Die ermittelten Verformungen und Spannungen werden im Kapitel „Vergleich mit den realen Wandscheibenuntersuchungen“ gegenübergestellt.

5.2.1.2 Analytisches Modell (statisch unbestimmtes Federmodell) nach Kreuzinger / Niedermaier

Das analytische Rechenmodell basiert auf einem statisch unbestimmtem Federmodell. Die starre Glasscheibe ist mittels einer umlaufenden Schubbettung an starre ($EI = \infty$), in den Ecken gelenkig verbundenen Randgliedern fixiert. [KREU]

In weiterer Folge wird vereinfachend angenommen, dass die Steifigkeit der Schubbettung quer und längs zur Klebstoffuge ident ist ($k = k_u = k_w$).

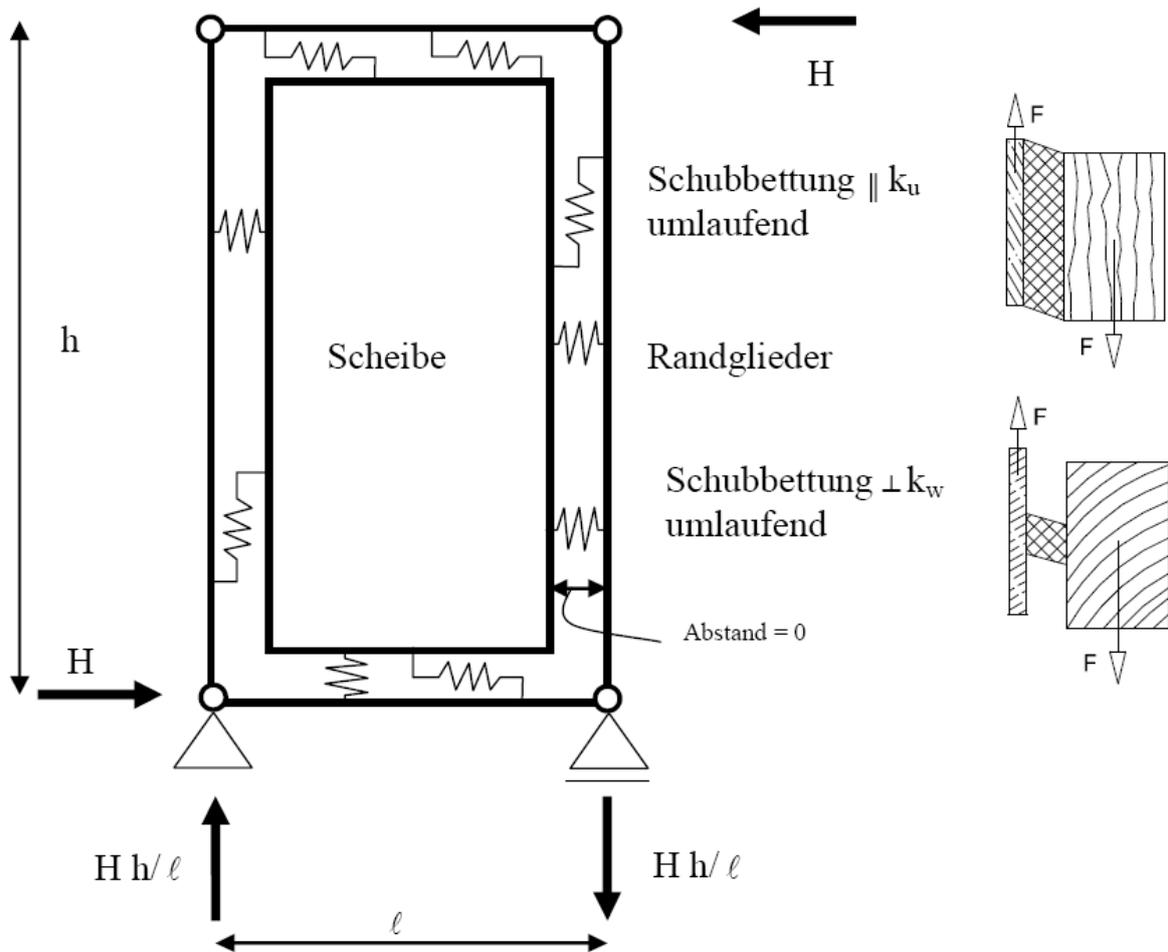


Abbildung 88: Federmodell nach Kreuzinger / Niedermaier [KREU]

Für die im vorhergehenden Kapitel berechnete Variante 1 ergibt sich folgende Berechnung der Verformungen:

Holz: werden als ideal starre Randglieder mit gelenkiger Eckverbindung angenommen

Glas: wird ebenfalls als ideal starre Scheibe angenommen

Klebstoff: Silikon, Dicke $d = 3 \text{ mm}$, Breite $b = 14 \text{ mm}$, $G = 0,37 \text{ N / mm}^2$

Elementabmessungen: Länge (l) x Höhe (h) = $1250 \text{ mm} \times 2500 \text{ mm}$

$H = 1000 \text{ N}$

$h = 2500 \text{ mm}$

$l = 1250 \text{ mm}$

$b = 14 \text{ mm}$

$d = 3 \text{ mm}$

$$G = 0,37 \text{ N / mm}^2$$

$$k = G \cdot \frac{b}{d} = 0,37 \cdot \frac{14}{3} = 1,73 \text{ N / mm}^2$$

$$\tau_{yx} = \frac{H}{l \cdot b} \cdot \frac{1}{1 + \frac{h}{3 \cdot l}} = \frac{1000}{1250 \cdot 14} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2500}{3 \cdot 1250}} = 0,034 \text{ N / mm}^2 \text{..Schubspannung d.horiz. Klebe fuge}$$

$$\tau_{xy} = \frac{H}{l \cdot b} \cdot \frac{1}{1 + \frac{l}{3 \cdot h}} = \frac{1000}{1250 \cdot 14} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1250}{3 \cdot 2500}} = 0,049 \text{ N / mm}^2 \text{..Schubspannung d.vert. Klebe fuge}$$

$$\tau = \frac{\tau_{yx} + \tau_{xy}}{2} = 0,042 \text{ N / mm}^2 \text{..mittlere Schubspannung d. Klebe fuge}$$

$$u_{lok} = \frac{\tau}{G} \cdot d = \frac{0,042}{0,37} \cdot 3 = 0,34 \text{ mm}$$

$$u_{glob} = \frac{2 \cdot H}{k \cdot l} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{h}{3 \cdot l}} + \frac{\frac{h}{l}}{1 + \frac{l}{3 \cdot h}} \right) = \frac{2 \cdot 1000}{1,73 \cdot 1250} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{2500}{3 \cdot 1250}} + \frac{\frac{2500}{1250}}{1 + \frac{1250}{3 \cdot 2500}} \right) = 2,15 \text{ mm}$$

$$\tau_{max} = \frac{H}{l \cdot b} = \frac{1000}{1250 \cdot 14} = 0,057 \text{ N / mm}^2$$

Geometrische Variationen

Die Geometrie des Federmodells wurde verändert. Die daraus gewonnenen Ergebnisse sollen mit den 1:1 Realversuchen verglichen werden.

Variante 1: siehe oben

Holz: werden als ideal starre Randglieder mit gelenkiger Eckverbindung angenommen

Glas: wird ebenfalls als ideal starre Scheibe angenommen

Klebstoff: Silikon, Dicke $d = 3 \text{ mm}$, **Breite $b = 14 \text{ mm}$** , **$G = 0,37 \text{ N / mm}^2$**

Elementabmessungen: Länge (l) x Höhe (h) = **1250 mm x 2500 mm**

Der Schubmodul des Klebstoffs wurde aus den Kleinversuchen (siehe Kap. „Leistungsfähigkeit der Klebstoffuge“) ermittelt.

Variante 2:

Holz: werden als ideal starre Randglieder mit gelenkiger Eckverbindung angenommen

Glas: wird ebenfalls als ideal starre Scheibe angenommen

Klebstoff: Silikon, Dicke $d = 3 \text{ mm}$, **Breite $b = 19 \text{ mm}$** , **$G = 0,45 \text{ N / mm}^2$**

Elementabmessungen: Länge (l) x Höhe (h) = **1250 mm x 2500 mm**

Der Schubmodul des Klebstoffs wurde aus den Kleinversuchen (siehe Kap. „Leistungsfähigkeit der Klebstoffuge“) ermittelt.

Variante 3:

Holz: werden als ideal starre Randglieder mit gelenkiger Eckverbindung angenommen

Glas: wird ebenfalls als ideal starre Scheibe angenommen

Klebstoff: Silikon, Dicke $d = 3 \text{ mm}$, **Breite $b = 14 \text{ mm}$** , **$G = 0,37 \text{ N / mm}^2$**

Elementabmessungen: Länge (l) x Höhe (h) = **2500 mm x 1250 mm**

Der Schubmodul des Klebstoffs wurde aus den Kleinversuchen (siehe Kap. „Leistungsfähigkeit der Klebstoffuge“) ermittelt.

Ergebnisse:

In Tabelle 25 sind die Spannungen und Verformungen der drei unterschiedlichen Geometrien dargestellt.

Tabelle 25: Spannungen und Verformungen im Federmodell

	Abmessungen Element B x H	Abmessungen Klebstoff b x d	u_{glob} [mm] / 1 kN	u_{lok} [mm] / 1 kN	τ_{max} [N / mm ²] / 1 kN
Variante 1	1,25 x 2,50 m	14 x 3 mm	2,15	0,34	0,057
Variante 2	1,25 x 2,50 m	19 x 3 mm	1,30	0,20	0,042
Variante 3	2,50 x 1,25 m	14 x 3 mm	0,54	0,17	0,029

Die ermittelten Verformungen und Spannungen werden im Kapitel „Vergleich mit den realen Wandscheibenuntersuchungen“ gegenübergestellt.

5.2.1.3 Vergleich der beiden Rechenmodelle

Um die Plausibilität der beiden Rechenmodelle zu überprüfen, wird ein Vergleich der beiden Modelle im Hinblick auf die drei Varianten durchgeführt (Tabelle 26).

Tabelle 26: Vergleich der beiden Rechenmodelle

Variante										
Scheibendimension		Var. 1			Var. 2			Var. 3		
Klebstoffdimension		1,25 x 2,50 m			1,25 x 2,50 m			2,50 x 1,25 m		
		14 x 3 mm			19 x 3 mm			14 x 3 mm		
		Variante 1			Variante 2			Variante 3		
		FEM	Federmodell	+ / -	FEM	Federmodell	+ / -	FEM	Federmodell	+ / -
Kopfverschiebung des HGV-Elements, horizontal	u_{glob} [mm] / kN	2,03	2,15	-6%	1,27	1,30	-2%	0,50	0,54	-8%
Verformung der Klebstofffuge längs	u_{lok} [mm] / kN	0,32	0,34	-6%	0,19	0,20	-5%	0,15	0,17	-13%
Maximale erreichte Schubspannung i. d. Klebstofffuge	τ_{max} [N / mm ²] / kN	0,055	0,057	-4%	0,041	0,042	-2%	0,027	0,029	-7%

5.2.1.4 Vergleich mit den realen Wandscheibenuntersuchungen

In Tabelle 27 und Tabelle 28 sind die beiden Rechenmodelle mit den Realuntersuchungen gegenübergestellt.

Tabelle 27: Vergleich des FE-Modells mit den Realuntersuchungen

Variante										
Scheibendimension		Var. 1			Var. 2			Var. 3		
Klebstoffdimension		1,25 x 2,50 m			1,25 x 2,50 m			2,50 x 1,25 m		
		14 x 3 mm			19 x 3 mm			14 x 3 mm		
		FEM	Real	+ / -	FEM	Real	+ / -	FEM	Real	+ / -
Kopfverschiebung des HGV-Elements, horizontal	u_{glob} [mm] / kN	2,03	1,70	16%	1,27	1,00	21%	0,50	0,46	8%
Verformung der Klebstofffuge längs	u_{lok} [mm] / kN	0,32	0,22	31%	0,19	0,12	37%	0,15	0,13	13%
Maximal erreichte Bruchlast, horizontal; 5-% Quantilwerte	F_{max} [kN]	11,1	11,5	-4%	23,5	20,3	14%	21,1	23,2	-10%

Tabelle 28: Vergleich des Federmodells mit den Realuntersuchungen

Variante										
		Var. 1			Var. 2			Var. 3		
Scheibendimension		1,25 x 2,50 m			1,25 x 2,50 m			2,50 x 1,25 m		
Klebstoffdimension		14 x 3 mm			19 x 3 mm			14 x 3 mm		
		Federmodell	Real	+ / -	Federmodell	Real	+ / -	Federmodell	Real	+ / -
Kopfverschiebung des HGV-Elements, horizontal	u_{glob} [mm] / kN	2,15	1,70	21%	1,30	1,00	23%	0,54	0,46	15%
Verformung der Klebstofffuge längs	u_{lok} [mm] / kN	0,34	0,22	35%	0,20	0,12	40%	0,17	0,13	24%
Maximal erreichte Bruchlast, horizontal; 5-% Quantilwerte	F_{max} [kN]	10,7	11,5	-7%	23,0	20,3	12%	22,6	23,2	-2%

Der Vergleich mit den realen Wandscheibenuntersuchungen zeigt, dass beide Modelle hinsichtlich der globalen Verformung der Wandscheibe u_{glob} ein bis zu 23 % weicherer Verhalten prognostizieren. Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit liegen die Rechenmodelle damit auf der sicheren Seite.

Für den Nachweis der Tragsicherheit liegen beide Rechenmodelle bei Variante 2 hinsichtlich der Tragsicherheit um bis zu 14 % auf der unsicheren Seite. Diese Abweichung kann bei der Bemessung durch einen zusätzlichen Faktor im Teilsicherheitsbeiwert berücksichtigt werden um eine sichere Bemessung gewährleisten zu können.

Somit sind beide Rechenmodelle für den Tragsicherheitsnachweis und Gebrauchstauglichkeitsnachweis geeignet. Aufgrund der einfacheren Durchführung wird für die Praxis das Federmodell empfohlen.

5.2.1.5 Bemessungsvorschlag

Aus den Untersuchungen an Klein- und Großprüfkörpern sowie der beiden Modellrechnungen kann ein Vorschlag für die Bemessung von silikonverklebten HGV-Elementen erarbeitet werden. Grundsätzlich bezieht sich die Bemessung stets auf die Verformung sowie den Bruch der elastischen Klebstofffuge selbst. Eine Bemessung der weiteren Systemkomponenten wie Holztragstruktur, stiftförmige Verbindungsmittel und Glasscheibe hat zusätzlich zu erfolgen. Der Bemessungsvorschlag ist in dem „**Handbuch für den Einsatz von Holz-Glas-Verbundelementen**“ [NEU2] zu entnehmen und steht den Lizenznehmern des Patents No. 502470 der Holzforschung Austria zur Verfügung.

Die folgende Berechnung bezieht sich auf die Bemessung der Klebstofffuge zwischen Glas und Koppelleiste. Die Bemessung der anderen Bauteilkomponenten hat zusätzlich zu erfolgen:

- Ermittlung der Einwirkungen gemäß EN 1991
- Bemessung der Holzkonstruktion, der Verankerung zu angrenzenden Bauteilen sowie der stiftförmigen Verbindungsmittel nach EN 1995.
- Bemessung der Glasscheibe unter Plattenbelastung (z.B. Windsog und -druck) gemäß gültigen Normen (z.B. durch Glashersteller)

- Bemessung der Glasscheibe unter Scheibenbelastung (bei Einhaltung der „Anforderungen an die Glasscheibe“ und den 2-K-Silikonklebstoffen kann ein Beulnachweis entfallen)

Der folgende Bemessungsvorschlag beruht auf einer analytischen Rechenmethode eines Federmodells [KREU] wobei die auszusteiende Pfosten-Riegel-Konstruktion vereinfachend als ideal gelenkig und unendlich biegesteif sowie die selbe Steifigkeit der Klebstofffuge längs und quer angenommen wird. Das Berechnungsmodell beruht auf der Tatsache, dass der Bruch kohäsiv im Klebstoff stattfindet. Andere Versagensarten sind durch Bemessung der oben genannten Konstruktionsteile auszuschließen.

Der vorgeschlagene Teilsicherheitsbeiwert (γ_M) und die Modifikationsbeiwerte (k_{mod} , k_{def}) resultieren aus den beiden, im Projekt untersuchten Silikonklebstoffen und sind bei der Verwendung anderer Klebstoffe gegebenenfalls anzupassen. In diesem Falle ist die Eignung durch die unter Punkt „Klebstoff für die Holz-Glas-Verbindung“ angeführten Bedingungen nachzuweisen. Sämtliche Beiwerte verstehen sich als Vorschlag und müssen vor dem Praxiseinsatz durch größere Versuchsserien bestätigt werden.

Der Bemessungsvorschlag ist nachfolgend in einem Rechenbeispiel dargestellt.

Rechenbeispiel

Die geometrieabhängigen Parameter sind im folgenden Rechenbeispiel mit blauer Farbe, die, vom Klebstoff abhängigen Parameter mit pinker Farbe sowie die von den Einwirkungen abhängigen Eingangsgrößen mit gelber Farbe der Übersichtlichkeit halber markiert.

Eingangsgrößen

Elementlänge $l = 1250$ mm

Elementhöhe $h = 2500$ mm

$$h / l = 2500 / 1250 = 2 \quad \leq 2$$

Klebefugenbreite $b = 14$ mm

Klebefugendicke $d = 5$ mm

Glasscheibendicke $t = 14$ mm

(bei Isolierglas Gesamtglasstärke z.B. 2 x 4 mm VSG innen + 6 mm ESG außen = 14 mm)

$\tau_k = 0,600 \text{ N / mm}^2$ Charakteristische 5-% Fraktile der Bruchwerte der Schubspannung aus Kleinversuchen

$G = 0,50 \text{ N / mm}^2$ Mittlerer Schubmodul (geringerer Wert aus Quer- und Längsbelastung) aus Kleinversuchen

$\sigma_k = 0,760 \text{ N / mm}^2$ Charakteristische 5-% Fraktile der Bruchwerte der Zugspannung aus Kleinversuchen

$\Delta u = 6 \%$ (Holzfeuchteänderung der Koppelleiste)

Quellmaß = $0,01 \%$ / % HF-Änderung (Quellmaß der Koppelleiste
Birkenfurnierschichtholz – längs der Deckfurnier)

Herstelltemperatur der Klebstoffverbindung bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$

$\Delta T = 60 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C} = + 40 \text{ K}$ (Temperaturerhöhung auf absolut $+ 60 \text{ }^\circ\text{C}$)

$\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C} = - 20 \text{ K}$ (Temperaturabsenkung auf absolut $+ 0 \text{ }^\circ\text{C}$)

(Temperaturänderung in der Fassade – der größere Absolutwert ist maßgebend, hier $\Delta T = 40 \text{ K}$)

$\alpha_{T,\text{Glas}} = 9 \times 10^{-6}$ (Temperaturausdehnungskoeffizient für Fensterglas)

$\alpha_{T,\text{Koppelleiste}} = 8 \times 10^{-6}$ (Temperaturausdehnungskoeffizient für Furnierschichtholz)

$H_{k,\text{kurz}} = 1160 \text{ N}$ Auf der Kopfrippe angreifende charakteristische Horizontallast, kurzfristig (z.B. Wind und Erdbeben ermittelt aus EN 1991)

$H_{k,\text{lang}} = 240 \text{ N}$ Auf der Kopfrippe angreifende charakteristische Horizontallast, langfristig (z.B. Gebäudeschiefstellung ermittelt aus DIN 1052)

$V_{k,\text{lang}} = (\text{Dichte Glas } \rho_g) \times (l \times h) \times t = (25 \times 10^{-6}) \times (1250 \times 2500) \times 14 = 1094 \text{ N}$

Eigengewicht der Glasscheibe – bei Abtrag über die Klebung ohne Klotzung

$w_k = 0,60 \text{ kN / m}^2$ maximaler Windsog auf die Glasscheibe (aus EN 1991)

Tragsicherheitsnachweis

Modifikations- und Teilsicherheitsbeiwerte für den Silikonklebstoff

$k_{\text{mod}} = 0,90$ für kurzfristige Lasten (vgl. Eurocode 5 [EC5-1-1])

$k_{\text{mod}} = 0,20$ für langfristige Lasten

$\gamma_M = 3,0$

Tragsicherheitsnachweis für Dauerlast

$H_{d,\text{lang}} = \gamma_G \times H_{k,\text{lang}} = 1,35 \times 240 \text{ N} = 324 \text{ N}$

$V_{d,\text{lang}} = \gamma_G \times V_{k,\text{lang}} = 1,35 \times 1094 \text{ N} = 1477 \text{ N}$

$R_{d,\text{lang}} = k_{\text{mod}} \times \tau_k / \gamma_M = 0,20 \times 0,600 / 3,0 = 0,040 \text{ N} / \text{mm}^2$

$S_{d,\text{Schubfeld,lang}} = H_{d,\text{lang}} / (l \times b) = 324 / (1250 \times 14) = 0,019 \text{ N} / \text{mm}^2$
maximale Klebstoffspannung (in der Glasecke)

$S_{d,\text{EG Abtrag,lang}} = V_{d,\text{lang}} / (2 \times h) / b =$
 $= 1477 / (2 \times 2500) / 14 = 0,021 \text{ N} / \text{mm}^2$ EG-Abtrag

$S_{d,\text{lang}} = S_{d,\text{Schubfeld,lang}} + S_{d,\text{EG Abtrag,lang}} = 0,040 \text{ N} / \text{mm}^2$

0,040 / 0,040 = 1,00 <= 1; Nachweis erfüllt

Tragsicherheitsnachweis für Gesamtlast

$H_{d,\text{kurz}} = \gamma_Q \times H_{k,\text{kurz}} = 1,50 \times 1160 \text{ N} = 1740 \text{ N}$

$R_{d,\text{kurz}} = k_{\text{mod}} \times \tau_k / \gamma_M = 0,90 \times 0,600 / 3,0 = 0,180 \text{ N} / \text{mm}^2$

$S_{d,\text{kurz,Schub}} = H_{d,\text{kurz}} / (l \times b) = 1740 / (1250 \times 14) = 0,099 \text{ N} / \text{mm}^2$
maximale Klebstoffspannung (in der Glasecke)

Einfluss der Längenänderung der Koppelleiste:

Werden alle 120 mm Holzschrauben (5/70) verwendet und weist die Koppelleiste eine Geometrie wie unter Abbildung 36 auf, so kann durch die Verbundwirkung der Schrauben mit der Pfosten-Riegelkonstruktion die Zwänge zufolge Längenänderung auf 25 % reduziert werden. Diesbezüglich wurden im Projekt Vergleichsrechnungen nach EN 1995-1-1 durchgeführt. Bei anderen Geometrien ist der Faktor mit **1,00** anzusetzen oder es sind gesonderte Untersuchungen anzustellen.

$$\Delta l_{\max, \text{temp}} = (\alpha_{T, \text{Glas}} - \alpha_{T, \text{Koppelleiste}}) \times \Delta T \times h / 2 = (9 - 8) \times 10^{-6} \times 40 \times 2500 / 2 = 0,05 \text{ mm}$$

Wenn $h < l$, dann muss hier statt der Höhe h die Länge l eingesetzt werden.

$$\Delta l_{\max, \text{HF}} = \text{Quellmaß} \times \Delta u \times h / 2 = (0,01 / 100) \times 2 \times 2500 / 2 = 0,75 \text{ mm}$$

Wenn $h < l$, dann muss hier statt der Höhe h die Länge l eingesetzt werden.

$$\Delta l_{\max} = (0,05 + 0,75 \text{ mm}) \times \mathbf{0,25} = 0,20 \text{ mm}$$

$$\gamma = \Delta l_{\max} / d = 0,20 / 5 = 0,04$$

$$S_{d, \text{Zwang, Schub}} = \gamma \times G = 0,04 \times 0,50 = 0,020 \text{ N / mm}^2$$

$$S_{d, \text{Gesamt, Schub}} = S_{d, \text{lang}} + S_{d, \text{kurz, Schub}} + S_{d, \text{Zwang, Schub}} = \mathbf{0,040 + 0,099 + 0,020 = 0,159 \text{ N / mm}^2}$$

$$W_k = w_k \times l \times h = 0,60 \times 2,50 \times 1,25 = 1,88 \text{ kN}$$

$$W_d = \gamma_Q \times W_k = 1,50 \times 1,88 \text{ kN} = 2,81 \text{ kN}$$

$$R_{d, \text{Zug}} = k_{\text{mod}} \times \sigma_k / \gamma_M = 0,90 \times 0,76 / 3,00 = 0,228 \text{ N / mm}^2$$

$$S_{d, \text{Gesamt, Zug}} = W_d / (2 \times h + 2 \times l) / b = 2810 / (2 \times 2500 + 2 \times 1250) / 14 = \mathbf{0,027 \text{ N / mm}^2}$$

$$S_{d, \text{Gesamt, Schub}} / R_{d, \text{kurz}} + S_{d, \text{Gesamt, Zug}} / R_{d, \text{Zug}} \leq \mathbf{1,00}$$

$\mathbf{0,159 / 0,180 + 0,027 / 0,228 = 1,00 \leq 1; \text{ Nachweis erfüllt}}$
--

Gebrauchstauglichkeitsnachweis

Verformungsbeiwerte für den Silikonklebstoff

$k_{\text{def}} = 0,00$ für kurzfristige Lasten unter normalen Temperaturbedingungen

$k_{\text{def}} = 1,00$ für langfristige Lasten unter normalen Temperaturbedingungen

$k_{\text{def}} = 1,60$ für langfristige Lasten unter 55 °C

Es wird berechnet, dass die Kopfverschiebung des HGV-Elements kleiner als $h / 500$ ist.

Gebrauchstauglichkeitsnachweis für Dauerlast

$$H_{k,lang} = 240 \text{ N}$$

$$h = 2500 \text{ mm}$$

$$l = 1250 \text{ mm}$$

$$b = 14 \text{ mm}$$

$$d = 5 \text{ mm}$$

$$G = 0,50 \text{ N / mm}^2 \quad \text{Schubmodul des Klebstoffs aus den Kleinversuchen}$$

$$k = G \cdot \frac{b}{d} = 0,50 \cdot \frac{14}{5} = 1,40 \text{ N / mm}^2$$

$$\tau_{yx} = \frac{H_{k,lang}}{l \cdot b} \cdot \frac{1}{1 + \frac{h}{3 \cdot l}} = \frac{240}{1250 \cdot 14} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2500}{3 \cdot 1250}} = 0,008 \text{ N / mm}^2$$

$$\tau_{xy} = \frac{H_{k,lang}}{l \cdot b} \cdot \frac{1}{1 + \frac{l}{3 \cdot h}} = \frac{240}{1250 \cdot 14} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1250}{3 \cdot 2500}} = 0,012 \text{ N / mm}^2$$

$$\tau = \frac{\tau_{yx} + \tau_{xy}}{2} = 0,010 \text{ N / mm}^2$$

$$u_{Klebung,inst} = \frac{\tau}{G} \cdot d = \frac{0,010}{0,50} \cdot 5 = 0,10 \text{ mm}$$

$$u_{Klebung,fin} = u_{Klebung,inst} \cdot (1 + k_{def}) = 0,10 \cdot (1 + 1,60) = 0,26 \text{ mm}$$

$$u_{Kopf,inst} = \frac{2 \cdot H_{k,lang}}{k \cdot l} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{h}{3 \cdot l}} + \frac{\frac{h}{l}}{1 + \frac{l}{3 \cdot h}} \right) = \frac{2 \cdot 240}{1,40 \cdot 1250} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{2500}{3 \cdot 1250}} + \frac{\frac{2500}{1250}}{1 + \frac{1250}{3 \cdot 2500}} \right) = 0,6 \text{ mm}$$

$$u_{Kopf,fin} = u_{Kopf,inst} \cdot (1 + k_{def}) = 0,6 \cdot (1 + 1,60) = 1,7 \text{ mm}$$

$$\frac{h}{500} = 5 \text{ mm}$$

$1,7 / 5,0 = 0,33 \leq 1; \text{ Nachweis erfüllt}$

Gebrauchstauglichkeitsnachweis für kurzfristige Lasten

$$H_{k,kurz} = 1160 \text{ N}$$

$$\tau_{yx} = \frac{H_{k, kurz}}{l \cdot b} \cdot \frac{1}{1 + \frac{h}{3 \cdot l}} = \frac{1160}{1250 \cdot 14} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2500}{3 \cdot 1250}} = 0,040 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{xy} = \frac{H_{k, kurz}}{l \cdot b} \cdot \frac{1}{1 + \frac{l}{3 \cdot h}} = \frac{1160}{1250 \cdot 14} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1250}{3 \cdot 2500}} = 0,057 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = \frac{\tau_{yx} + \tau_{xy}}{2} = 0,049 \text{ N/mm}^2$$

$$u_{Klebung} = \frac{\tau}{G} \cdot d = \frac{0,049}{0,50} \cdot 5 = 0,49 \text{ mm}$$

$$u_{Kopf} = \frac{2 \cdot H_{k, kurz}}{k \cdot l} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{h}{3 \cdot l}} + \frac{\frac{h}{l}}{1 + \frac{l}{3 \cdot h}} \right) = \frac{2 \cdot 1160}{1,40 \cdot 1250} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{2500}{3 \cdot 1250}} + \frac{\frac{2500}{1250}}{1 + \frac{1250}{3 \cdot 2500}} \right) = 3,1 \text{ mm}$$

$$\frac{h}{500} = 5 \text{ mm}$$

3,1 / 5,0 = 0,61 <= 1; Nachweis erfüllt

Gebrauchstauglichkeitsnachweis für Gesamtlast

$$u_{Kopf} = u_{Kopf, lang} + u_{Kopf, kurz} = 1,7 + 3,1 = 4,7 \text{ mm}$$

$$h / 500 = 5 \text{ mm}$$

4,7 / 5,0 = 0,94 <= 1; Nachweis erfüllt

Es sind alle Nachweise erfüllt

Sofern alle Nachweise erfüllt sind, so ist das HGV-Element für die berechneten Lasten verwendbar.

5.2.1.6 Musterstatiken

Anhand von 5 Gebäudetypen wurden Statiken hinsichtlich der Gebäudeaussteifung erstellt. Die ermittelten Werte sollen eine Größenordnung vermitteln, welche Horizontalkräfte in ein- bis zweigeschoßigen Bauwerken vorkommen und abgetragen werden müssen.

Als erster Schritt wurden die Einwirkungen gemäß Eurocode 1 aus Eigengewicht, Schnee- und Windlasten ermittelt. Daraus wurde auf die jeweils gebäudeaussteifend wirksame Wandlänge eine Horizontalkraft pro Laufmeter in Abhängigkeit der Lasteinwirkungsdauer berechnet.

Gebäudetyp 1: Wintergarten

Wintergartenanbau mit Windangriff an der Schmalseite. Gebäudeaussteifung über die HGV-Fassadenfront (Aussteifung über die starke Achse).

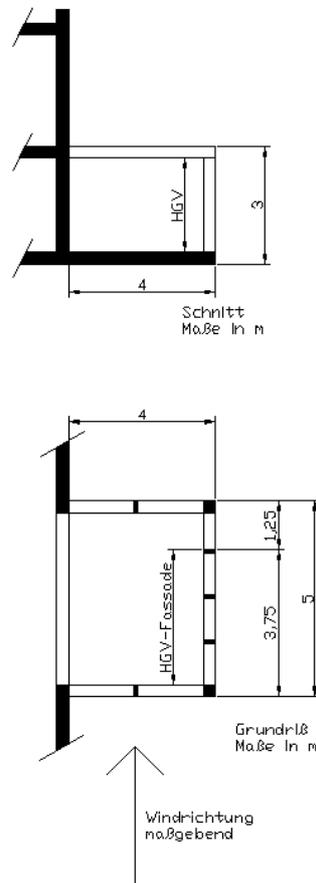


Abbildung 89: Skizze Gebäudetyp 1 - Wintergarten

Lastannahmen:

Schneelast $s_k = 2,0 \text{ kN / m}^2$ [EC1-1-3], [EC1-1-3b]

Nutzlast Dach $q_k = 0,5 \text{ kN / m}^2$

Windlast $w_k = 1,31 \text{ kN / m}^2$ (Druck- und Sogseite zusammen) [EC1-1-4], [EC1-1-4b]

Eigengewicht Glasdach $g_{\text{Dach,k}} = 0,44 \text{ kN / m}^2$

Eigengewicht Glaswand $g_{\text{Wand,k}} = 1,11 \text{ kN / lfm}$

Aus den Vertikallasten resultiert zufolge Gebäudeschiefstellung und elastischer Verformung der Wandscheiben von $h / 500$ eine Horizontallast auf das Gebäude [DIN1052]. Diese Horizontallast ergibt sich zu $H = (0,005 + 1 / 500) * V$.

$H_{\text{Dauer,k}} = 0,02 \text{ kN / lfm}$... Horizontallast zufolge Gebäudeschiefstellung

$H_{\text{Kurz,k}} = 0,89 \text{ kN / lfm}$... Horizontallast zufolge Wind

Gebäudetyp 2: Bungalow A

Eingeschoßiger Gebäudetyp mit Windangriff an der Schmalseite. Gebäudeaussteifung über die beiden längeren Wandscheiben (Aussteifung über die starke Achse).

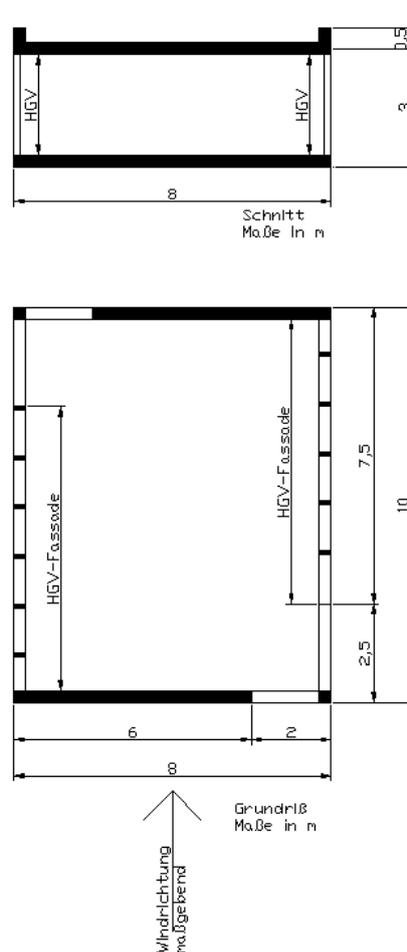


Abbildung 90: Skizze Gebäudetyp 2 - HGV-Wand in Bungalow (starke Achse)

Lastannahmen:

Schneelast $s_k = 2,0 \text{ kN / m}^2$ [EC1-1-3], [EC1-1-3b]

Nutzlast Dach $q_k = 0,5 \text{ kN / m}^2$

Windlast $w_k = 1,30 \text{ kN / m}^2$ (Druck- und Sogseite zusammen) [EC1-1-4], [EC1-1-4b]

Eigengewicht Dach $g_{\text{Dach},k} = 0,77 \text{ kN / m}^2$

Eigengewicht Wand $g_{\text{Wand},k} = 1,11 \text{ kN / lfm}$

Aus den Vertikallasten resultiert zufolge Gebäudeschiefstellung und elastischer Verformung der Wandscheiben von $h / 500$ eine Horizontallast auf das Gebäude [DIN1052]. Diese Horizontallast ergibt sich zu $H = (0,005 + 1 / 500) * V$.

$H_{\text{Dauer},k} = 0,03 \text{ kN / lfm}$... Horizontallast zufolge Gebäudeschiefstellung

$H_{\text{Kurz},k} = 1,18 \text{ kN / lfm}$... Horizontallast zufolge Wind

Gebäudetyp 3: Bungalow B

Eingeschoßiger Gebäudetyp mit Windangriff an der Breitseite. Gebäudeaussteifung über die beiden kürzeren Wandscheiben (Aussteifung über die schwache Achse).

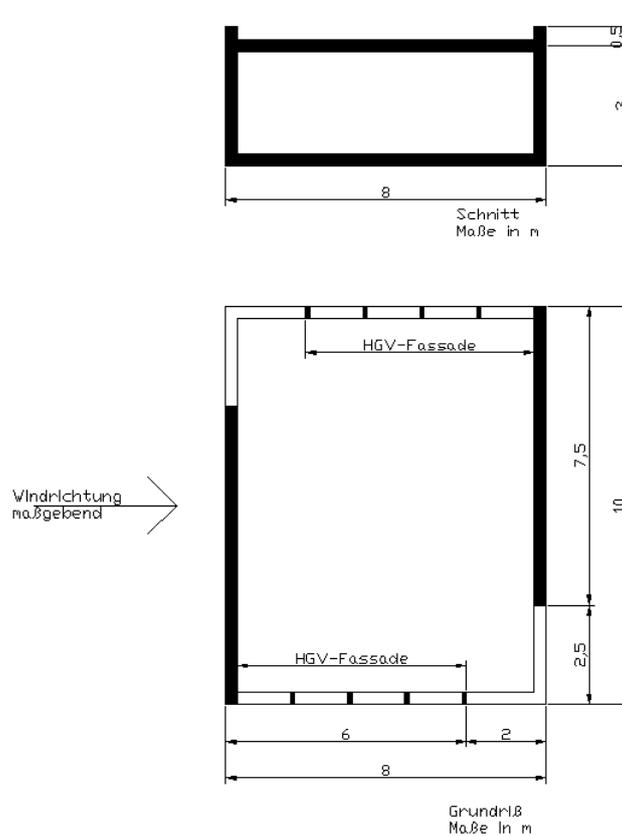


Abbildung 91: Skizze Gebäudetyp 3 - HGW-Wand in Bungalow (schwache Achse)

Lastannahmen:

Schneelast $s_k = 2,0 \text{ kN} / \text{m}^2$ [EC1-1-3], [EC1-1-3b]

Nutzlast Dach $q_k = 0,5 \text{ kN} / \text{m}^2$

Windlast $w_k = 1,30 \text{ kN} / \text{m}^2$ (Druck- und Sogseite zusammen) [EC1-1-4], [EC1-1-4b]

Eigengewicht Dach $g_{\text{Dach},k} = 0,77 \text{ kN} / \text{m}^2$

Eigengewicht Wand $g_{\text{Wand},k} = 1,11 \text{ kN} / \text{lfm}$

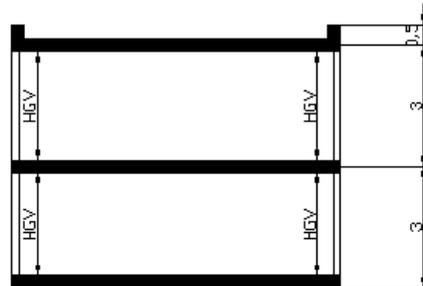
Aus den Vertikallasten resultiert zufolge Gebäudeschiefstellung und elastischer Verformung der Wandscheiben von $h / 500$ eine Horizontallast auf das Gebäude [DIN1052]. Diese Horizontallast ergibt sich zu $H = (0,005 + 1 / 500) * V$.

$H_{\text{Dauer},k} = 0,12 \text{ kN} / \text{lfm}$... Horizontallast zufolge Gebäudeschiefstellung

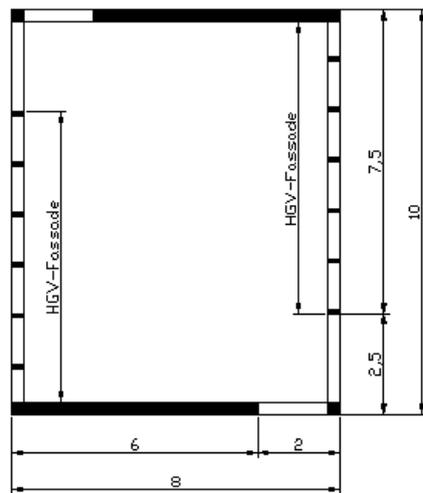
$H_{\text{Kurz},k} = 2,23 \text{ kN} / \text{lfm}$... Horizontallast zufolge Wind

Gebäudetyp 4: Einfamilienhaus A

Zweigeschoßiger Gebäudetyp mit Windangriff an der Schmalseite. Gebäudeaussteifung über die beiden längeren Wandscheiben (Aussteifung über die starke Achse).



Schnitt
Maße in m



Grundriß
Maße in m

Abbildung 92: Gebäudetyp 4 - HGV-Wand in zweigeschoßigem Gebäude (starke Achse)

Lastannahmen:

Schneelast $s_k = 2,0 \text{ kN / m}^2$ [EC1-1-3], [EC1-1-3b]

Nutzlast Dach $q_{\text{Dach},k} = 0,5 \text{ kN / m}^2$

Nutzlast Decke $q_{\text{Decke},k} = 2,0 \text{ kN / m}^2$

Windlast $w_k = 1,30 \text{ kN / m}^2$ (Druck- und Sogseite zusammen) [EC1-1-4], [EC1-1-4b]

Eigengewicht Dach $g_{\text{Dach},k} = 0,77 \text{ kN / m}^2$

Eigengewicht Decke $g_{\text{Decke},k} = 1,30 \text{ kN / m}^2$

Eigengewicht Wand $g_{\text{Wand},k} = 1,11 \text{ kN / lfm}$

Aus den Vertikallasten resultiert zufolge Gebäudeschiefstellung und elastischer Verformung der Wandscheiben von $h / 500$ eine Horizontallast auf das Gebäude [DIN1052]. Diese Horizontallast ergibt sich zu $H = (0,005 + 1 / 500) * V$.

$H_{\text{Dauer},k} = 0,06 \text{ kN / lfm}$... Horizontallast zufolge Gebäudeschiefstellung für die EG-Wand

$H_{\text{Kurz},k} = 2,96 \text{ kN / lfm}$... Horizontallast zufolge Wind für die EG-Wand

Gebäudetyp 5: Einfamilienhaus B

Zweigeschoßiger Gebäudetyp mit Windangriff an der Breitseite. Gebäudeaussteifung über die beiden kürzeren Wandscheiben (Aussteifung über die schwache Achse).

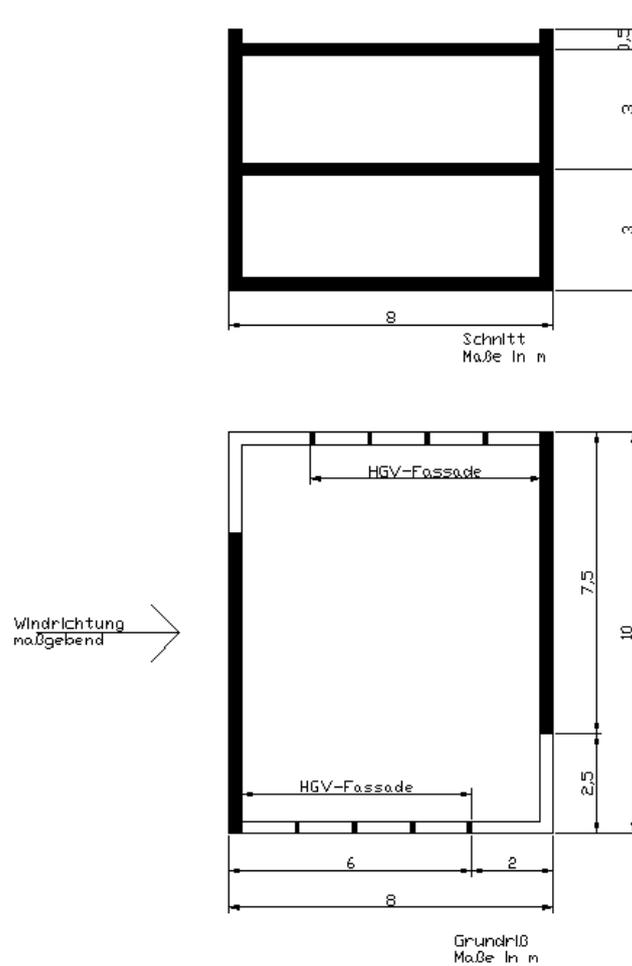


Abbildung 93: Gebäudetyp 5 - HGV-Wand in zweigeschoßigem Gebäude (schwache Achse)

Lastannahmen:

Schneelast $s_k = 2,0 \text{ kN / m}^2$ [EC1-1-3], [EC1-1-3b]

Nutzlast Dach $q_{\text{Dach},k} = 0,5 \text{ kN / m}^2$

Nutzlast Decke $q_{\text{Decke},k} = 2,0 \text{ kN / m}^2$

Windlast $w_k = 1,30 \text{ kN / m}^2$ (Druck- und Sogseite zusammen) [EC1-1-4], [EC1-1-4b]

Eigengewicht Dach $g_{\text{Dach},k} = 0,77 \text{ kN / m}^2$

Eigengewicht Decke $g_{\text{Decke},k} = 1,30 \text{ kN / m}^2$

Eigengewicht Wand $g_{\text{Wand},k} = 1,11 \text{ kN / lfm}$

Aus den Vertikallasten resultiert zufolge Gebäudeschiefstellung und elastischer Verformung der Wandscheiben von $h / 500$ eine Horizontallast auf das Gebäude [DIN1052]. Diese Horizontallast ergibt sich zu $H = (0,005 + 1 / 500) * V$.

$H_{\text{Dauer},k} = 0,25 \text{ kN / lfm}$... Horizontallast zufolge Gebäudeschiefstellung für die EG-Wand

$H_{\text{Kurz},k} = 5,57 \text{ kN / lfm}$... Horizontallast zufolge Wind für die EG-Wand

Zusammenfassung

Es treten unter Belastungen zufolge Wind, Schnee, Eigengewicht und Nutzlast folgende Horizontalkräfte an der Kopfrippe der HGV-Elemente auf und müssen übertragen werden:

Tabelle 29: Auftretende Lasten der einzelnen Gebäudetypen

Gebäudetyp	Fläche	Höhe	Horizontalkraft	
			$H_{Dauer,k}$ [kN/lfm]	$H_{Kurz,k}$ [kN/lfm]
(1) „Wintergarten“	5 x 4 m	3,0 m	0,02	0,89
(2) „Bungalow A“	10 x 8 m	3,5 m	0,03	1,18
(3) „Bungalow B“	10 x 8 m	3,5 m	0,12	2,23
(4) „Einfamilienhaus A“	10 x 8 m	6,5 m	0,06	2,96
(5) „Einfamilienhaus B“	10 x 8 m	6,5 m	0,25	5,57

Die angegebenen Werte beziehen sich bei den mehrgeschoßigen Gebäudetypen 4-5 auf die Erdgeschoßwand. Die Belastungen können durch den Einsatz von aussteifenden Innenwänden maßgeblich reduziert werden [EDL].

5.2.1.7 Vergleich der Klebstoffe mit den Musterstatiken

Unter Anwendung des Bemessungsvorschlages können für vorher definierte Gebäudetypen 1-5 die Anforderungen an Steifigkeit und Bruchlast des benötigten Klebstoffes definiert werden:

Zur Berechnung der erforderlichen Schubspannungen und Schubsteifigkeiten wurde eine Klebstoffugenbreite von 19 mm angenommen. Eine Zunahme der Holzfeuchtigkeit im Koppelleistensubstrat wurde hier mit 8 % und eine Temperaturänderung mit 40 K berücksichtigt.

Elementlänge $l = 1250$ mm

Elementhöhe $h = 3000$ mm

Klebefugenbreite $b = 19$ mm

Klebefugendicke $d = 3$ mm

Glasscheibendicke $t = 14$ mm (bei Isolierglas Gesamtglasstärke)

$\Delta u = 6 \%$ (Holzfeuchteänderung der Koppelleiste)

Quellmaß = 0,01 % / % HF-Änderung (Quellmaß der Koppelleiste)

$\Delta T = 40 \text{ K}$ (Temperaturänderung in der Fassade)

$\alpha_{T,\text{Glas}} = 9 \times 10^{-6}$

$\alpha_{T,\text{Koppelleiste}} = 8 \times 10^{-6}$

$w_k = 0,60 \text{ kN / mm}^2$ maximaler Windsog auf die Glasscheibe

In Tabelle 30 ist die Eignung des Silikonklebstoffes zur Erfüllung der Gebäudeaussteifung in bezug zu den 5 Gebäudetypen dargestellt.

Tabelle 30: Eignung Silikonklebstoff zur Erfüllung der Gebäudeaussteifung:

		GT 1	GT 2	GT 3	GT 4	GT 5
Dauerlast horizontal	$H_{\text{Dauer,k}} [\text{kN / lfm}]$	0,02	0,03	0,12	0,06	0,25
Kurze Last horizontal	$H_{\text{kurz,k}} [\text{kN / lfm}]$	0,89	1,18	2,23	2,96	5,57
Klebefugendicke	vorh. d [mm]	6,00	6,00	4,20	3,40	3,00
Erforderliche aufnehmbare charakteristische Schubspannung	erf. $\tau_k [\text{N/mm}^2]$	0,39	0,47	0,83	1,05	1,97
Erforderlicher Schubmodul min.	erf. G [N/mm ²]	0,26	0,35	0,50	0,50	0,87

GT ... Gebäudetyp

Wird die Gebäudeaussteifung lediglich durch Außenwände in Holz-Glas-Verbundweise bewerkstelligt, so ist dies mit Silikonklebstoffen bis zu einer Gebäudegröße Gebäudetyp 3 zu realisieren. Will man den Einsatz von HGV-Elementen in den Gebäudetypen 4 und 5 realisieren, so stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung.

Einerseits können die in der Regel ohnehin vorhandenen Innenwände im statischen Tragkonzept als Sekundärtragsystem berücksichtigt werden. Gerade der Holzbau eignet sich hier hinsichtlich der ähnlichen Steifigkeiten mit den HGV-Elementen als ideale Ergänzung.

Andererseits können Klebstoffe mit verbesserten Festigkeitswerten eingesetzt werden wobei bereits erste Weiterentwicklungen durch die Projektpartner stattfinden. Gerade im Fassadenbereich ist großes Augenmerk auf die Dauerhaftigkeit zu legen, welche bei Silikonklebstoffen durch die jahrzehntelange Erfahrung beim Einsatz in Fenster und Fassade nachgewiesen wurde.

6 Technische Umsetzung

Zum Einsatz von HGV-Elementen im tragenden Bereich müssen diverse Rahmenbedingungen erfüllt sein. Zum einen muss den baurechtlichen Bestimmungen genüge getan werden, zum anderen muss die Herstellbarkeit und Montierbarkeit auf eine wirtschaftliche Weise funktionieren, um eine Serienfertigung zu ermöglichen.

Aus diesem Grund wurde eine Recherche der momentan gültigen **baurechtlichen Bestimmungen** durchgeführt. Anforderungen wie den Abtrag des Eigengewichts der Glasscheibe sowie die Sicherung der Glasscheibe gegen Herausfallen wurden planerisch berücksichtigt und fanden in ausgewählten Prototypenbauwerken ihre Anwendung.

Für die **Herstellung und Montage** wurde eine Ablaufplanung entworfen, welche auch bei der Realisierung der Prototypenbauwerke zum Einsatz kam und dabei qualitativ beurteilt wurde.

Für die bautechnisch richtige Anbindung des Tragsystems an angrenzende Bauteile wurden beispielhaft mehrere **Detaillösungen** entwickelt.

Der nächste Schritt des Projekts war die Suche nach geeigneten Bauwerken zum Einbau von Prototypen-HGV-Elementen zur Implementierung der Forschungsergebnisse. Mehrere Gebäude wurden evaluiert und zwei Gebäude konnten mit dem HGV-Fassadensystem unter Mitarbeit der im Projekt beteiligten Wirtschaftspartner errichtet werden. Die beiden Projekte werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

6.1 Forschungsgebäude Arsenalgelände

Das erste Gebäude ist ein Forschungsgebäude der Holzforschung Austria (Abbildung 95) in Bungalowbauweise mit einer nord- und einer südgerichteten Glasfassade mit jeweils ca. 14 m² Fassadenfläche. Die Realisierung zeigte die praktikable Montage und Herstellung des Fassadensystems und bietet in Zukunft Einblicke über die Dauerhaftigkeit und das Langzeitverhalten.

Das Gebäude hat eine Bruttogeschossfläche von 86 m² und ist die Tragstruktur durch eine innenliegendes Holzskelett realisiert. Die Wände sind in Holzrahmenbauweise ausgebildet und werden außen an die Tragstruktur angeschlossen.

Das Objekt ist voll innenklimatisiert um verschiedene Klimazustände einzustellen. Insgesamt wurden vier Forschungsprojekte in das Gebäude integriert wobei die Fenster, das Dach, der Sockelbereich und die Glasfassade durch die Arbeiten behandelt wurden.

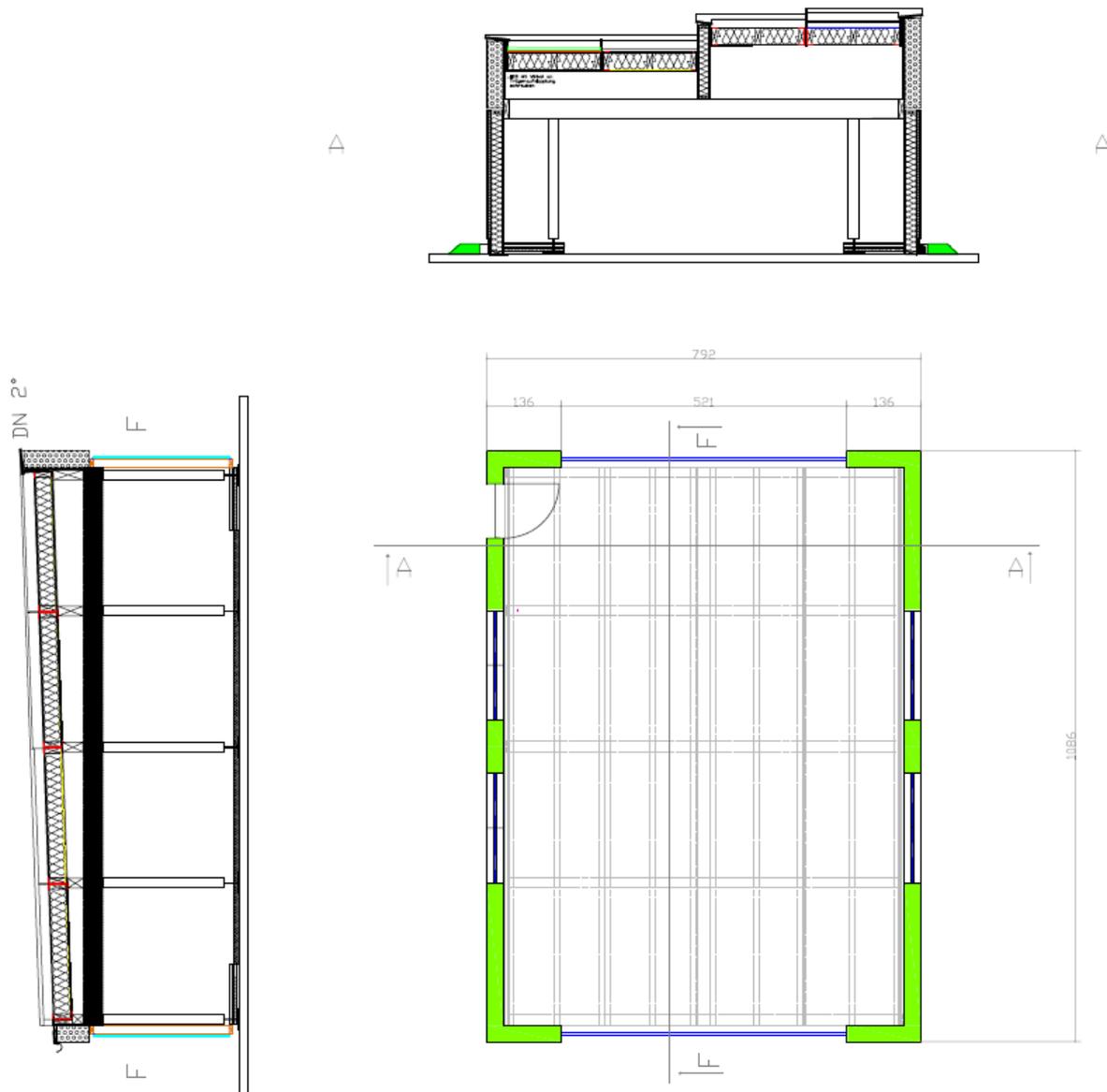


Abbildung 94: Grundriss und Schnitte



Abbildung 95: Forschungsgebäude Holzforschung Austria

Die Herstellung der HGV-Elemente erfolgte auf einem Richtrahmen analog zu Kapitel „Ermittlung der statischen Leistungsfähigkeit von HGV-Elementen“. Die HGV-Elemente wurden in Wien hergestellt und 130 km zu einem Fertigteilhausproduzenten in Niederösterreich transportiert. Dort erfolgte der Einbau der HGV-Elemente in zwei Fertigteilwände (Abbildung 96). Die fertige Wand (Abbildung 97) wurde zurück nach Wien transportiert und in die aufgestellte Skelettstruktur eingebaut (Abbildung 98 - Abbildung 100).

Die Untersuchungen an diesem Forschungsgebäude lieferten wichtige Erkenntnisse im Hinblick auf die HGV-Elemente als Fassadenbauteil (vgl. Kap. „Optimierung der Prototypenentwicklung“ – „Forschungsgebäude Arsenalgelände“). Aber auch der Ablauf der Serienfertigung solcher HGV-Elemente konnte evaluiert werden.



Abbildung 96: Einsetzen der HGV-Elemente in die Fertigteilwand



Abbildung 97: Umheben der fertig montierten Elementfassade



Abbildung 98: Skelettstruktur des Forschungsgebäudes



Abbildung 99: Einheben der Elementfassade



Abbildung 100: Fertiggestelltes Forschungsgebäude

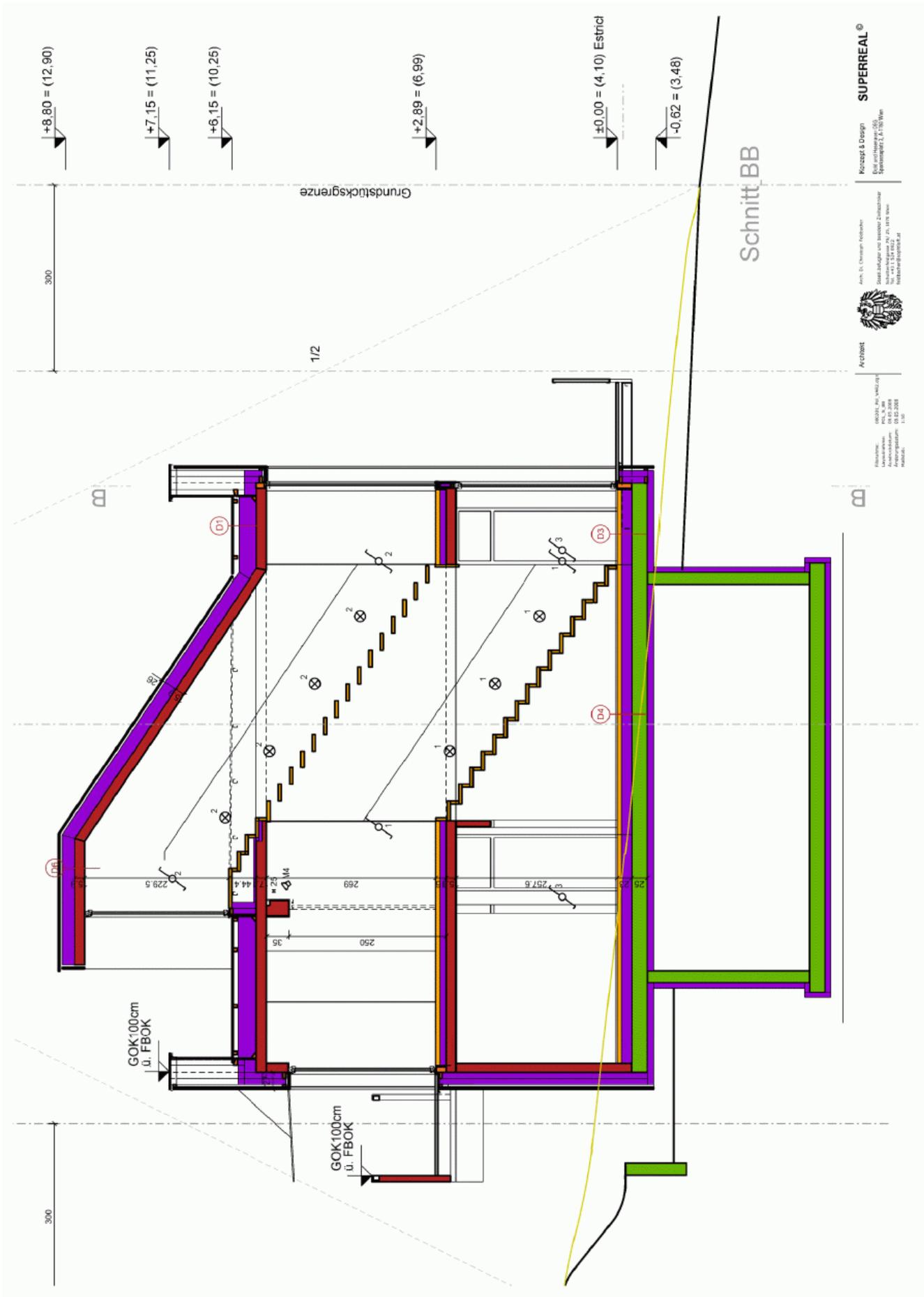
6.2 Einfamilienhaus Eichgraben

Ein zweites Gebäude ist ein zweigeschossiges Einfamilienhaus in der Umgebung von Wien. Auch hier konnte die realitätsnahe Produktion und Montage unter Beweis gestellt werden und die HGV-Elemente übernehmen durch die kraftschlüssige Verbindung mit dem Gebäude erstmals eine statische Funktion. Die weitere begleitende Kontrolle des Fassadensystems durch die Holzforschung Austria schafft Grundlagen für die Serienproduktion.

Das Gebäude besteht aus zwei Geschossen sowie einem Kellergeschoß und hat eine Bruttogeschossfläche von 100 m². Die Wand- und Deckenscheiben wurden in Holzmassivbauweise errichtet. Die HGV-Elemente wurden nachträglich von außen an die Pfosten-Riegel-Fassade mit dem Gebäude kraftschlüssig verbunden.

Die Herstellung der HGV-Elemente erfolgte bei einem projektbeteiligten Glasproduzenten. Durch die unterschiedlichen Glasdimensionen wurde eine andere Fertigungsmethode getestet und stellte sich als äußerst praktikabel heraus. Dabei wurde nicht, wie zuvor das Glas auf die bereits justierten Koppelleisten eingehoben, sondern die Koppelleisten mittels doppelseitigen Klebebändern am Glasrand fixiert.

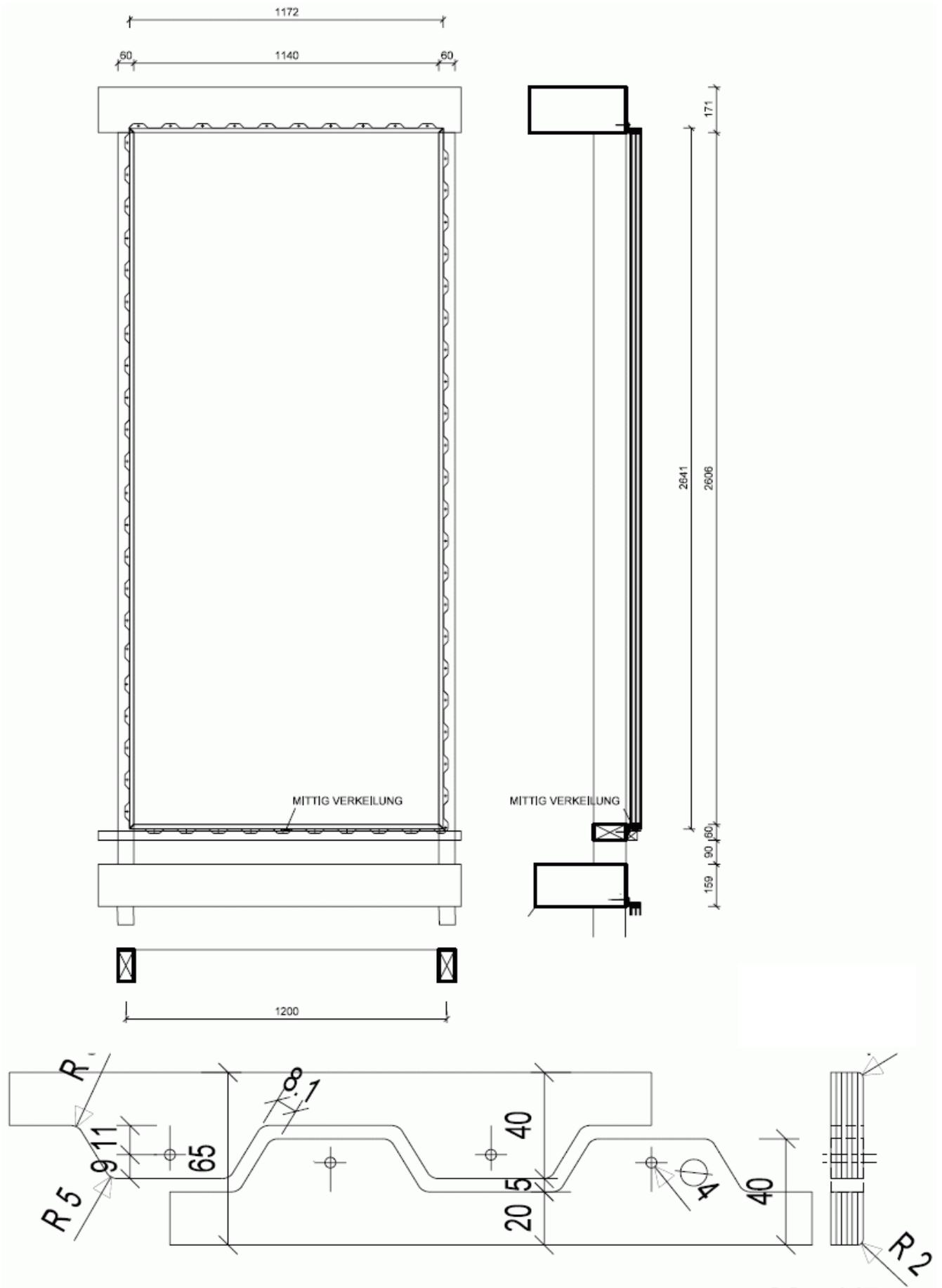
Die Koppelleisten wurden auf den Glasrand befestigt (Abbildung 105) und umlaufend verklebt. Auf diese Weise konnten zwölf unterschiedliche Glasformate hergestellt werden (Abbildung 106). Die Glasscheiben wurden nach der Aushärtezeit auf die 130 km entfernte Baustelle transportiert und einzeln in die vorher aufgestellte Pfosten-Riegel-Konstruktion eingesetzt (Abbildung 109 - Abbildung 112). Durch die umlaufende Verschraubung der HGV-Elemente mit der Tragstruktur wird die statische Tragfähigkeit des HGV-Elements aktiviert. Nach der Montage erfolgte eine Nassversiegelung von außen sowie die Montage der Holzfassade und des Vordaches.

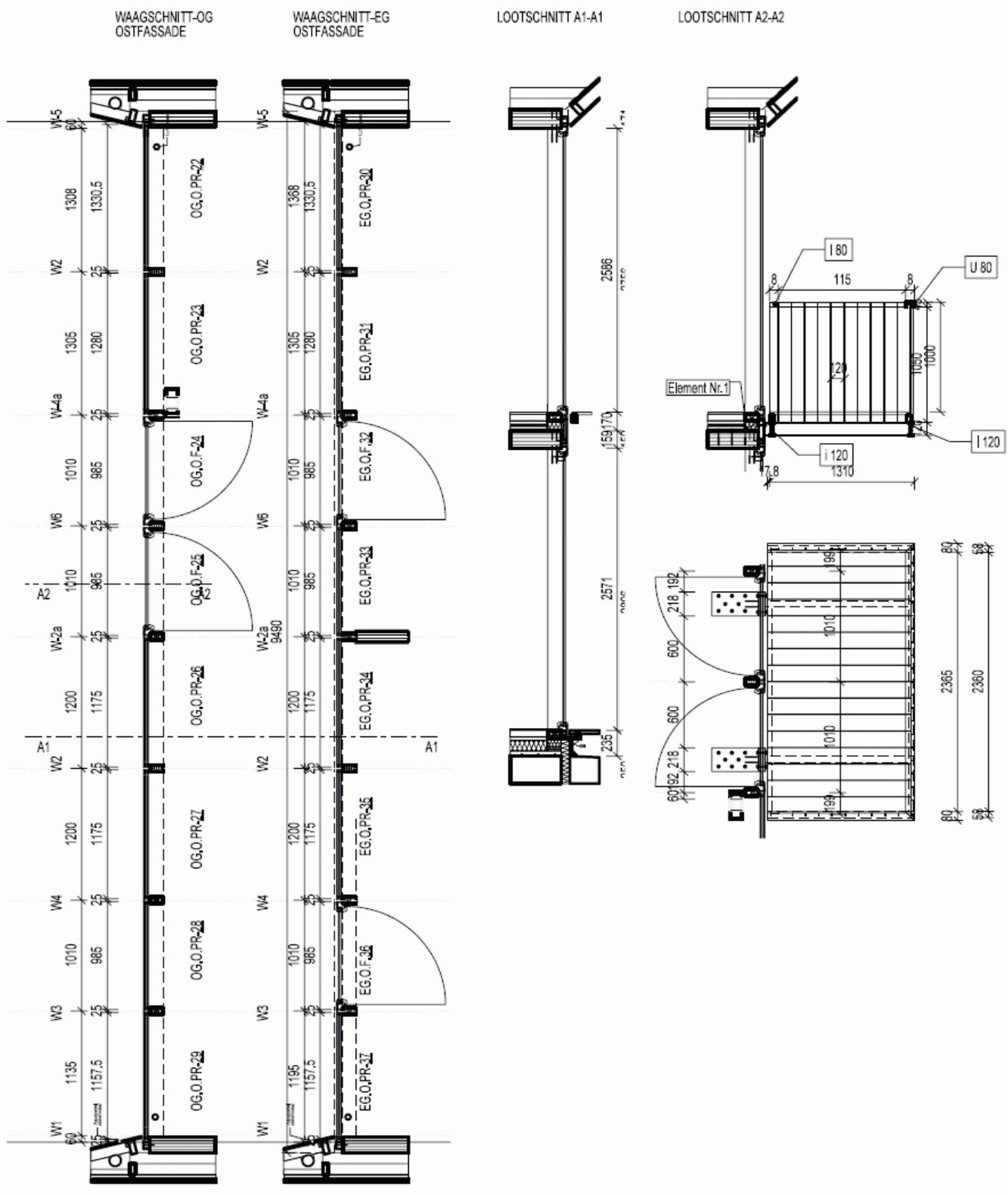


Konzepts & Design
 SUPERREAL ©
 Dipl. Architektin (FH)
 Elisabeth Kerschbaum
 Hauptplatz 2, 4110 Wien

Architekt
 Arch. Dr. Christiane Hirscher
 Stadlanger und Partner Zöschbauer
 Schwanengasse 70, 1170 Wien
 Hirscher@stadlanger.at

Maßstab:
 1:50
 Projekt:
 Architekturbüro
 Architekt:
 Christiane Hirscher
 Datum:
 08.05.2008





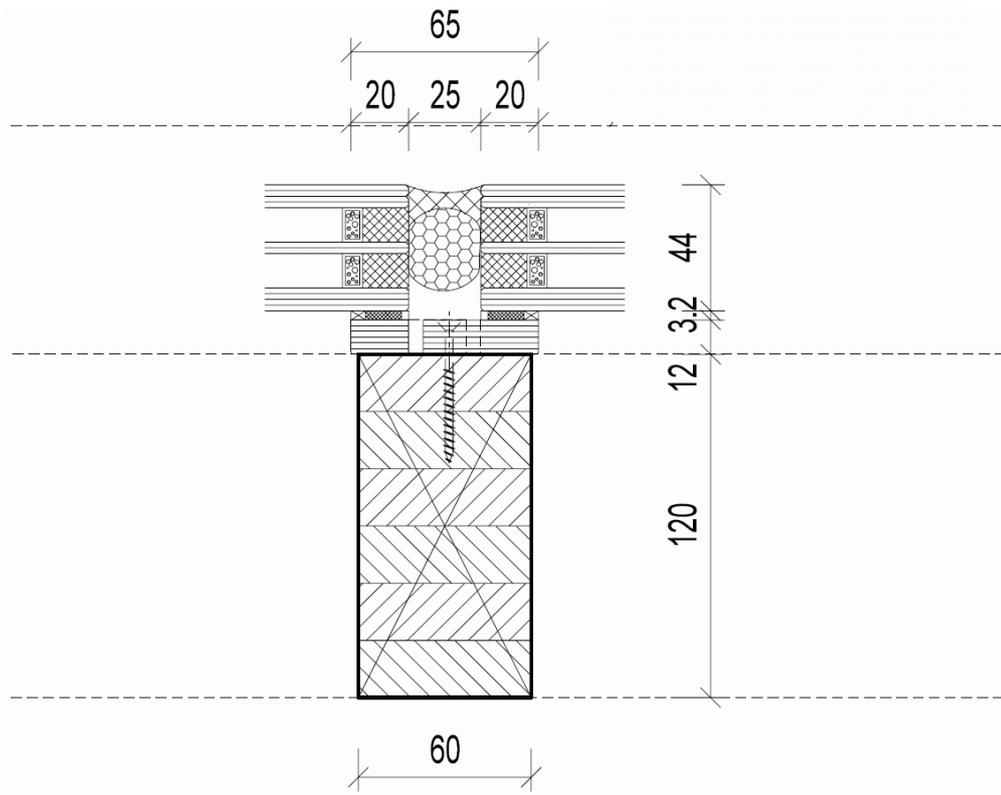


Abbildung 101: Horizontalschnitt HGV / HGV-Stoß

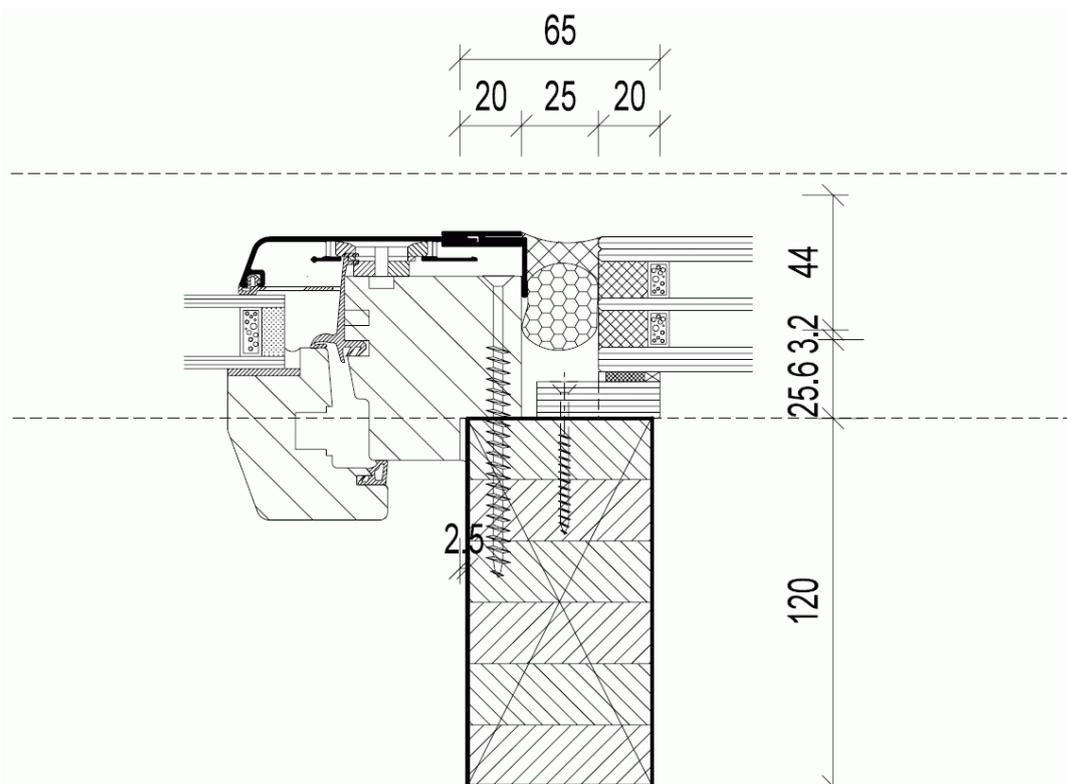


Abbildung 102: Horizontalschnitt HGV / Balkontür-Stoß

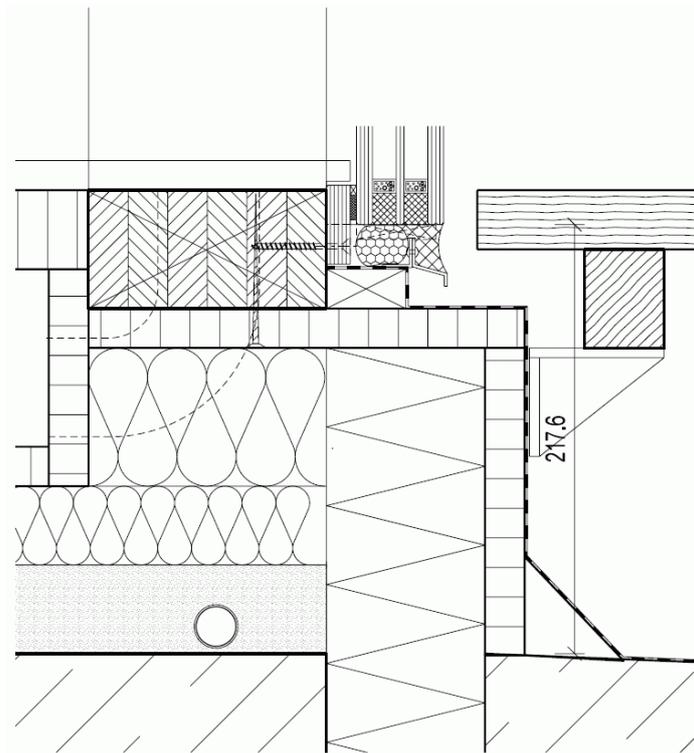


Abbildung 103: Vertikalschnitt Sockeldetail

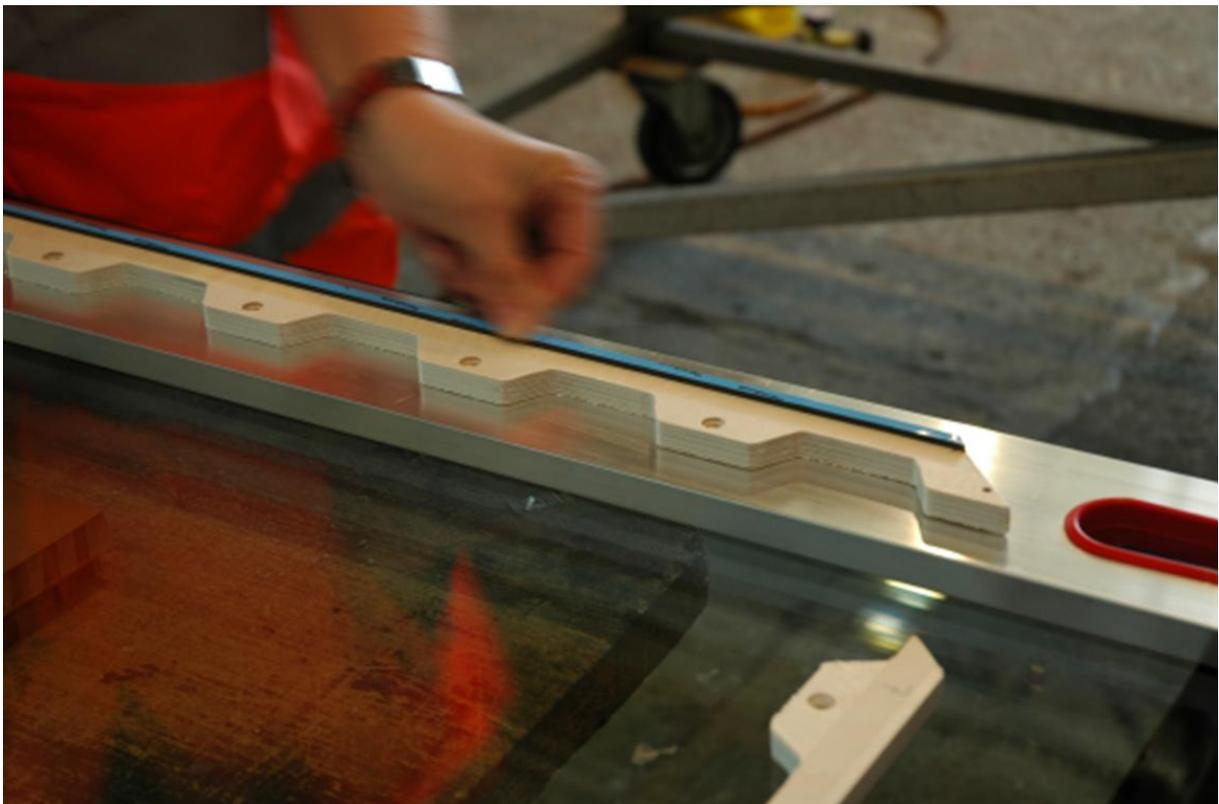


Abbildung 104: Aufbringen des Klebebands auf die Koppelleiste



Abbildung 105: Anbringen der Koppelleiste an der Glaskante



Abbildung 106: Fertig verklebte HGV-Elemente, Aushärtung



Abbildung 107: Modell des Bauvorhabens



Abbildung 108: Westansicht des Bauvorhabens, Rohbau



Abbildung 109: Ostansicht des Bauvorhabens, Rohbau

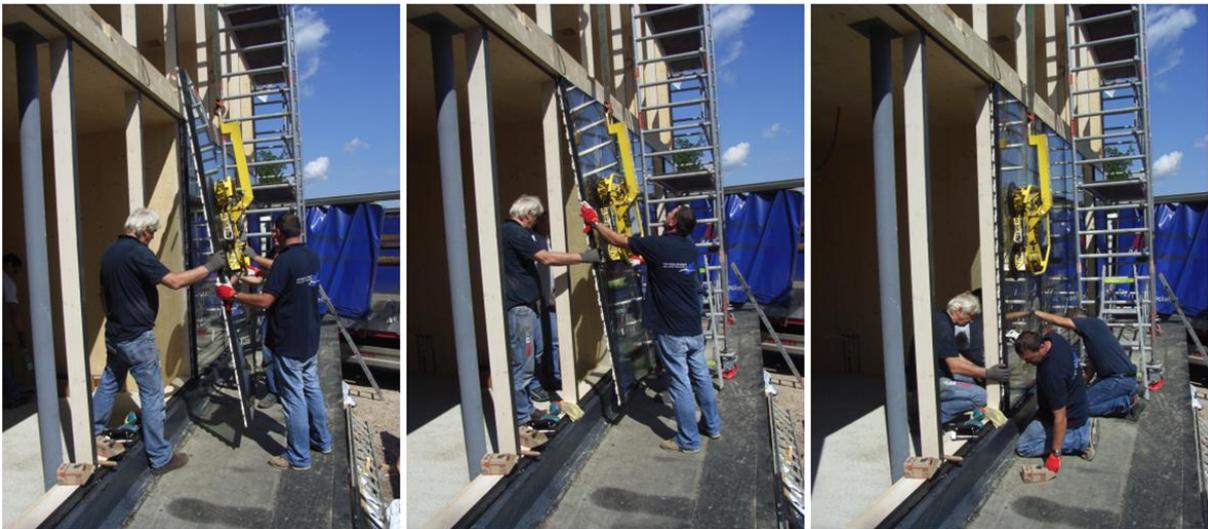


Abbildung 110: Einsetzen der HGV-Elemente auf der Baustelle



Abbildung 111: Einsetzen der HGV-Elemente auf der Baustelle



Abbildung 112: Fertige Glasfassade inklusive öffentlicher Elemente



Abbildung 113: HGV-Fassade von innen



Abbildung 114: Fertiggestellte Holzfassade West



Abbildung 115: Fertiggestellte Holzfassade Nord / West



Abbildung 116: Fertiggestellte Glasfassade Ost

7 Resumée und Ausblick

7.1 Resumée

Im **ersten Projektteil** wurden die Eigenschaften der unterschiedlichen Klebstoffsysteme hinsichtlich verschiedener Belastungsszenarien charakterisiert. Untersucht wurden zwei 2-K-Silikon-Klebstoffsysteme und ein Acrylat-Klebstoffsystem.

Die erarbeiteten Grundlagen zur Leistungsfähigkeit der Klebstofffuge zeigen deutlich, dass sich die wesentlich höheren Anfangsfestigkeiten und -steifigkeiten des Acrylat-Klebstoffes unter Feuchtigkeits- und Temperaturbelastungen sowie starkem Kriechverhalten des Klebstoffs unter Dauerlast reduzieren. Diese Beobachtungen konnten in Versuchen an den Fassadenprototypen unter Klimabelastungen reproduziert werden. Die beiden Silikonklebstoffe zeigen wesentlich gleichbleibenderes Verhalten und ihnen ist durch die Einflüsse von Feuchtigkeit und Temperatur im Fassadenbereich hinsichtlich des robusteren, „berechenbareren“ Verhaltens momentan noch der Vorzug zu geben. Auch ist das Langzeitverhalten von Silikonklebstoffen durch den jahrzehntelangen Einsatz in Structural Glazing Fassaden weitgehend bekannt.

Im **zweiten Projektteil** wurde das Holz-Glas-Verbund-Tragsystem entsprechend weiterentwickelt, sodass die hohen Anforderungen an ein funktionierendes Fassadensystem erfüllt sind. Die Funktion des Fassadensystems (Gebäudehülle) wurde in die Funktion des Tragsystems (Lastabtragung) implementiert. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass durch die Verwendung von Holzsubstrat als tragenden Bestandteil (Koppelleiste) des HGV-Elements eine dauerhafte Feuchtebeanspruchung vermieden werden muss. Eine Feuchtezunahme der Tragstruktur wurde in Laborversuchen sowie Messungen am Forschungsgebäude beobachtet. Die Rücktrocknung des Fassadensystems ist jedoch gegeben. Die Feuchtezunahme kann durch entsprechende technische Maßnahmen (Dreischeiben-Isolierverglasung, beheizter Randverbund, Beschichtungssysteme und dergleichen) stark reduziert oder verhindert werden wie es in der Arbeit gezeigt wurde.

Darüber hinaus wurde der Einsatz von alternativen Materialien für das Material der Koppelleiste abgehandelt. Untersucht wurden metallische Materialien (Aluminium und Stahl) sowie Kunststoffe (PVC und GFK) im Hinblick auf Wärmeleitfähigkeit, Temperaturdehnung, Feuchtebeständigkeit, Quell- und Schwindverhalten, Verschraubbarkeit und Verklebbarkeit. Zur Bewertung wurden orientierende experimentelle Untersuchungen sowie Vergleichsrechnungen durchgeführt und eine Bewertungsmatrix aufgestellt. Durch die hohen Anforderungen an die zuvor genannten Kriterien wurden das im Projekt untersuchte Birkenesperrholz sowie GFK-Profile als geeignete Materialien charakterisiert.

Im **dritten Projektteil** wurde die Leistungsfähigkeit der HGV-Elemente zur Gebäudeaussteifung mittels Großversuchen nachgewiesen. Hierbei wurden unterschiedliche Geometrievariationen und Systemkopplungen untersucht und das Bruchverhalten charakterisiert.

Bei Silikonklebstoffen zeigt sich deutlich, dass durch die hohe Verformbarkeit der Klebstofffuge und die geringen Endfestigkeiten sowohl die Verformbarkeit des Gesamtsystems als auch die Traglast direkt mit dem Tragverhalten der Klebstofffuge selbst in Verbindung gebracht werden kann. Einflüsse wie die Biegesteifigkeit der Holzkonstruktion, das Beulverhalten der Glasscheibe oder die Schraubenverbindungen haben keinen maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse. Durch das Beschreiben der Steifigkeit der Klebstofffuge in Rechenmodellen wird die Prognose für das gesamte Tragsystem vereinfacht.

Bei dem Acrylatklebstoff zeigen sich durch die höheren Steifigkeiten und Festigkeiten des Klebstoffs deutlich komplexere Versagens- und Verformungsmechanismen. Die Steifigkeit des Klebstoffs liegt bereits in einer Größenordnung der Steifigkeit der Schraubenverbindungen. Dadurch kann die Verformung des Gesamtsystems nicht mehr unmittelbar über die Verformung des Klebstoffs beschrieben werden. Weiters trat bei höheren Schubbelastungen der HGV-Konstruktion bereits deutlich sichtbares Plattenbeulen der Glasscheibe sowie Biegeverformungen der Pfosten-Riegelkonstruktion auf. Die komplexeren Versagensmechanismen zeigten sowohl Schrauben- als auch Klebstoffversagen und führten in weiterer Folge durch Spannungsumlagerungen beim lokalen Versagen einzelner Verbindungsteile in den meisten Fällen zum Glasbruch.

Die Berechnungsmodelle im **vierten Projektteil** beschränken sich daher lediglich auf das Tragverhalten von silikonverklebten HGV-Systemen, da auch in den vorangegangenen Projektteilen die Eignung dieser Klebstoffsysteme gezeigt wurde.

Unter Anwendung zweier Berechnungsmodelle zeigt sich, dass die im System auftretenden Bruchlasten und Verformungen mit ausreichender Genauigkeit reproduziert werden können.

Dabei wurde ein numerisches Berechnungsmodell nach der Finite-Elemente-Methode in dieser Arbeit entwickelt. Als zweites Berechnungsmodell kam ein analytisches Federmodell zur Anwendung [KREU].

Ein Vergleich der beiden Rechenmodelle zeigt sehr ähnliche Ergebnisse und bietet damit die Grundlage zur Beschreibung der Verformbarkeit und Traglast von HGV-Elementen.

Nach dem Vergleich der Rechenmodelle untereinander wurde ein Abgleich mit den experimentellen Untersuchungen durchgeführt. Es zeigt sich, dass mit beiden Rechenmodellen die Traglast und das Verformungsverhalten von silikonverklebten HGV-Elementen mit ausreichender Genauigkeit beschrieben werden kann und bietet damit eine wichtige Voraussetzung zur Entwicklung eines Bemessungskonzeptes. Wegen der

einfacheren Anwendbarkeit wurde das analytische Rechenmodell im weiteren Teil der Arbeit verwendet um einen Vorschlag für ein zukünftiges Bemessungskonzept zu entwickeln.

Unter Berücksichtigung der Grundlegendaten der Kleinprobenuntersuchungen aus dem ersten Projektteil konnte ein Vorschlag für geeignete Teilsicherheitsbeiwerte definiert werden um die statische Leistungsfähigkeit von HGV-Elementen mit gebäudeaussteifender Wirkung zu quantifizieren. Dabei wurden Einflussfaktoren wie Lastdauer, Temperatur- und Feuchtebeanspruchung in die Berechnung mit einbezogen.

Unter Anwendung des neu entwickelten Bemessungskonzeptes wurden im Projekt mehrere typische Gebäudegeometrien des Einfamilienhausbaus untersucht und die Belastung der HGV-Elemente beim Abtrag der horizontalen Belastungen im Gebäude quantifiziert. Es zeigt sich, dass mit silikonverklebten HGV-Elementen die Aussteifung von bis zu zweigeschoßigen Gebäuden möglich wird. Bei ungünstigen Grundrissgeometrien werden Sekundärtragsysteme wie tragende Innenwände mit Beplankungen aus Holzwerkstoffplatten notwendig, welche aber in den meisten Fällen im Holzhausbau ohnehin vorhanden sind und durch ein ähnliches Steifigkeitsverhalten eine gute Ergänzung bieten.

Im **letzten Projektteil** wurden die gesammelten Erkenntnisse im Rahmen eines Forschungsgebäudes und eines Einfamilienhauses umgesetzt. Die Realisierung dieser Bauwerke bietet über das Projekt hinaus die Möglichkeit Langzeiterfahrungen zu sammeln. Die praktische Umsetzung bietet aber auch wichtige Erkenntnisse im Hinblick auf die Ausbildung von Anschlüssen zu angrenzenden Bauteilen, Aufnahme von Toleranzen, und die Evaluierung von Montage- und Herstellungsvarianten für die Serienfertigung.

Auf Grundlage der wissenschaftlichen Untersuchungen ist es gelungen, dass im Vorgängerprojekt entwickelte Holz-Glas-Verbundtragsystem so weiterzuentwickeln, dass eine ausreichende statisch wirksame Verklebung von Holz und Glas zur Gebäudeaussteifung im Holzhausbau gegeben ist. Der Einsatz der Elemente im Fassadenbau wurde erprobt und wurde die Möglichkeit einer Bemessung solcher Tragsysteme geschaffen.

7.2 Ausblick

Diese Arbeit baut auf die vorangegangenen Forschungsprojekte von **Kreher**, **Hamm**, **Niedermaier** und **Edl** auf. Die Beschreibung von silikonverklebten Holz-Glas-Verbundelementen ist in dieser Arbeit mit ausreichender Genauigkeit möglich geworden. Die Berechnung von Wandsystemen mit üblichen Längen- / Breitenverhältnis kann durchgeführt werden. Es bieten sich jedoch in weitere Folge mehrere Fragestellungen die in weiterführenden Forschungsprojekten eine Beantwortung finden könnten.

Systeme mit steiferen Klebstoffen oder sehr schlanke, hohe Wandscheiben (Übergang von der Scheibenbetrachtung auf einen linienförmigen Kragträger) können noch nicht rechnerisch dargestellt werden. Eine Ausweitung des Bemessungskonzeptes auf weitere Versagensmechanismen (Versagen der Schrauben, der Koppelleiste oder des Glassubstrates) ist von weiterem Interesse.

Ein Zusammenwirken von unterschiedlichen Tragsystemen (z.B. Holzrahmenbauwänden mit HGV-Elementen) in einem Gebäude kann Inhalt einer weiteren theoretischen Arbeit bieten.

Weiters ist das Integrieren einer zweiten Systemtragwirkung (Kombination des umlaufenden Schubfeldes mit einer Diagonalentragwirkung der Glasscheibe) ein denkbarer Ansatz um die Steifigkeit der HGV-Systeme deutlich zu erhöhen. Eine Überlagerung der Schubfeldtheorie mit einer Fachwerkstheorie wäre in diesem Fall erforderlich und bietet weiteren Forschungsbedarf. [HOC]

Auch findet in der Klebstoffindustrie eine ständige Weiterentwicklung der Klebstoffarten statt und bieten sich in Zukunft mit Sicherheit weitere interessante Klebstoffe für den dauerhaften Einsatz im Holz-Glas-Verbund an.

Diese Forschungsarbeit zeigt sehr anschaulich, welche Leistungsfähigkeit in den heutigen Klebstoffsystemen steckt. Die bisherige Anwendung von geklebten Glaskonstruktionen im Fassadenbereich wird technisch durch die ETAG 002 [OIB1] geregelt. Die in dieser Leitlinie festgelegten Sicherheitsbeiwerte können durch die Erkenntnisse dieser Arbeit als sehr konservativ beurteilt werden wodurch die statische Leistungsfähigkeit heutiger Klebstoffe nicht voll ausgenutzt werden kann. Ein Einsatz tragender Klebstoffverbindungen zum gebäudeaussteifenden Einsatz wird dadurch nahezu unmöglich gemacht. In der ETAG 002 darf eine Dauerlast nur mit $1 / 60$ -tel des 5%-Fraktilwerts der Bruchfestigkeit zugelassen werden. Die erarbeiteten Grundlagen dieser Arbeit zeigen jedoch, dass den heutigen Klebstoffen die bis zu dreifache Bemessungslast für ständige Lasten zugemutet werden kann.

Für die Ausnutzung dieser neuen Technologie wird daher die Hinterfragung und Überarbeitung bestehender technischer Richtlinien mit der entsprechenden gebotenen Vorsicht und Untermauerung durch weitere statistische Grundlagen unumgänglich sein.

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

[EDL] Edl T.: *Entwicklung von wandartigen verklebten Holz-Glas-Verbundelementen und Beurteilung des Tragverhaltens als Aussteifungsscheibe*; Dissertation TU Wien; 2008

[FEL] Feldmeier F. / Skora T.: *Leichte Vorhangfassaden aus Holz, Konstruktionsgrundlagen für eine definierte Feuchteabfuhr*; Hochschule Rosenheim; 2008

[FRA] Frank T.: *Sommerlicher Wärmeschutz – Neue Herausforderungen im Zeichen des Klimawandels*; Tagungsband 40. Fortbildungskurs Schweizer Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung, Zürich; 2008

[HAB] Habenicht, G. – *Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen*; Springer Verlag Berlin; 1990

[HAM] Hamm J.: *Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas*; Dissertation EPF Lausanne; 1999

[HAU1] Schober K. P. / Hauer K.: *Grundlagen zur Entwicklung einer neuen Holzfenstergeneration, 1. Forschungsjahr, Unterprojekt: Glasanschluss durch Kleben*; Holzforschung Austria, Wien; 2006

[HAU2] Schober K. P. / Hauer K.: *Grundlagen zur Entwicklung einer neuen Holzfenstergeneration, 2. Forschungsjahr, Unterprojekt: Glasanschluss durch Kleben*; Holzforschung Austria, Wien; 2007

[HEI] Heinzmann R. / Koch S. / Thielemann Ch. / Wolf J.: *Elastisches Kleben im Bauwesen – Die Bibliothek der Technik Band 212*; Verlag Moderne Industrie, Landsberg; 2001

[HFA1] Holzforschung Austria: *Patenturkunde No. 502470 - Glas-Verbundelement*; Österreichisches Patentamt, Wien; 2005

[HOC] Hochhauser W.: *Dissertation zum Thema Holz-Glas-Verbund (unveröffentlicht)*; Dissertation TU Wien; 2011

[KREH] Kreher K.: *Tragverhalten und Bemessung von Holz-Glas-Verbundträgern unter Berücksichtigung der Eigenspannungen im Glas*; Dissertation EPF Lausanne; 2004

[KREU] Kreuzinger H. / Niedermaier P.: *Holz-Glas-Verbundkonstruktionen – Glas als Schubfeld*; Tagungsband Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage; 2005

[NEU1] Neubauer G. / Schober K. P.: *Forschungsbericht Kompetenzzentrum Holztechnologie – Holz-Glas-Verbundelemente*; Holzforschung Austria, Wien; 2009

[NEU2] Neubauer G. / Schober K. P.: *Handbuch für den Einsatz von Holz-Glas-Verbundelementen für Lizenznehmer des HFA-HGV-Patents*; Holzforschung Austria, Wien; 2008

[NIE] Niedermaier P.: *Holz-Glas-Verbundkonstruktionen. Ein Beitrag zur Aussteifung von filigranen Holztragwerken*; Dissertation TU München; 2005

[OTT] Otto Chemie: *Gute Verbindungen – Dichten und Kleben von A-Z*; Artikel zur Fensterbau Frontale 2008, Nürnberg; 2008

[SCH] Edl T. / Schober K. P.: *Forschungsbericht Kompetenzzentrum Holztechnologie – Statisch wirksame Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zur Aussteifung von Holzbauten*; Holzforschung Austria, Wien; 2005

[THI] Thienel K.-Ch.: *Werkstoffe des Bauwesens – Glas*; Vorlesungsskriptum Institut für Werkstoffe des Bauwesens, TU München; 2006

[WEI] Weinand Y.: *Holz-Glas-Verbund als großflächige Scheibensysteme zur Gebäudeaussteifung*; Schlussbericht 06/07 Forschungsprojekt BUWAL, EPF Lausanne; 2007

[WEL] Wellershoff F.: *Aussteifung von Gebäudehüllen durch randverklebte Glasscheiben*; Stahlbau 77, Heft 1, Ernst und Sohn Verlag, Berlin; 2008

Technische Regelwerke:

[DIN1052] Norm - DIN 1052:2004 - *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*

[EC0] Norm - ÖNORM EN 1990: 2003 - *Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung*

[EC1-1-1] Norm - ÖNORM EN 1991-1-1: 2003 - *Eurocode 1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*

[EC1-1-1b] Norm - ÖNORM B 1991-1-1: 2006 - *Eurocode 1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-1 und nationale Ergänzungen*

[EC1-1-3] Norm - ÖNORM EN 1991-1-3: 2006 - *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten*

[EC1-1-3b] Norm - ÖNORM B 1991-1-3: 2006 - *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten - Nationale Festlegungen zur ÖNORM EN 1991-1-3, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen (13 Seiten + Karte)*

[EC1-1-4] Norm - ÖNORM EN 1991-1-4: 2005 - *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten*

[EC1-1-4b] Norm - ÖNORM B 1991-1-4: 2006 - *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-4 und nationale Ergänzungen*

[EC1-1-7] Norm - ÖNORM EN 1991-1-7: 2007 – *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen*

[EC1-1-7b] Norm - ÖNORM B 1991-1-7: 2007 – *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-7*

[EC5-1-1] Norm - ÖNORM EN 1995-1-1: 2006 - *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*

[EC5-1-1b] Norm - ÖNORM B 1995-1-1: 2008 - *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau - Nationale Festlegungen, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen zur ÖNORM EN 1995-1-1*

[EC8-1] Norm - ÖNORM EN 1998-1: 2005 - *Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten*

[EC8-1b] Norm - ÖNORM B 1998-1: 2006 - *Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1998-1 und nationale Erläuterungen*

[EN594] Norm - ÖNORM EN 594: 1996 - *Holzbauwerke - Prüfverfahren - Tragfähigkeit und Steifigkeit von Wänden in Holztafelbauart (Wandscheiben)*

[EN636] Norm - ÖNORM EN 636: 2003 - *Sperrholz – Anforderungen*

[EN12152] Norm - ÖNORM EN 12152: 2002 - *Vorhangfassaden - Luftdurchlässigkeit - Leistungsanforderungen und Klassifizierung*

[EN12153] Norm - ÖNORM EN 12153: 2000 - *Vorhangfassaden - Luftdurchlässigkeit – Prüfverfahren*

[EN12154] Norm - ÖNORM EN 12154: 2000 - *Vorhangfassaden - Schlagregendichtheit - Leistungsanforderungen und Klassifizierung*

[EN12155] Norm - ÖNORM EN 12155: 2000 - *Vorhangfassaden - Schlagregendichtheit - Laborprüfung unter Aufbringung von statischem Druck*

[EN12179] Norm - DIN EN 12179:2000 - *Vorhangfassaden - Widerstand gegen Windlast – Prüfverfahren*

[EN13116] Norm - ÖNORM EN 13116: 2001 - *Vorhangfassaden - Widerstand gegen Windlast – Leistungen*

[EN13830] Norm - ÖNORM EN 13830: 2003 - *Vorhangfassaden – Produktnorm*

[HFA2] Richtlinie – *Beurteilungsgrundlage für geklebte Verglasungssysteme*; ift Rosenheim, Holzforschung Austria, Berner Fachhochschule; März 2008

[OIB1] Leitlinie - ETAG 002: *Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen, Teil 1 (Ausgabe 1998; OIB-467-018/98), Teil 2 (Ausgabe 2002, OIB-467-009/02), Teil 3 (Ausgabe 2002; OIB-467-030/03)*; Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB), Wien; 1998, 2002

[OIB2] *Leitfaden für die Berechnung von Energiekennzahlen OIB-382-010/99*; Ausgabe März 1999; Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB), Wien; 1999

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Struktur der Bearbeitung des Forschungsprojekts	37
Tabelle 2: Dauerspannungsniveaus der Kriechuntersuchungen	50
Tabelle 3: Dauerspannungsniveaus der Kriechuntersuchungen	54
Tabelle 4: Dauerspannungsniveaus der Kriechuntersuchungen	63
Tabelle 5: Dauerspannungsniveaus der Kriechuntersuchungen	66
Tabelle 6: Dauerspannungsniveaus der Kriechuntersuchungen	77
Tabelle 7: Versagenszeitpunkte der Kriechuntersuchungen	77
Tabelle 8: Dauerspannungsniveaus der Kriechuntersuchungen	80
Tabelle 9: Versagenszeitpunkte der Kriechuntersuchungen	80
Tabelle 10: Festigkeit und Steifigkeit der Kleinprüfkörper bei unterschiedlichen Einflussfaktoren des Klebstofftyps Silikon A (Fugendicke 3 mm)	87
Tabelle 11: Festigkeit und Steifigkeit der Kleinprüfkörper bei unterschiedlichen Einflussfaktoren des Klebstofftyps Silikon B (Fugendicke 6 mm)	89
Tabelle 12: Festigkeit und Steifigkeit der Kleinprüfkörper bei unterschiedlichen Einflussfaktoren des Klebstofftyps Acrylat (Fugendicke 2 mm)	90
Tabelle 13: Klassifizierung der Luftdurchlässigkeit gemäß [EN12152]	93
Tabelle 14: Klassifizierung der Schlagregendichtheit gemäß [EN12154]	94
Tabelle 15: Druckstufen zur Messung des Windwiderstands	94
Tabelle 16: Erreichte Luftdurchlässigkeitsklasse	113
Tabelle 17: Erreichte Schlagregendichtheitsklassen	116
Tabelle 18: Erreichte Luftdurchlässigkeitsklasse	127
Tabelle 19: Dichtebene zwischen Holztragstruktur und HGV	140
Tabelle 20: Eckausbildung der Koppelleiste	141
Tabelle 21: Bewertungsmatrix der Alternativmaterialien	149
Tabelle 22: Eigenspannungen im Klebstoff zufolge Temperaturänderungen	150
Tabelle 23: Eigenspannungen im Klebstoff zufolge Feuchteänderung	151
Tabelle 24: Spannungen und Verformungen im FE-Modell	180
Tabelle 25: Spannungen und Verformungen im Federmodell	183
Tabelle 26: Vergleich der beiden Rechenmodelle	184
Tabelle 27: Vergleich des FE-Modells mit den Realuntersuchungen	184
Tabelle 28: Vergleich des Federmodells mit den Realuntersuchungen	185
Tabelle 29: Auftretende Lasten der einzelnen Gebäudetypen	200
Tabelle 30: Eignung Silikonklebstoff zur Erfüllung der Gebäudeaussteifung:	201

8.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundprinzip des, von der HFA entwickelten, Holz-Glas-Verbundelements zur Gebäudeaussteifung	14
Abbildung 2: Handtucheffect bei VSG aus ESG	22
Abbildung 3: Spannungsverteilung über die Glasscheibendicke von ESG und TVG	22
Abbildung 4: Bruchbild von Floatglas, TVG und ESG	23
Abbildung 5: Einteilung nach der chemischen Basis.....	24
Abbildung 6: Einteilung nach dem Abbindemechanismus	25
Abbildung 7: Spannungsbild zweier Fügepartner mit stiftförmiger (a und b) sowie flächiger Klebeverbindung (c und d)	26
Abbildung 8: Unterschied elastische und starre Verklebung	27
Abbildung 9: Spannungsspitzen zufolge Formänderung eines Fügepartners	28
Abbildung 10: Geklebte Fensterkonstruktion (Klebstoff: grün)	29
Abbildung 11: Geklebter Parkettboden	29
Abbildung 12: Fassadenkonstruktionen Typ I - IV nach ETAG 002	30
Abbildung 13: Konstruktion nach Hamm	32
Abbildung 14: Konstruktion nach Niedermaier	34
Abbildung 15: Konstruktionsvarianten nach Edl.....	35
Abbildung 16:	38
Abbildung 17: Geometrie des Kleinprüfkörpers	38
Abbildung 18: Die drei unterschiedlichen Belastungsrichtungen an den Kleinprüfkörpern	39
Abbildung 19: Kriechuntersuchungen am Kleinprüfkörper	42
Abbildung 20: Schema zur Untersuchung der Wasserlagerung.....	43
Abbildung 21: Bruchbild der Referenzproben	59
Abbildung 22: Bruchbild nach der Wasserlagerung	59
Abbildung 23: Komponenten des HGV-Systems	92
Abbildung 24: Geometrie der Koppelleiste, Fassadenprototyp 1	96
Abbildung 25: Ansicht Fassadenprototyp 1.....	97
Abbildung 26: Detail Fassadenprototyp 1	97
Abbildung 27 – Messung der Durchbiegung unter Winddruck und –sog an 4 Messstellen ...	99
Abbildung 28 – Oberflächenkondensat am Glasrandverbund ca. 40 mm breit.....	101
Abbildung 29 – Oberflächenkondensat durch Einsatz des Heizdrahtes vermieden.....	101
Abbildung 30 – Innenliegende Oberflächentemperaturen der Glasscheibe bei -15 °C Außenklima	102
Abbildung 31 – Heizdraht-Variante 1: Lokale Erwärmung des Glasrandes, keine Konvektion im Falzraum	102

Abbildung 32 – Heizdraht-Variante 2: Indirekte Erwärmung des Glasrandes, Positionierung im Falzraum	102
Abbildung 33 – Innenliegende Oberflächentemperaturen der Glasscheibe bei -15 °C Außenklima und aktiviertem Heizdraht, Heizdraht-Variante 1	103
Abbildung 34 – Innenliegende Oberflächentemperaturen der Glasscheibe bei -15 °C Außenklima und aktiviertem Heizdraht, Heizdraht-Variante 2.....	104
Abbildung 35: Fassadenprototyp 2	106
Abbildung 36: Geometrie der Koppelleiste, Fassadenprototyp 2	107
Abbildung 37: Geometrische Anordnung der Fassadenkomponenten, Fassadenprototyp 2	109
Abbildung 38: Lokale Fehlstelle der Oberflächenbeschichtung, Koppelleiste.....	110
Abbildung 39: Aufbau Fassadenprototyp 2.....	110
Abbildung 40: Fugengeometrie Fassadenprototyp 2	111
Abbildung 41: Fassadensystemdichtung	111
Abbildung 42: Zwei Dichtungssysteme Tragstruktur / Koppelleiste	112
Abbildung 43: Geometrische Anordnung der Dichtungssysteme, Fassadenprototyp 2	112
Abbildung 44: Fassadenfuge von außen, offen	113
Abbildung 45: Fassadenfuge von außen, nassversiegelt.....	113
Abbildung 46: Fassadenprototyp 2 im Fensterprüfstand.....	114
Abbildung 47: Lokale Undichtheitsstellen unter Schlagregenbeanspruchung	116
Abbildung 48: Geometrische Anordnung der Holzfeuchtigkeitsmessstellen.....	117
Abbildung 49: Oberflächenkondensat Glasrandverbund.....	121
Abbildung 50: Quellrisse in der Dickschichtlasur	121
Abbildung 51: Ablösung des Acrylatklebstoffs im Eckbereich	124
Abbildung 52: Adhäsive Ablösung, Glas und Klebstoff	124
Abbildung 53: Ablösung des Acrylatklebstoffs im Eckbereich	124
Abbildung 54: Adhäsive Ablösung, Glas und Klebstoff	124
Abbildung 55: Lokale Undichtheiten, Ausfransung der Koppelleiste	125
Abbildung 56: Fassadenprototyp 3	126
Abbildung 57: Zweigeschoßiger Prototyp im Fassadenprüfstand	127
Abbildung 58: Prototyp 3: Klassifizierung der Luftdurchlässigkeit	128
Abbildung 59: Fassadenprototyp Forschungsgebäude.....	129
Abbildung 60: Blower Door Messung im Versuchsgebäude	129
Abbildung 61: Messung der Temperatur nahe der Klebstoffuge	137
Abbildung 62: Messung des Scheibenabsetzverhaltens sowie der Holzfeuchtigkeit.....	139
Abbildung 63: Kohäsives Versagen des Acrylatklebstoffes zwischen Glas und Klebstoffsubstrat.....	140
Abbildung 64: Einklemmen der Koppelleiste in den Richtrahmen	153
Abbildung 65: Einheben der Glasscheibe auf den Richtrahmen	153

Abbildung 66: Verfüllen der Klebefuge (hier: Acrylatklebstoff)	153
Abbildung 67: Großprüfkörper	154
Abbildung 68: Eckverbindung der P/R-Konstruktion	154
Abbildung 69: Großelementuntersuchung; Messanordnung	156
Abbildung 70: Horizontale Krafteinleitung in die HGV-Scheibe	156
Abbildung 71: Horizontale Führung der Kopfrippe	157
Abbildung 72: Globale Verschiebung: Kopfverschiebung	157
Abbildung 73: Globale Verschiebung: Abheben der Wandscheibe	158
Abbildung 74: Globale Verschiebung: Schieben der Wandscheibe	158
Abbildung 75: Lokale Verformungen: Klebstoffuge und Schrauben	159
Abbildung 76: Variation der Einflussparameter, Großversuch.....	160
Abbildung 77: Kohäsionsbruch des Silikonklebstoffs im Großversuch.....	163
Abbildung 78: Glasbruch des acrylatverklebten Prüfkörpers im Großversuch.....	169
Abbildung 79: Erarbeitung des Berechnungsmodells	170
Abbildung 80: Randbedingungen der beiden Berechnungsmodelle.....	171
Abbildung 81: FE-Modell	173
Abbildung 82: Einwirkungen und Auflagerbedingungen.....	174
Abbildung 83: FE-Netz	175
Abbildung 84: Biegung der Holzpfeiler unter Horizontalkraft.....	176
Abbildung 85: Verdrehung der Glasscheibe unter Horizontalkraft.....	176
Abbildung 86: Verformung des Klebstoffs.....	177
Abbildung 87: Schubspannungen im Klebstoff	178
Abbildung 88: Federmodell nach Kreuzinger / Niedermaier [KREU]	181
Abbildung 89: Skizze Gebäudetyp 1 - Wintergarten	193
Abbildung 90: Skizze Gebäudetyp 2 - HGV-Wand in Bungalow (starke Achse).....	194
Abbildung 91: Skizze Gebäudetyp 3 - HGV-Wand in Bungalow (schwache Achse).....	195
Abbildung 92: Gebäudetyp 4 - HGV-Wand in zweigeschoßigem Gebäude (starke Achse).196	
Abbildung 93: Gebäudetyp 5 - HGV-Wand in zweigeschoßigem Gebäude (schwache Achse)	198
Abbildung 94: Grundriss und Schnitte	204
Abbildung 95: Forschungsgebäude Holzforschung Austria.....	205
Abbildung 96: Einsetzen der HGV-Elemente in die Fertigteilwand.....	205
Abbildung 97: Umheben der fertig montierten Elementfassade	206
Abbildung 98: Skelettstruktur des Forschungsgebäudes	206
Abbildung 99: Einheben der Elementfassade	207
Abbildung 100: Fertiggestelltes Forschungsgebäude	207
Abbildung 101: Horizontalschnitt HGV / HGV-Stoß	213
Abbildung 102: Horizontalschnitt HGV / Balkontür-Stoß	213

Abbildung 103: Vertikalschnitt Sockeldetail	214
Abbildung 104: Aufbringen des Klebebands auf die Koppelleiste	214
Abbildung 105: Anbringen der Koppelleiste an der Glaskante	215
Abbildung 106: Fertig verklebte HGV-Elemente, Aushärtung	215
Abbildung 107: Modell des Bauvorhabens	216
Abbildung 108: Westansicht des Bauvorhabens, Rohbau	216
Abbildung 109: Ostansicht des Bauvorhabens, Rohbau	217
Abbildung 110: Einsetzen der HGV-Elemente auf der Baustelle.....	217
Abbildung 111: Einsetzen der HGV-Elemente auf der Baustelle.....	218
Abbildung 112: Fertige Glasfassade inklusive öffentlicher Elemente	218
Abbildung 113: HGV-Fassade von innen.....	219
Abbildung 114: Fertiggestellte Holzfassade West.....	219
Abbildung 115: Fertiggestellte Holzfassade Nord / West	220
Abbildung 116: Fertiggestellte Glasfassade Ost	220

8.4 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Beanspruchungszyklus der Ermüdungsuntersuchung	41
Diagramm 2: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Silikonklebstoff unter Zugbelastung	45
Diagramm 3: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Silikonklebstoff unter Schubbelastung längs der Klebstoffuge	46
Diagramm 4: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Silikonklebstoff unter Schubbelastung quer zur Klebstoffuge	47
Diagramm 5: Silikon A, Dauerschubbelastung der Klebstoffuge, Schub längs unter 20 °C..	51
Diagramm 6: Silikon A, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung längs der Klebstoffuge unter 20 °C	51
Diagramm 7: Silikon A, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung quer zur Klebstoffuge unter 20 °C	52
Diagramm 8: Silikon A, Dauerschubbelastung der Klebstoffuge, Schub längs unter 55 °C..	54
Diagramm 9: Silikon A, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung längs der Klebstoffuge unter 55 °C	55
Diagramm 10: Silikon A, Erhöhte Verformung zufolge Dauerlast	56
Diagramm 11: Silikon B, Dauerschubbelastung der Klebstoffuge, Schub längs unter 20 °C	64
Diagramm 12: Silikon B, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung längs der Klebstoffuge unter 20 °C	64
Diagramm 13: Silikon B, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung quer zur Klebstoffuge unter 20 °C	65
Diagramm 14: Silikon B, Dauerschubbelastung der Klebstoffuge, Schub längs unter 55 °C	66
Diagramm 15: Silikon B, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung längs der Klebstoffuge unter 55 °C	67
Diagramm 16: Silikon B, Erhöhte Verformung zufolge Dauerlast	68
Diagramm 17: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Acrylatklebstoff unter Zugbelastung	72
Diagramm 18: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Acrylatklebstoff unter Schubbelastung längs der Klebstoffuge	73
Diagramm 19: Spannungs-Dehnungsdiagramm: Acrylatklebstoff unter Schubbelastung quer zur Klebstoffuge	74
Diagramm 20: Acrylat, Dauerschubbelastung der Klebstoffuge, Schub längs unter 20 °C...	78
Diagramm 21: Acrylat, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung längs der Klebstoffuge unter 20 °C	78
Diagramm 22: Acrylat, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung quer zur Klebstoffuge	79
Diagramm 23: Acrylat, Dauerschubbelastung der Klebstoffuge, Schub längs unter 55 °C...	81
Diagramm 24: Acrylat, Enddehnung der Klebstoffuge nach 90-tägiger Schubbelastung längs der Klebstoffuge unter 55 °C	81
Diagramm 25: Acrylat, Erhöhte Verformung zufolge Dauerlast	82

Diagramm 26: Prototyp 1:Klassifizierung der Luftdurchlässigkeit, inkl. Fensterfugen.....	98
Diagramm 27: Prototyp 1:Klassifizierung der Luftdurchlässigkeit, inkl. Fensterfugen.....	98
Diagramm 28: Durchbiegung unter Windlast	100
Diagramm 29: Durchbiegung unter Windlast	100
Diagramm 30: Erhöhung der Oberflächentemperaturen d. Heizdrahteinsatz, Variante 1	103
Diagramm 31: Erhöhung der Oberflächentemperaturen d. Heizdrahteinsatz, Variante 2	105
Diagramm 32: Prototyp 2: Klassifizierung der Luftdurchlässigkeit.....	114
Diagramm 33: Klimaverlauf über Untersuchungszeitraum	118
Diagramm 34: Holzfeuchteverlauf Pfosten-Riegel-Konstruktion.....	119
Diagramm 35: Holzfeuchteverlauf Koppelleiste, HO	120
Diagramm 36: Holzfeuchteverlauf Koppelleiste HU	122
Diagramm 37: Holzfeuchteverlauf Koppelleiste V	123
Diagramm 38: Temperatur außen und innen sowie Taupunkt des Innenklimas	130
Diagramm 39: Relative Luftfeuchtigkeit außen und innen.....	131
Diagramm 40: Partialdampfdruck außen und innen.....	131
Diagramm 41: Partialdampfdruck außen und innen.....	132
Diagramm 42: Temperaturen in der Fassade (geglättet) Nord und Süd sowie Taupunkt (Innenklima)	132
Diagramm 43: Feuchtegehalt der Koppelleiste, Mittelwert	134
Diagramm 44: Feuchtegehalt der Koppelleiste, Unterschied Nord / Süd	134
Diagramm 45: Feuchtegehalt der Koppelleiste, Unterschied horizontal / vertikal.....	135
Diagramm 46: Feuchtegehalt der Koppelleiste, Unterschied Oberflächenbeschichtung	135
Diagramm 47: Temperaturverlauf Nord / Süd	137
Diagramm 48: Zeitlicher Verlauf der Setzungen der Isolierglasscheiben	138
Diagramm 49: Setzungen der Isolierglasscheiben (nach 295 Tagen).....	139
Diagramm 50: EN 594 - Kraft / Zeit-Diagramm	155
Diagramm 51: EN 594 - Kraft / Verformungs-Diagramm.....	155
Diagramm 52: Bruchlasten der silikonverklebten Wandscheibenversuche	162
Diagramm 53: Bruchlasten der gekoppelten Wandscheibenversuche	164
Diagramm 54: Bruchlasten d. Wandscheibenversuche m. geänd. Klebefugengeometrie ...	166
Diagramm 55: Bruchlasten der acrylatverklebten Wandscheibenversuche.....	167

Curriculum Vitae



Zur Person

Dipl.-Ing. Georg Neubauer

geboren: am 17. Juli 1979, in Wien
Wohnort: Scheibenbergstraße 45/1/4
1180 Wien
E-Mail: geoneu@gmx.at
Staatsbürgerschaft: Österreich
Familienstand: verheiratet

Schule / Universität

09/1985 – 06/1989 **Volksschule Klosterneuburg**

09/1989 – 06/1997 **Bundesrealgymnasium Klosterneuburg**

10/1998 – 01/2006 **Technische Universität Wien: Bauingenieurwesen**

Auslandssemester: Danmarks Tekniske Universitet 08/2002 – 02/2003

Diplomarbeit: „Untersuchungen zur Wasserdampfabgabe an vertikalen Flächen bei aufsteigender Mauerwerksfeuchtigkeit“

(Institut für Hochbau und Technologie;

Fachbereich für Bauphysik und Bauakustik)

Beruf

07/1998 – 08/1999

BEKO Software

Praktikant, mit Unterbrechungen

10/1998 – 04/2006

Architekturbüro DI Bernd Neubauer

Technischer Mitarbeiter

08/2000

Alpine Mayreder Bau GmbH / Ferro Betonit

Bautechniker

08/2002 – 09/2003

Universale Bau GmbH & Co KG

Bautechniker, mit Unterbrechungen

04/2006 – 12/2008

Holzforschung Austria

Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter

10/2008 – 01/2010

Architekturbüro DI Bernd Neubauer

Projektleiter

seit 02/2010

NHN ZT GmbH – Architekten und Ingenieure

Gesellschafter