



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria

DISSERTATION

Geklebte Holz-Glas-Fassaden - Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

o.Prof. Dipl.Dipl.-Ing. Wolfgang Winter
E259/2 Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau
Institut für Architekturwissenschaften

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Dipl.-Ing. Andreas Schleicher
Matrikelnummer: 8926255
Bellevuestraße 8, 1190 Wien

Wien, Februar 2018

Vorwort

Grundlage für diese Arbeit stellt das durch die Wiener Wirtschaftsagentur geförderte Forschungsprojekt „Holz-Glas-Verbundfassaden | Verhalten im Brandfall | Brandschutzkonzepte“, welches ich in den letzten drei Jahren in Zusammenarbeit mit der Brandrat ZT GmbH und der Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau am Institut für Architekturwissenschaften der Technischen Universität Wien durchführen konnte, dar.

Besonderer Dank ergeht an dieser Stelle an den Betreuer meiner Dissertation, Herrn o.Univ.Prof. Dipl.Dipl.-Ing. Wolfgang Winter, ohne dessen zahlreiche Gespräche mit konstruktivem Feedback und fachlichen Anregungen diese Arbeit weder begonnen noch abgeschlossen worden wäre.

Ebenfalls gebührt an dieser Stelle herzlicher Dank an Herrn Dipl.-Ing. Frank Peter, Meng, geschäftsführender Gesellschafter der Brandrat ZT GmbH, der durch sein Vertrauen in meine Person die Durchführung des zuvor angeführten Forschungsprojektes ermöglichte. Durch seine fachliche Kompetenz, zahlreiche Gespräche und Diskussionen hat er einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Bedanken möchte ich mich natürlich auch sehr herzlich bei Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kolbitsch und Herrn Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Elemer Bölcskey für die Übernahme der Begutachtung der Dissertation.

Weiters möchte ich mich beim gesamten Team des ITI für die großartige Zusammenarbeit bedanken. Vor allem bei Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alireza Fadai und Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Matthias Rinnohofer für die sehr angenehme und konstruktive Zusammenarbeit während des gemeinsamen Forschungsprojektes und die vielen interessanten fachlichen Gespräche.

In Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt sei auch die sehr gute Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Martin Haferl und Herrn Dipl.-Ing. Rene Oberhofer von Gmeiner Haferl ZT GmbH als fachlich-kompetente Ergänzung erwähnt.

Für die reibungslose Abwicklung der zahlreichen Prüfversuche bedanke ich mich sehr herzlich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich Bruckner vom Institut für Hochbau und Technologie der Technischen Universität Wien sowie bei Herrn Dipl.-Ing. Dieter Werner, MSc und Herrn Dipl. HTL-Ing. Kurt Danzinger, MSc von der Prüf- Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien sowie bei allen an der Herstellung der Prototypen beteiligten Unternehmen.

Zuletzt natürlich noch ein ganz großes Dankeschön an meine Frau Sandra und meine Söhne Nico und Jannik für ihr Verständnis und ihre Geduld während dieser Arbeit. Und an letzter Stelle natürlich auch herzlichen Dank an meine Mutter Lieselotte für ihre Unterstützung.

Kurzfassung

Schlagnworte: Holz-Glas-Verbundkonstruktionen, Fassadensysteme, Brandschutzanforderungen

Wachstum und Verdichtung im urbanen Raum erfordern die Entwicklung intelligenter und ressourcenschonender Gebäudesysteme für die "Smart Cities" der Zukunft. Fassadensysteme, die sich der innovativen Bauweise von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen (HGV) bedienen, können diesen Anforderungen gerecht werden. Gleichzeitig müssen solche Fassadenkonstruktionen aber vielfältige brandschutztechnische Aspekte erfüllen, wenn sie bei mehrgeschoßigen Gebäuden eingesetzt werden.

Das wesentliche Konstruktionsmerkmal von Holz-Glas-Verbundfassaden besteht im kraftschlüssigen Verbund zwischen der Verglasung mit einem umlaufenden Rahmenelement. Durch die Schubverklebung zwischen Glasscheibe und Rahmen kann die Glasscheibe nicht nur als raumabschließendes, sondern auch als statisch wirksames Element eingesetzt werden. Dadurch können einerseits Aussteifungselemente wie Wandscheiben oder Auskreuzungen im Bereich der Fassade entfallen und andererseits der Primärenergiebedarf gegenüber konventionellen Aluminium-Glas-Fassadenkonstruktionen um bis zu 50 % reduziert werden.

Marktreife patentierte Anwendungen von HGV-Fassaden werden von unterschiedlichen Unternehmen angeboten. Aktuelle Referenzprojekte sind in Österreich und Deutschland jedoch vorwiegend im Bereich des Fenster- und Wintergartenbaus sowie in Form von Pilotprojekten von Einfamilienhäusern zu finden.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten von geklebten Holz-Glas-Fassaden auf mehrgeschoßige Gebäude im urbanen Bereich. Besonderes Augenmerk soll dabei auf den Brandschutz gelegt werden, da es sich dabei zumeist um ein Knock-Out-Kriterium handelt. Geeignete Strategien und Lösungsansätze müssen entwickelt werden, um auch bei Anwendungen mit dieser innovativen Technologie ein adäquates Sicherheitsniveau zu gewährleisten.

Auf baurechtlicher Ebene müssen sowohl europäische als auch nationale Gesetze, Normen und Richtlinien als Beurteilungsgrundlage berücksichtigt werden. Nachdem noch keine Europäische Technische Leitlinie (ETAG) für Zulassungen von HGV-Fassadensystem vorliegt, kann die bestehende ETAG-002 für Structural-Glazing-Systeme in Anlehnung herangezogen werden. Auf nationaler Ebene stellen in Österreich die Richtlinien des Österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB) den Stand der Technik dar. Weiters sind nationale Standards hinsichtlich der Nachweisführung unterschiedlicher Fassadensysteme (z.B. Vorhangfassaden oder Doppelfassaden) in genormten Prüfanordnungen zu berücksichtigen. Die wesentlichen brandschutztechnischen Leistungsanforderungen an Fassaden von mehrgeschoßigen Gebäuden lauten wie folgt:

- Verhinderung einer Brandweiterleitung auf über dem Brandherd liegende Geschoße
- Verhinderung des Herabfallens großer Fassadenteile
- Verhinderung der Brandausbreitung über Zwischenräume bzw. Anschlussfugen und Hohlräume im Bereich von Trenndecken
- Berücksichtigung des Brandverhaltens des Fassadensystems entsprechend der Gebäudeklasse

Auf Grund der spezifischen Bauweise von HGV-Fassaden sind darüber hinaus weitere Risiken (z.B. Gebäudeaussteifung ohne Feuerwiderstand) zu beachten und gegebenenfalls Zusatzmaßnahmen zu treffen.

Im experimentellen Abschnitt dieser Arbeit werden anhand von mittleren und großmaßstäblichen Fassadenprototypen Brandversuche durchgeführt und analysiert. Durch die gewonnenen Erkenntnisse sollen genehmigungsfähige Fassadensystemen entwickelt und dadurch eine Erweiterung des Einsatzbereichs von Fassaden in Holz-Glas-Verbundbauweise im urbanen Raum ermöglicht werden.

Abstract

Keywords: Timber-glass composite, façade system, fire safety regulations

Growth and densification in urban areas require intelligent and resource-efficient building systems for "smart cities" of the future. Timber-glass composites (TGC) provide innovative façade technologies to this respect. At the same time these façades have inherit issues to fire protection, when used for large scale buildings.

Timber-glass composites consist of joint glazing-timberframe elements. They are fixed to a timber-sub-structure and connected to the structural building elements. A special benefit of this technology is, that the façade is not just used as a transparent envelope but also as a structural load-bearing element. Transparent architecture without bracing elements like walls or crossings can be realized and the primary energy demand of buildings can be reduced up to 50% by using TGC technology.

Patented and approved serial TGC façades are already offered by various companies. References can be found in Austria and Germany, but only small scale buildings like single-family-housing and wintergardens are common right now.

The main focus of this research is to provide TGC applications for multi-storey and high-rise buildings. Building regulations and standards concerning fire protection can be identified as main knock-out criteria for large scale-applications. Therefore strategies and approaches have to be developed for reducing risks and hazards when using this technology in urban agglomerations.

When using TGC façades for multi-storey and high-rise buildings both European and national regulations have to be considered. Even though there are no "European Technical Approval Guidelines" (ETAG) for TGC façade technology some aspects of ETAG 002 for SSG-Façades have to be taken into account. On the national level the Austrian building regulations and technical guidelines (OIB-Richtlinien) define specific measures concerning façades and fire protection. National standards have to be considered for testing and approval of different types of façades (e.g. single-skinned or double-skinned façade) as well.

Main fire protection issues concerning façades of large scale building applications are:

- Prevention of fire spread to storeys located above the seat of fire
- Prevention of collapsing façade elements
- Prevention of fire spread trough gaps and cavities inbetween the façade an the story ceilings
- Burning behaviour of façade systems in relation to building classes

Besides TGC façades have to comply additional aspects. Curtain-wall façades or double-skinned façades are usually designed as non-load-bearing envelopes, but when TGC façades are used as structural bracing elements fire resistance has to be taken into account.

In the experimental section of this research midsize and large scale mock ups will be built and analyzed in fire tests. Results of these tests should lead to approved façade-systems for multi-storey buildings and an extension of TGC technology in urban areas.

Inhalt

1	Einleitung.....	10
1.1	Motivation	11
1.2	Zielsetzung	11
2	Stand der Technik und Forschung geklebter Holz-Glas-Fassaden.....	13
2.1	Verbundbauweise.....	13
2.2	Komponenten von geklebten Holz-Glas-Fassaden.....	14
2.2.1	Holz	14
2.2.2	Glas.....	16
2.2.3	Klebstoffe.....	19
2.3	Kleben und Lastabtragung von Holz-Glas-Fassaden.....	22
2.3.1	Structural Sealant Glazing (SSG).....	22
2.3.2	Holz-Glas-Verbundfassaden (HGV-Fassaden).....	23
2.4	Relevante Forschungsarbeiten	25
2.4.1	Dissertationen und Forschungsberichte zum Thema Holz-Glas-Verbundkonstruktionen.....	25
2.4.2	Forschungsberichte betreffend Brandschutz und Fassaden.....	27
3	Brandschutztechnische Beurteilung von Fassaden.....	30
3.1	Begriffsbestimmung.....	30
3.1.1	Fassade und Außenwand.....	30
3.2	Fassadentypologie.....	33
3.2.1	Fassadensysteme mit Außenwand.....	34
3.2.2	Fassadensysteme mit Fensterbändern	36
3.2.3	Fassadensysteme mit Balkonplatten.....	36
3.2.4	Fassadensysteme ohne Außenwand	36
3.2.5	Sonderfassaden	39
3.3	Europäische Brandschutzanforderungen	40
3.3.1	Bauprodukteverordnung	40
3.3.2	Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen	40
3.4	Schutzziele und Prüfmethode im europäischen Kontext	41
3.5	Vergleich der Schutzziele in Österreich, Deutschland und der Schweiz.....	42
3.5.1	Übergeordnete Brandschutzanforderungen.....	42
3.5.2	Unterschiedliche Gebäudeeinstufung	42
3.5.3	Brandszenarien	43

3.5.4	Schutzziele für Außenwandverkleidungen bzw. Fassaden	44
3.5.5	Vorhangfassaden.....	45
3.5.6	Doppelfassaden	45
3.6	Leistungsanforderungen der OIB-Richtlinien an Vorhang- und Doppelfassaden in Österreich.....	47
3.6.1	Vorhangfassaden.....	48
3.6.2	Doppelfassaden	49
3.7	Brandschutztechnische Risiken von geklebten Holz-Glas-Fassaden.....	51
4	Entwurf und Evaluierung geklebter Holz-Glas-Fassadenvarianten.....	52
4.1	Fassadensystem HGV-EF 01	53
4.2	Fassadensystem HGV-EF 02.....	56
4.3	Fassadensystem HGV-DF 01	59
4.4	Fassadensystem HGV-DF 02.....	62
4.5	Evaluierung der Fassadenvarianten	65
4.5.1	Fassadensystem HGV-EF 01	66
4.5.2	Fassadensystem HGV-EF 02.....	67
4.5.3	Fassadensystem HGV-DF 01	68
4.5.4	Fassadensystem HGV-DF 02.....	69
5	Experimentelle Untersuchungen	70
5.1	Methodik	70
5.2	Versuche mit Kleinproben unter Temperaturbelastung.....	71
5.2.1	Aufbau Probekörper	71
5.2.2	Materialien der Probekörper	72
5.2.3	Anzahl der Probekörper	73
5.2.4	Herstellung der Probekörper	73
5.2.5	Versuchsaufbau und Durchführung.....	74
5.2.6	Auswertung	78
5.2.7	Zusammenfassung.....	89
5.3	Vorversuche V1a und V1b	91
5.3.1	Zielsetzung.....	91
5.3.2	Probekörper	92
5.3.3	Materialien	93
5.3.4	Herstellung und Montage	93
5.3.5	Versuchsordnung	95
5.3.6	Durchführung der Vorversuche V1a und V1b	98

5.3.7	Feststellungen nach der Prüfung.....	101
5.3.8	Auswertung der Temperaturdaten	104
5.3.9	Schlussfolgerungen.....	107
5.4	Vorversuche V2 und V3.....	108
5.4.1	Zielsetzung	108
5.4.2	Probekörper	109
5.4.3	Materialien.....	111
5.4.4	Herstellung und Montage.....	111
5.4.5	Versuchsanordnung.....	111
5.4.6	Durchführung der Vorversuche V2 und V3.....	111
5.4.7	Feststellungen nach der Prüfung.....	115
5.4.8	Auswertung der Temperaturdaten	118
5.4.9	Schlussfolgerungen.....	121
5.5	Fassadenbrandversuch P1	122
5.5.1	Zielsetzung	122
5.5.2	Probekörper	123
5.5.3	Materialien.....	125
5.5.4	Herstellung und Montage.....	125
5.5.5	Versuchsanordnung.....	127
5.5.6	Durchführung des Prüfversuchs.....	130
5.5.7	Feststellungen nach der Prüfung.....	133
5.5.8	Auswertung der Temperaturdaten	135
5.5.9	Zusammenfassende Beurteilung	137
5.6	Fassadenbrandversuch P2.....	138
5.6.1	Zielsetzung	138
5.6.2	Probekörper	139
5.6.3	Materialien.....	141
5.6.4	Herstellung und Montage.....	141
5.6.5	Versuchsanordnung.....	141
5.6.6	Durchführung des Prüfversuchs.....	144
5.6.7	Feststellungen nach der Prüfung.....	147
5.6.8	Auswertung der Temperaturdaten	149
5.6.9	Zusammenfassende Beurteilung	150
6	Vergleichende Beurteilung der durchgeführten Fassadenbrandversuche mit anderen	

Realbrandversuchen	151
6.1 Brandversuche in Lehrte	152
6.1.1 Temperaturentwicklung und Temperaturverteilung	152
6.1.2 Temperaturzeitverlauf	153
6.1.3 Flammenhöhen und -längen	154
6.1.4 Isothermenverlauf unter Windeinfluss	155
6.1.5 Geschwindigkeit und Richtung der Heißgase	156
6.1.6 Geometrie des Temperatur- und Strömungsfelds	157
6.1.7 Beeinflussung des Temperatur- und Strömungsfelds durch Fensteröffnungen	159
6.1.8 Analogieschlüsse zur Beeinflussung des Temperatur- und Strömungsfelds durch Doppelfassaden	160
6.2 Brandversuche in Merkers	162
6.2.1 Originalbrandversuche in der Prüfhalle	162
6.2.2 Naturbrandversuche	162
6.2.3 Analogieschlüsse zu den Prüfversuchen mit Holz-Glas-Fassaden	164
7 Prototypische Fassadenanwendungen für mehrgeschoßige Gebäude	165
7.1 Typ A: Modularer Holzbau mit aussteifender Fassade	168
7.1.1 Projektbeschreibung	168
7.1.2 Übersichtspläne Regelgeschoß und Schnitt	169
7.1.3 Tragkonstruktion und Bauweise	170
7.1.4 Gebäudeaussteifung mit geklebten Holz-Glas-Fassaden	170
7.1.5 Brandschutztechnische Abweichungen bei Verwendung geklebter Holz-Glas-Fassaden	171
7.1.6 Planliche Darstellung der baulichen Brandschutzmaßnahmen	172
7.2 Typ B: Revitalisierung eines Bürogebäudes	173
7.2.1 Beschreibung des Sanierungsobjektes	174
7.2.2 Bauablauf Fassadensanierung	175
7.2.3 Bauphysikalische Kennwerte der Holz-Glas-Fassade	175
7.2.4 Brandschutztechnische Aspekte der neuen Fassadenkonstruktion	176
7.2.5 Fassadendetails	177
7.2.6 Visualisierung	178
Typ C: Holzhochohaus mit Holz-Glas-Doppelfassade	178
7.2.7 Projektbeschreibung Brock Commons	178
7.2.8 Brandschutztechnische Aspekte bei der Ausführung mit einer Holz-Glas-Doppelfassade	180
7.2.9 Visualisierung	181

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

8	Zusammenfassung und Ausblick	182
9	Quellenverzeichnis	185
9.1	Literatur.....	185
9.2	Normen und Richtlinien	186
9.3	Weblinks.....	188
10	Anhang	189

1 Einleitung

Der Hochhausbrand des Grenfell-Tower im Stadtteil North Kensington von London vom 14. 06. 2017 hat durch seine verheerenden Auswirkungen mit einer Opferbilanz von 79 Toten die Bedeutung sicherheitstechnischer Aspekte, insbesondere bei großvolumigen Gebäuden und Hochhäusern, zu einem Thema von besonderem öffentlichem Interesse gemacht. Die Ergebnisse der Ermittlungen sind noch nicht abgeschlossen, es wird jedoch davon ausgegangen, dass die im Zuge einer im Jahr 2014 durchgeführten Sanierung erneuerte Fassadenkonstruktion einen wesentlichen Einfluss auf den Verlauf und das Ausmaß des Brandereignisses hatte. Es handelte sich dabei um eine hinterlüftete Fassadenkonstruktion mit einer Wärmedämmung aus Polyisocyanurate (PIR) und einer Fassadenbekleidung aus Aluminiumverbundplatten mit Polyethylen (PE)-Kern – das Brandverhalten beider Baustoffe wird, unabhängig von spezifischen Kriterien und Klassifikationen, als brennbar eingestuft. Der Hersteller der Fassadenpaneele hat im Zuge der Untersuchungen mit der Brandkatastrophe des Grenfell Tower weitere Anwendungen der gegenständlichen Fassadenbekleidung bei Hochhäusern untersagt [W1], [W8].



Abb. 1.1 (li.): Löscheinsatz beim Hochhausbrand Grenfell Tower, London [© Natalie_Oxford on Twitter - <http://p.twitter.com/jpg>]

Abb. 1.2 (re.): Detailsicht der durch den Brand zerstörten Fassadenkonstruktion [© ChiralJon - <https://flickr.com/jpg>]

Es wäre jedoch zu kurz gegriffen, die erschreckende Dimension dieses Großbrands ausschließlich mit dem offenbar ungeeigneten Brandverhalten der im Zuge der Fassadensanierung verwendeten Produkte zu begründen. Sowohl die Fluchtwegsituation als auch unzureichende anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen waren sicherlich entscheidende Ursachen dafür, dass der Löscheinsatz über 24 Stunden andauerte und eine sehr hohe Opferzahl beklagt werden musste. Es bleibt zu hoffen, dass sämtliche Ursachen dieser Katastrophe lückenlos aufgeklärt werden, um daraus die notwendigen Schlüsse zur Vermeidung weiterer Brandereignisse dieser Größenordnung ziehen zu können.

Vor diesem aktuellen Hintergrund hat die Thematik dieser Forschungsarbeit, nämlich die Untersuchung der Verwendbarkeit von geklebten Holz-Glas-Fassaden für mehrgeschoßige Gebäude, eine besondere Relevanz. Bei der im Zuge dieser Dissertation untersuchten Fassadentechnologie handelt es sich um eine innovative Bauweise, die noch nicht normativ geregelt ist und über die auf Grund der überschaubaren Anzahl von architektonischen Referenzen relativ geringe Erfahrungswerte aus der Praxis vorliegen. Dies betrifft vor allem auch Aspekte des Brandschutzes von geklebten Holz-Glas-Fassaden, die einen wesentlichen Schwerpunkt bei der Entwicklung und Beurteilung von prototypischen Lösungsansätzen für den Einsatz von geklebten Holz-Glas-Fassaden bei großvolumigen Gebäuden im Zuge dieser Arbeit darstellen.

1.1 Motivation

Städtisches Wachstum und Urbanisierung stellen aktuelle Tendenzen sowohl in internationalen Metropolen als auch in Österreich dar. In Wien nimmt das Bevölkerungswachstum in den letzten Jahren kontinuierlich zu und wird in den nächsten 25 Jahren voraussichtlich ungefähr 3 Millionen betragen. Auf Grund dieses Wachstums kommt es derzeit zu einem jährlichen Bedarf von ungefähr 10.000 neuen Wohnungen. Die Neuflächenproduktion von Büro- und Gewerbeimmobilien beträgt ein Vielfaches und weist einen Flächenzuwachs von bis zu 170.000 m² Bruttogeschoßfläche pro Jahr auf. Die Auswirkungen der zunehmenden Urbanisierung sind international in Form von Megacities in noch größeren Maßstab zu beobachten.

Die zunehmende Urbanisierung ist aber zwangsläufig auch mit einem steigenden Verbrauch von Ressourcen verbunden. Da auf Gebäude ungefähr 40% des gesamten Energieverbrauchs fallen, sind in diesem Zusammenhang besonders innovative und effiziente Maßnahmen erforderlich, um nachhaltige Lebensräume langfristig sicher zu stellen. Vor dem Hintergrund des gegenwärtigen Klimawandels sind intelligente Gebäudestrukturen und hocheffiziente haustechnische Anlagen wesentliche Bestandteile einer zukunftsweisenden Architekturplanung.

In dieser Dissertation werden geklebte Holz-Glas-Verbundkonstruktionen (HGV) - eine innovative Hybridbauweise, die in den letzten zehn Jahren kontinuierlich erforscht wurde - auf deren Eignung für Fassaden von mehrgeschoßigen Objekten und Hochhäusern untersucht. Eine besondere Qualität dieser Technologie besteht darin, dass Holz und Glas miteinander verklebt werden und die Glaselemente der Gebäudehülle dadurch zusätzlich auch lastabtragende Funktionen übernehmen können. Das Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau (ITI) der Technischen Universität Wien (TU-Wien) beschäftigt sich im Rahmen von Forschungsprojekten und Dissertationen intensiv mit dieser neuen Technologie. In den letzten Jahren wurden unter anderem Berechnungskonzepte und normreife Bemessungsvorschläge für Holz-Glas-Verbundkonstruktionen entwickelt, ein Patent angemeldet und das Langzeitverhalten von tragenden Silikonverklebungen untersucht.

Die Anforderungen, welche an geklebte Holz-Glas-Fassaden gestellt werden, sind bei Bauvorhaben im urbanen Raum sehr vielfältig und anspruchsvoll. Wichtige Themenfelder stellen die Fachbereiche Statik, Bauphysik, sowie Fertigung und Montage dar. Besonderes Augenmerk richtet sich vermehrt auf Aspekte der Ressourceneinsparung und Energieeffizienz durch die Verwendung von HGV-Fassaden – dies ist bei einer Vielzahl von Bauvorhaben im Zusammenhang mit Gebäudezertifizierungen von wachsender Bedeutung. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass der Primärenergiebedarf von ungefähr 400 kW/m² bei Verwendung von Aluminium-Glas-Fassaden durch die Ausführung einer Fassade in Holz-Glas-Verbundbauweise um ungefähr 50% reduziert werden kann.

Trotz der Vielzahl positiver Aspekte dieser innovativen Technologie sind Realisierungen mit Holz-Glas-Verbundkonstruktionen derzeit vorwiegend im kleinmaßstäblichen Bereich oder in Verbindung mit Forschungsarbeiten zu finden. Durch diese Forschungsarbeit soll nachgewiesen werden, dass das höhere Sicherheitsniveau bei mehrgeschoßigen Gebäuden auch mit Fassaden in Holz-Glas-Verbundbauweise gewährleistet werden kann, was zu einer größeren Verbreitung in zukünftigen Architekturprojekten und zur Erhöhung des Marktanteils der Holz-Glas-Verbundbauweise führen soll.

1.2 Zielsetzung

Mit dieser Dissertation soll die Erweiterung des Anwendungsbereichs von geklebten Holz-Glas-Fassaden auf großvolumige Bauvorhaben empirisch nachgewiesen werden. Besonderes Augenmerk wird dabei auf das höhere Sicherheitsniveau von mittleren und hohen Gebäuden, vor allem hinsichtlich der Erfüllung gegenwärtiger brandschutztechnischer Standards, gelegt.

Arbeitsgrundlage bildet dabei eine Analyse des aktuellen Stands der Technik und Forschung von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen, welche in Form einer kompakten Übersicht dargestellt wird. In diesem Zusammenhang erfolgt auch eine Literaturlauswertung relevanter Dissertationen und Forschungsprojekte zu den Themen Holz-Glas-Verbundkonstruktionen sowie Brandschutz und Fassaden. Weiters werden aktuelle Verordnungen und Richtlinien zu den Brandschutzanforderungen von Fassaden mehrgeschoßiger Gebäude angeführt und unterschiedliche brandschutztechnische Schutzziele in Österreich, Deutschland und der Schweiz diskutiert.

Im experimentellen Teil werden zur Grundlagenermittlung Kleinproben mit unterschiedlichen Klebstoffen für den Holz-Glas-Verbund untersucht. Die Probekörper werden dabei auf Temperaturstufen bis 200 °C erhitzt und danach in der Prüfmaschine in Druckversuchen bis zum Versagen belastet, um die in den Klebeverbindungen auftretenden Scherspannungen festzustellen. Die Auswertung der Messdaten der verschiedenen Klebstoffserien bilden die Grundlagen für die nachfolgenden Brandversuche mit mittleren und großformatigen Prüffassaden.

Vor Durchführung dieser Versuchsreihen werden konstruktive Lösungsansätze für unterschiedliche Fassadenvarianten mit geklebten Holz-Glas-Fassaden entwickelt und evaluiert. Die Realisierung der Prototypen und der Fassadenprüfversuche erfolgte im Rahmen des kooperativen Forschungsprojekts „Holz-Glas-Verbundfassaden | Verhalten im Brandfall | Brandschutzkonzepte“ unter der Leitung des Autors in Zusammenarbeit mit der Brandrat ZT GmbH und dem Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau der Technischen Universität Wien [1].

In den Prüfversuchen, die in der Prüfhalle der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien (MA 39) durchgeführt werden, sollen folgende Schutzziele nachgewiesen werden:

- wirksame Einschränkung einer Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoß
- Verhinderung der Brandweiterleitung im Zwischenraum von Doppelfassaden
- wirksame Einschränkung des Herabfallens großer Fassadenteile
- keine Gefährdung von flüchtenden Personen und Rettungsmannschaften
- Begrenzung der vertikalen Brandausbreitung mittels deckenübergreifendem Außenwandsteifen mit einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten

Die Nachweise werden mittels normierter Prüfversuche durchgeführt und durch die Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien in Form von Prüf- und Laborberichten beurteilt. In der weiteren Analyse und Auswertung der Messdaten erfolgt auch eine vergleichende Beurteilung mit Erkenntnissen aus anderen Naturbrandversuchen, um die Ergebnisse aus den Prüfversuchen auf Plausibilität zu überprüfen.

Abschließend werden anhand von exemplarischen Gebäuden, welche auf Grund des Tragsystems und der Fassade für die Anwendung von Holz-Glas-Verbundfassaden geeignet sind, prototypische Anwendungen aufgezeigt und ein Ausblick auf weitere Forschungsbereiche gegeben.

2 Stand der Technik und Forschung geklebter Holz-Glas-Fassaden

2.1 Verbundbauweise

Architekturgeschichtlich betrachtet hat die Verbundbauweise eine lange Tradition. So beispielsweise auch bei Gebäuden in Lehmbauweise, deren Lehmziegel durch die Kombination mit Stroh über bessere bauphysikalische und statische Eigenschaften erreichten, wodurch langlebigere und größere Bauwerke möglich wurden (z.B. Lehmmoscheen in Timbuktu/Mali, Pueblo-Bauten in Amerika) errichtet werden konnten. Ein für die moderne Architektur sehr bedeutender Meilenstein wurde aber durch den Gärtner Joseph Monier im 19. Jahrhundert gesetzt, als dieser durch die Verstärkung von Pflanzgefäßen aus Zementmörtel mit zusätzlichen Eiseneinlagen die Grundlage für die Entstehung der heute bekanntesten Verbundbauweise, dem Stahlbetonbau, lieferte.

Vielfältige Anwendungen des Verbundbaus sind aber auch im Fahrzeug- und Flugzeugbau allgegenwärtig, wenn möglichst leistungsfähige Geometrien bei gleichzeitiger Gewichtsminimierung hohe Priorität haben.



Abb. 2.1 (li.): Lehmziegel mit Steheinlagen [<http://www.payer.de>, 09.09.2017]



Abb. 2.2 (re.): Holz-Glas-Verbund-Element [Fotografie des Autors bei Glasstec 2014, Düsseldorf]

Wie bei den zuvor angeführten Beispielen steckt das Prinzip einer symbiotischen Verbindung unterschiedlicher Materialien auch hinter der Entwicklung der Holz-Glas-Verbundbauweise, wie das folgende Statement von Professor Wolfgang Winter beim 5. Europäischen Kongress für effizientes Bauen mit Holz 2012 deutlich macht [34]:

„Innovationen im Bereich der Klebtechnik ermöglichen es heute, Holz-Glas-Verbundkonstruktionen im konstruktiven Ingenieurbau anzuwenden. Der Fügepartner Glas kann aufgrund seiner sehr guten Materialeigenschaften über die vorteilhaften transparenten und bauphysikalischen Möglichkeiten hinaus gut als tragendes Element genutzt werden. Um das große Potenzial von Gläsern in Verbundscheiben, -trägern oder -platten ausschöpfen zu können, bedarf es eines gleichmäßigen Lasteintrags über Verbindungsmittel, deren Härte unter jenem von Glas angesiedelt sein muss. Diesen Vorstellungen genügen speziell elastische Klebstoffe, welche nebst genannten Anforderungen auch zahlreiche weitere Vorteile mit sich bringen: Die Übernahme von Dichtungsfunktionen etwa oder die Kompensation thermischer Differenzbewegungen, welchen insbesondere im Fassadenbau besondere Bedeutung zukommt. Die Verwendung steifer Klebstoffe hingegen bietet sich speziell bei größeren Laststufen an. [...]

Der Fügepartner Holz – bei Scheiben und Trägern als Koppelrahmen und Unterkonstruktion, bei Platten als Rippe – weist in Belangen der Thermodynamik wohl die größten Vorteile für Verbundkonstruktionen mit Glas auf. Diesem Vorteil steht jedoch der große Nachteil des geringen Aussteifungspotentials, das Leichtbaustoffe wie Holz aufweisen, gegenüber. Adäquat begegnet werden kann dieser Problematik mit eingeklebten Glasscheiben, welche dann im Verbund mit Holz zur Aussteifung von Gebäuden oder zur vertikalen Lastabtragung in Form von Holz-Glas-Verbundträgern herangezogen werden können.“

2.2 Komponenten von geklebten Holz-Glas-Fassaden

2.2.1 Holz

Unter dem Begriff Holz wird im allgemeinen Sprachgebrauch das harte Gewebe der Sprossachsen (Stamm, Äste und Zweige) von Bäumen und Sträuchern verstanden. Holz setzt sich zum größten Teil aus den Elementen Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff zusammen. Die verholzte Zellwand enthält die Gerüstsubstanzen Zellulose, Hemicellulosen und Lignin sowie in geringem Umfang sogenannte Extraktstoffe. Eine grundsätzliche Unterscheidung erfolgt zwischen Laub- und Nadelhölzern, welche sich sowohl im Aufbau der Zellstruktur als auch im Verhältnis von deren Bestandteilen unterscheiden. [W9]

Der Zellaufbau von Nadelholz ist, nachdem es sich auch um die ältere Holzart handelt, einfacher als bei Laubhölzern strukturiert. Es besteht überwiegend aus Tracheiden, einem Zelltyp; der in Stammlängsrichtung verläuft, und sowohl für den Wasser- und Stofftransport als auch für die Festigkeit benötigt wird. Wichtige Nadelholzarten in unseren Breitengraden sind zum Beispiel Fichte, Tanne, Kiefer und Lärche.

Im Gegensatz zu Nadelhölzern verfügen Laubhölzer über zusätzliche Holzfasern, die der Festigung des Gewebes dienen. Das im Unterschied zu Nadelhölzern wesentlich differenziertere Laubholzgewebe kann in drei funktionale Gruppen eingeteilt werden: Leit-, Festigungs- und Speichergewebe. Je nach Anordnung der Tracheen unterscheidet man zwischen ringporigen, halbringporigen und zerstreutporigen Hölzern. Wesentliche heimische Laubholzarten sind unter anderem Birke, Buche, Esche und Eiche.

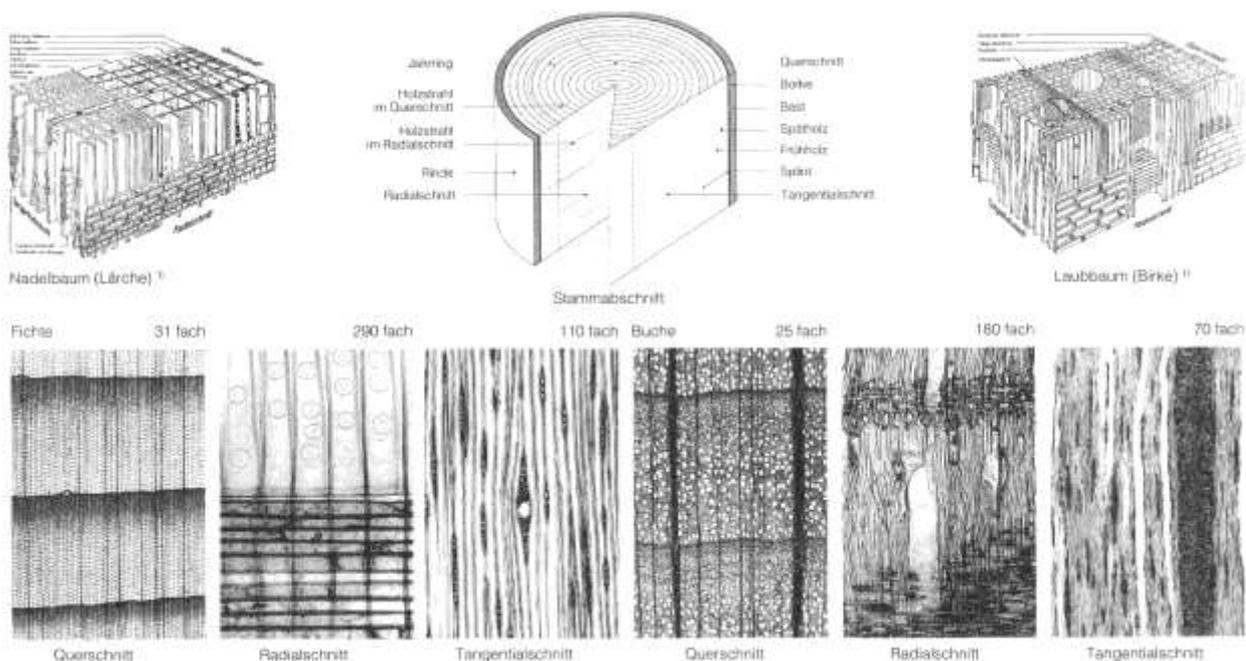


Abb. 2.3: Zellaufbau von Nadel- und Laubholz [24]

Neben der Anordnung der Zellarten sowie der im Stamm radial verlaufenden Holzstrahlzellen stellt die konzentrische Jahresringabfolge ein wesentliches Strukturmerkmal dar. Die Jahresringe entstehen durch die jährliche Abfolge von großporigem, dünnwandigen Holzgewebe im Frühjahr und dichterem Holzgewebe im Herbst und sind bei Nadelhölzern deutlicher zu erkennen als bei Laubhölzern. [24]

2.2.1.1 Wichtige Holzeigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften von Holz unterscheiden sich nicht nur auf Grund verschiedener Gattungen, sondern sind, da es sich um ein Naturprodukt handelt, auch durch den Standort und die Beschaffenheit jedes einzelnen Baumes beeinflusst. Sämtliche Holzarten weisen jedoch übergeordnete Gemeinsamkeiten auf, nämlich, dass sie ein poröses, inhomogenes und anisotropes Gefüge aus Zellwänden und Zellhohlräumen aufweisen. Bautechnisch relevante Eigenschaften kann man folgendermaßen zusammenfassen:

- Leichtbaustoff mit einer Rohdichte von 100 kg/m^3 (Balsa) bis 1.200 kg/m^3 (Pockholz)
- günstiges Verhältnis zwischen Festigkeit und Eigengewicht, aber geringes Aussteifungspotential
- gute händische und maschinelle Bearbeitbarkeit sowie einfacher Transport, Auf- und Abbau
- Holzfeuchtigkeit auf Grund der hygroskopischen Eigenschaften des Holzes und damit zusammenhängendes Quellen und Schwinden
- Viskoelastizität (plastische Verformung unter langanhaltender Lasteinwirkung)
- geringe Wärmeleitfähigkeit ($0,1$ bis $0,2 \text{ W/mK}$) und sehr gute baubiologische Eigenschaften
- Widerstandsfähig gegen chemische Einflüsse
- Brennbarkeit, jedoch sehr gut prognostizierbares Brandverhalten (Versagenszeitpunkt und Abbrand berechenbar, Brandverhalten abhängig von Holzart, Verkohlung als Schutzschicht)
- CO_2 -neutral und rezyklierbar
- positive Ökobilanz mit geringen Umweltauswirkungen in Verbindung mit nachhaltiger Forstwirtschaft

2.2.1.2 Relevante Holzwerkstoffe für den Holz-Glas-Verbund

Unter dem Begriff Holzwerkstoffe werden zumeist plattenförmige Holzprodukte verstanden, die durch Beileimung und Verpressung von Holzelementen wie z.B. Furnieren, Leisten, Stäben oder Spänen entstehen. Zum Teil können im Bauwesen ungünstige Eigenschaften, die aus der Inhomogenität und Anisotropie des Baustoffes Holz resultieren, durch die veränderte Struktur der Holzwerkstoffe weitgehend eliminiert werden. Je nach Aufbau und Verwendungszweck findet man eine Vielzahl unterschiedlichster Plattenarten vor. Es werden hier jedoch nur die im Zuge dieser Arbeit relevanten Holzwerkstoffe angeführt.

Furniersperrholz (BFU)

Platten aus Furniersperrholz werden aus getrockneten Schäl furnieren, die beleimt und miteinander verpresst werden, erzeugt. Sie weisen einen symmetrischen Aufbau aus einer ungeraden Anzahl von Furnierlagen, deren Faserrichtung jeweils um 90° gedreht angeordnet wird, auf.

Die Koppelrahmen für den Holz-Glas-Verbund werden gemäß der Bauart der Holzforschung Austria (HFA) in Birkenfurniersperrholz (BFU 100) ausgeführt. Für die Prüffassaden im Zuge dieser Arbeit wurden die Koppelrahmen ebenfalls aus BFU 100 gefertigt.

Furnierschichtholz (FSH)

Furnierschichtholz wird so wie Furniersperrholz aus Schäl furnieren, welche jedoch eine Schichtdicke von 2 bis 4 mm aufweisen und vorwiegend parallel zur Längsrichtung des Werkstoffs, ausgeführt. Ein Teil der

Furniere wird aber auch in Querrichtung orientiert. Furnierschichthölzer kommen oftmals als Träger- oder Rahmenprofile zum Einsatz. In der Regel werden Nadelhölzer (z.B. Kerto) für die Verleimung eingesetzt. Für hochleistungsfähige konstruktive Bauteile werden vermehrt auch Furniere aus Buchenhölzern (BuFSH, BauBuche) eingesetzt. [15]

Die Rahmenprofile der in dieser Arbeit entwickelten Doppelfassade wurden ebenfalls in Buchen-Furnierschichtholz konzipiert.

Brettschichtholz (BSH)

Brettschichtholz entsteht durch die Verleimung von getrockneten Brettern, die in den Stoßbereichen mit einer Keilzinkung verbunden sind. Je nach Einsatzbereich werden zur Verleimung Harnstoffharze, Resorcinharze oder Epoxidharze verwendet. Für die Bretter kommt überwiegend Fichtenholz zur Anwendung. Wie bei Furnierschichtholz werden aber auch Laubhölzer zu Brettschichtholz (BuBSH, BauBuche) verarbeitet, wenn höhere konstruktive Anforderungen gestellt werden.

In dieser Arbeit wurden die Rahmenprofile der Prüffassaden aus Fichten-Brettschichtholz (BSH GI 24h) hergestellt.

2.2.2 Glas

Glas kann man auch als eine nicht kristallin erstarrte Flüssigkeit bezeichnen. Eine der wesentlichen Eigenschaften von Glas, nämlich seine Transparenz, lässt sich auf die amorphe Struktur und das Fehlen von Kristallgittern zurückführen. Im Unterschied zu vielen anderen Kristallen weist Glas eine amorphe Isotropie (richtungsunabhängige Eigenschaften) auf.

Glas besteht aus verschiedenen zusammengesetzten Verbindungen, weswegen es nicht durch eine chemische Formel beschrieben werden kann. Das am häufigsten im Bauwesen eingesetzte Glas ist Kalk-Natron-Glas. Der Hauptbestandteil (69 bis 74%) von Kalk-Natron-Glas besteht aus Siliciumdioxid (SiO_2) sowie aus Kalziumoxid (CaO), Natriumoxid (Na_2O) und geringen Mengen weiterer Oxide. [32]

Die Herstellungsverfahren haben sich im Laufe der Entwicklung seit der Entdeckung durch die Mesopotamier vor ca. 5000 Jahren sehr stark differenziert. Grundsätzlich werden bei der Glasherstellung die Rohstoffe so lange erhitzt, bis eine zähflüssige Masse entsteht, welche anschließend durch Abkühlen wieder erstarrt. Das von Pilkington im Jahr 1959 entwickelte Floatverfahren wird gegenwärtig für die Produktion von ca. 95 % des gesamten Flachglases angewendet. Dabei wird das Glasgemenge in der ersten Kammer auf ca. 1600 °C erhitzt und schwimmt anschließend in einer weiteren Kammer auf flüssigen Zinn (1000 bis 600 °C), bis es in der letzten Kammer kontinuierlich abgekühlt und weiterverarbeitet wird.

2.2.2.1 Wichtige Eigenschaften von Glas

Die Eigenschaften von Glas können allgemein als transparent, transluzent, glänzend, glatt und spröde beschrieben werden. In Abhängigkeit von der jeweiligen Glasart bzw. der weiteren Verarbeitung gibt es eine Vielzahl weiterer Qualitäten mit spezifischen Eigenschaften für den jeweiligen Anwendungsbereich.

Wichtige physikalische Eigenschaften von Kalk-Natron-Glas sind:

- Dichte: 2.500 kg/m^3
- Härte: 6 Einheiten nach Mohs Skala
- Elastizitätsmodul: 70.000 Pa
- Poisson'sche Zahl: 0,2

- Wärmeleitfähigkeit: 1W/mK
- mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient: $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- hohe Druckfestigkeit, geringe Zugfestigkeit

2.2.2.2 Relevante Glasarten für den Holz-Glas-Verbund

Gläser können durch unterschiedliche Verfahren weiterverarbeitet, beschichtet und veredelt werden. An dieser Stelle wird ein Überblick über die mit dieser Arbeit im Zusammenhang stehenden Glasprodukte und deren wichtigsten Charakteristika gegeben.

Floatglas

Floatglas ist die im Bauwesen am häufigsten eingesetzte Glasart. Die industrielle Fertigung im Floatverfahren ermöglicht eine sehr ökonomische Herstellung von großen Mengen. Floatglas kann je nach Auswahl der Rohstoffe als transparentes oder als extraweißes Glas hergestellt werden – auch eine Einfärbung ist im Zuge des Herstellungsprozesses möglich.

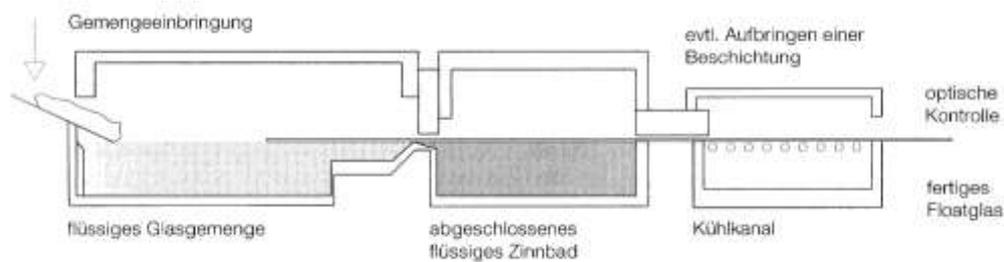


Abb. 2.4: Floatglasverfahren [32]

Wesentliche Eigenschaften von Floatglas sind:

- Biegezugfestigkeit: ca. 45 N/mm²
- Temperaturwechselbeständigkeit: 30 bis 40 K
- Bruchbild: große Bruchstücke mit spitzen Splintern

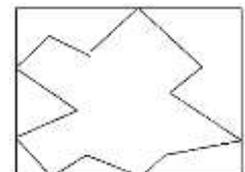


Abb. 2.5: Bruchbild Floatglas [32]

Einscheibensicherheitsglas (ESG)

Thermisch vorgespanntes Glas wird auch als Einscheibensicherheitsglas bezeichnet. Bei der Herstellung von Einscheibensicherheitsglas wird eine ebene Glasscheibe bis zum Transformationspunkt (mind. 640 °C) erhitzt und anschließend schlagartig mit kalter Luft abgekühlt. Durch das schnellere Abkühlen der Glasoberflächen gegenüber dem Glasinneren entstehen an den Glasoberflächen Druckspannungen. Auf Grund dieser Vorspannung kann Einscheibensicherheitsglas deutlich höhere Belastungen als Floatglas aufnehmen.

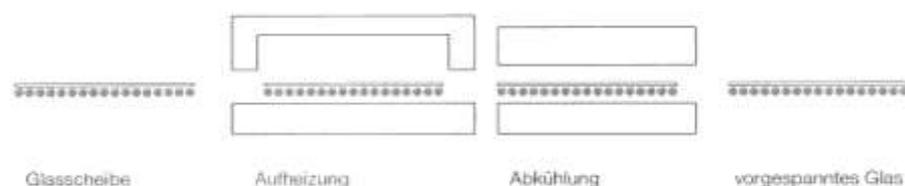


Abb. 2.6: Thermische Vorspannung von Gläsern [32]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

Wesentliche Eigenschaften von Einscheibensicherheitsglas sind:

- Biegezugfestigkeit: ca. 120 N/mm²
- Temperaturwechselbeständigkeit: ca. 200 K
- Bruchbild: kleine Krümel

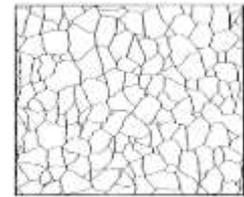


Abb. 2.7: Bruchbild ESG [32]

Verbundsicherheitsglas (VSG)

Verbundsicherheitsglas wird aus mindestens zwei Scheiben, die mit einer elastischen Zwischenschicht fest verbunden sind, hergestellt. Im Bauwesen werden überwiegend Verbundsicherheitsgläser mit einer Zwischenschicht aus Polyvinyl-Butyral-Folie (PVB) eingesetzt – die Produktion dieser Gläser erfolgt unter Druck und Wärme in sogenannten Autoklaven.

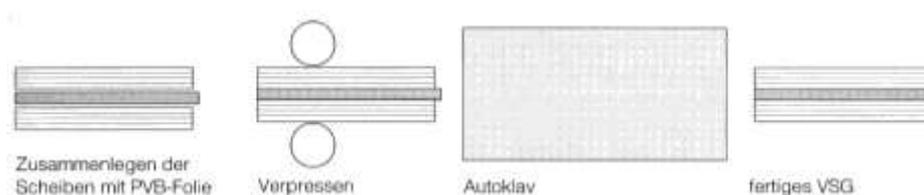


Abb. 2.8: Herstellung von VSG in Autoklaven [32]

Die Eigenschaften von Verbundsicherheitsgläsern können durch Art und Anzahl der Scheiben sowie durch spezielle Zwischenschichten an die unterschiedlichsten Anforderungen angepasst werden. Auf Grund der hohen Belastbarkeit können z.B. begehbare oder durchschusshemmende Verglasungen aus Verbundsicherheitsglas hergestellt werden.

Bei den Fassadenprüfversuchen in dieser Arbeit wurden Verbundsicherheitsgläser mit einem Aufbau aus zwei Scheiben aus Floatglas und einer Zwischenschicht aus Ethylenvinylacetatfolie (EVA) eingesetzt.

Mehrscheiben-Isolierglas (MIG)

Isoliergläser bestehen wie Verbundsicherheitsgläser aus mindestens zwei Scheiben, wobei diese jedoch durch einen Abstandhalter am Rand voneinander getrennt sind. Im Bereich des Randverbunds werden zu meist zwei Dichtebenen, welche einerseits den Scheibenzwischenraum vor Feuchtigkeit schützen und andererseits die Scheiben zusammenhalten, ausgeführt. Durch den hermetisch abgeschlossenen Scheibenzwischenraum wird der Wärmedurchgangskoeffizient gegenüber Einscheibenverglasung wesentlich verbessert und liegt je nach Aufbau und Füllung des Zwischenraums bei 1,4 bis 0,5 Wm²K.

Isolierverglasungen in unterschiedlicher Ausbildung wurden auch im Zuge der Entwicklung unterschiedlicher Holz-Glas-Fassadenvarianten in dieser Arbeit projektiert.

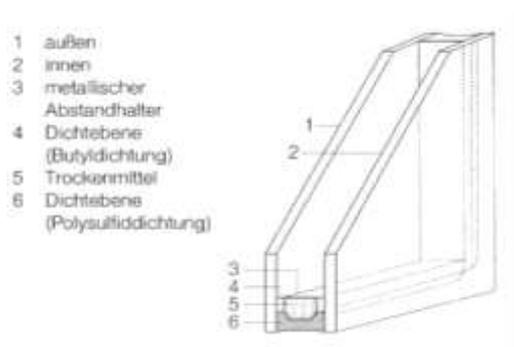


Abb. 2.9: Bestandteile einer Mehrscheiben-Isolierverglasung [32]

2.2.3 Klebstoffe

Unter dem Begriff Klebstoff wird ein Werkstoff verstanden, der auf Grund von Flächenhaftung und innerer Festigkeit zur Verbindung von Fügeteilen geeignet ist. Obwohl es auch Klebstoffe auf Basis anorganischer Verbindungen wie Wasserglas oder Produkte auf Basis von Zement gibt, handelt es sich bei der überwiegenden Mehrzahl der heute eingesetzten Klebstoffe um organische Verbindungen.

Klebeverbindungen stellen gegenwärtig einen unverzichtbaren Bestandteil für eine Vielzahl moderner industrieller Anwendungen dar – man denke zum Beispiel an Verklebungen von Verglasungen im Automobilbau, an geklebte Glasfassaden oder an Displays von Mobiltelefonen. Und dennoch handelt es sich bei dieser Füge-technik um eine der ältesten Verbindungsarten seit der Entstehung der ersten Menschen. So verwendeten schon der Neandertaler und der Homo sapiens das Birkenpech, welches durch Trockendestillation aus Birkenrinde gewonnen wurde, zur Herstellung von Waffen und Werkzeugen. [W10]

In der Füge-technik wird zwischen drei verschiedenen Verbindungsmethoden unterschieden:

- Kraftschluss (z.B. Schrauben, Nieten)
- Formschluss (z.B. Nut-Feder-Verbindung)
- Stoffschluss (z.B. Schweißen, Kleben)

Bei einer stoffschlüssigen Klebeverbindung werden die Fügepartner durch Atom- und Molekularkräfte des Klebstoffs miteinander verbunden. Eine Lösung dieser Verbindung geht, wie bei allen stoffschlüssigen Verbindungen, immer mit einer Zerstörung des Verbindungsmittels einher. Ein weiterer Nachteil liegt auch in der zumeist längeren Härtezeit verschiedener Klebstoffe, in der erforderlichen Oberflächenvorbehandlung, in einer oftmals geringen Beständigkeit gegen UV-Strahlung sowie in einer geringen Wärme- und Formbeständigkeit (insbesondere unter ständigen Lasten). Die Vorteile der Klebetechnik, wie das Vermeiden von Querschnittsschwächungen der Füge-teile, ein gleichmäßiger Lasteintrag, eine geringe thermische Beanspruchung der Verbindungsteile und eine hohe Dichtigkeit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen, überwiegen jedoch zumeist und machen die Klebetechnik zu einer adäquaten technischen Lösung für viele Bereiche der zuvor anführten Technologiesparten.

2.2.3.1 Einteilung von Klebstoffen

Eine Systematisierung der äußerst vielfältigen Klebstoffarten kann entweder auf Grund der chemischen Basis oder nach der Art des Verfestigungsmechanismus erfolgen.

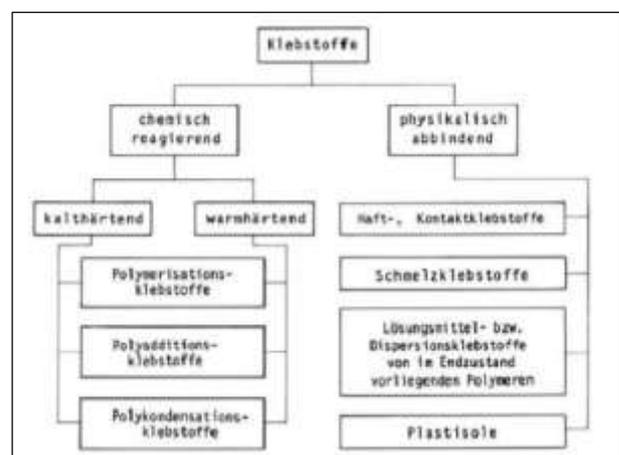
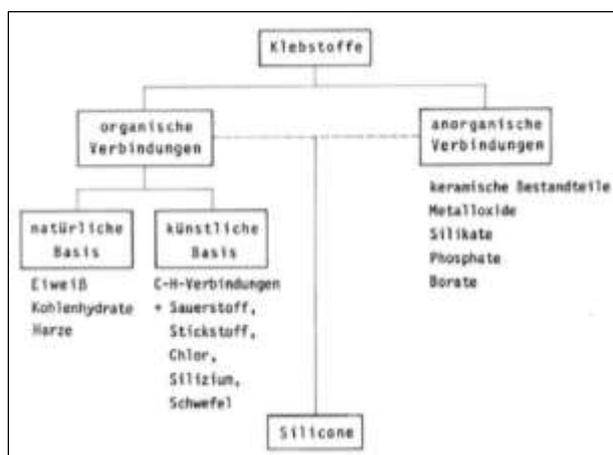


Abb. 2.10 (li.): Einteilung der Klebstoffe nach chemischer Basis [Habenicht, G.: Kleben: Grundlage, Technologien Anwendungen, 1990]
 Abb. 2.11 (re.): Einteilung der Klebstoffe nach dem Verfestigungsmechanismus [Habenicht, G.: Kleben: Grundlage, Technologien Anwendungen, 1990]

Einteilung der Klebstoffe nach der chemischen Basis

Gemäß der folgenden Abbildung wird zwischen organischen und anorganischen Klebstoffen unterschieden. Organische Verbindungen stellen dabei die deutlich größere Gruppe von Klebeverbindungen dar. Eine Sonderstellung in dieser Systematik nehmen die Silikonklebstoffe ein, die sowohl organische als auch anorganische Charakteristika aufweisen.

Einteilung der Klebstoffe nach dem Verfestigungsmechanismus

Anhand des Verfestigungs- oder Abbindemechanismus unterscheidet man zwischen physikalisch abbindenden und chemisch härtenden Klebstoffen. Eine Mischform in dieser Systematik nehmen Klebstoffe ohne Verfestigungsmechanismus (z.B. Haftklebstoffe) ein.

2.2.3.2 Relevante Klebstoffe für den Holz-Glas-Verbund

Unabhängig von den spezifischen Produkteigenschaften von Klebstoffen stellt das Verhältnis zwischen Spannung und Verformung der Klebeverbindung ein wichtiges Kriterium für Holz-Glas-Verbundkonstruktionen dar. Das folgende Diagramm zeigt eine Übersicht von Klebstoffen, welche im Zuge von Forschungsprojekte der Holzforschung Austria zum Thema Holz-Glas-Verbund untersucht wurden. [3], [26]

[MPa]

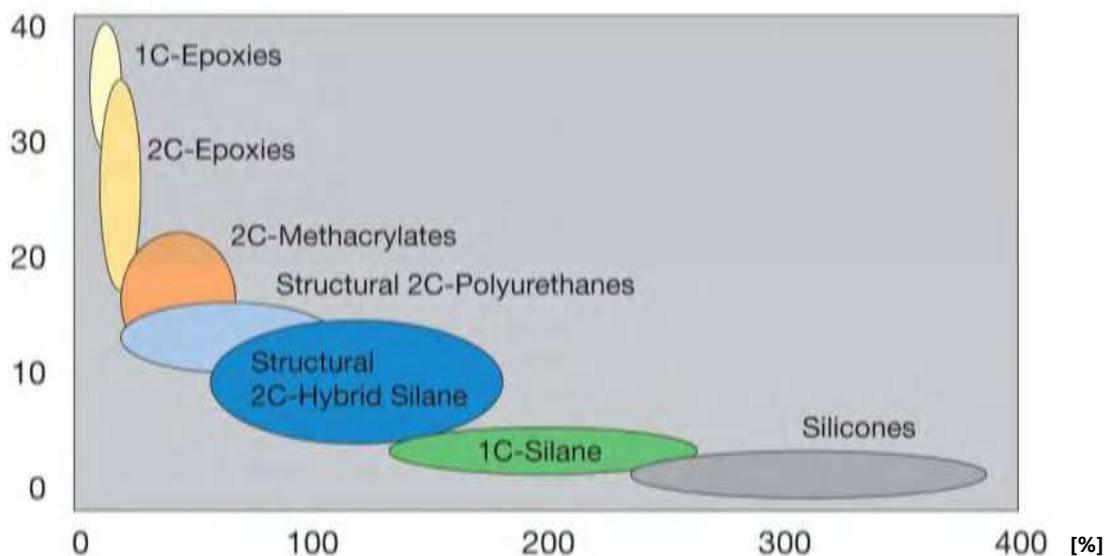


Abb. 2.12: Spannungs-Verformungs-Diagramm unterschiedlicher Klebstoffe [26]

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Klebstoffarten und deren vielfältiger Merkmale und Eigenschaften wird in weiterer Folge nur auf jene Klebstoffe, die im Zuge dieser Arbeit zur Anwendung kamen, näher eingegangen.

Silikonklebstoffe

Silikone, chemisch genauer Poly(organo)siloxane, ist eine Bezeichnung für eine Gruppe synthetischer Polymere, bei denen Siliciumatome über Sauerstoffatome verknüpft sind. Aufgrund ihres typisch anorganischen Gerüsts einerseits und der organischen Reste andererseits nehmen Silikone eine Zwischenstellung zwischen anorganischen und organischen Verbindungen ein. Sie sind in gewisser Weise Hybride und weisen ein einzigartiges Eigenschaftsspektrum auf, das von keinem anderen Kunststoff erreicht wird. [W11]

Systematisierung:

- höhermolekulare Verbindungen (Si und O)
- 1-K-Systeme vernetzen durch Luftfeuchtigkeit
- 2-K-Systeme vernetzen durch Zugabe von Härtern

Wesentliche Eigenschaften für den Holz-Glas-Verbund:

- gutes Haftvermögen auf Glas und Holz
- hohe Elastizität
- gute Witterungsbeständigkeit und chemische Beständigkeit
- geringe Festigkeit
- Kriechverhalten

Acrylatklebstoffe

Acrylharze sind Kunstharze und gelten als besonders haltbar. Acrylharze basieren auf Polymerisaten oder Copolymerisaten der Acrylsäure, Methacrylsäure und deren Estern. Acrylharze werden in vielen Klebstoffen und Lacken verwendet. Ein Anwendungszweck ist auch die Gebäudeabdichtung. Generell besitzen Acrylharze ein sehr breites Anwendungsspektrum in der Lackindustrie. Acrylharze sind, einmal ausgehärtet, dauerhaft haltbar und fest, sie haben eine gute Optik, guten Glanz und hohe Bewitterungsbeständigkeit. [W5]

Systematisierung:

- polymerisierte Acrylestermonomere, oft mit Kunstharzbeimischungen
- 1-K-Systeme vernetzen durch Auftragen auf die Füge-teile
- 2-K-Systeme vernetzen durch Zugabe von Härtern

Wesentliche Eigenschaften für den Holz-Glas-Verbund:

- hohe Festigkeit
- eingeschränkte Elastizität
- sensibel gegenüber UV-Strahlung
- kurze offene Zeit

Epoxidklebstoffe

Epoxidharze sind Kunstharze, die mit einem Härter und gegebenenfalls mit Zusatzstoffen zu einem duroplastischen Kunststoff umgesetzt werden können. Die durch Vernetzung erzeugten Duroplaste besitzen gute mechanische Eigenschaften sowie eine gute Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit. Sie gelten daher als hochwertige, aber auch teure Kunststoffe. Sie werden u.a. als Reaktions- und Einbrennlacke, Klebstoffe für Lamine, als Einbettmittel in der Metallographie und als Formmassen für Komponenten in der Elektrotechnik und Elektronik verwendet. [W6]

Systematisierung:

- Reaktionsharze
- 2-K-Systeme vernetzen durch Zugabe von Härtern

Wesentliche Eigenschaften für den Holz-Glas-Verbund:

- sehr hohe Festigkeit
- sehr spröde
- sensibel gegenüber UV-Strahlung

2.3 Kleben und Lastabtragung von Holz-Glas-Fassaden

Im Glasbau werden unterschiedliche Verfahren der Klebtechnik eingesetzt. Anfangs wurde Glaszement als Klebstoff für kraftschlüssige Verbindungen verwendet. In weiterer Folge wurde das Verfahren des Randverbunds mittels elastischer Verklebung entwickelt, welches im Grunde nach wie vor für die Herstellung von Isoliergläsern angewendet wird. Ein weiteres Verfahren zur Verklebung von Gläsern untereinander stellt die UV-Verklebung dar, welche überwiegend im Möbelbau, im Einzelfall aber auch bei architektonischen Anwendungen wie z.B. bei Wintergärten und kleineren Zubauten zum Einsatz kommt. Von wesentlicher Bedeutung ist auch die flächige Verklebung von Gläsern zu Verbund- bzw. Verbundsicherheitsgläsern (siehe auch 2.2.2.2). [32]

2.3.1 Structural Sealant Glazing (SSG)

Unter dem Begriff Structural Sealant Glazing versteht man Fassadenkonstruktionen, bei denen die Glasscheiben nicht über eine mechanische Befestigung in Falzen gehalten werden, sondern in einen Adapterrahmen, der anschließend mit der Fassadenunterkonstruktion verbunden wird, geklebt werden. Die architektonische Erscheinung dieser Fassadenkonstruktionen ist vorwiegend durch flächenbündige, rahmenlose Oberflächen gekennzeichnet. SSG-Konstruktionen können sowohl für Einfach- als auch für Isolierglasscheiben angewendet werden. Bei der Verarbeitung von Isolierglaseinheiten muss der Randverbund aus einem speziellen UV-beständigen Silikon hergestellt werden. Die Verklebung der SSG-Elemente erfolgt im Werk unter vorgegebenen Bedingungen sowie unter Berücksichtigung der Verarbeitungsrichtlinien des Klebstoffherstellers.

Auf europäischer Ebene sind die Zulassungs- und Prüfbedingungen durch die Leitlinie für die europäische technische Zulassung von geklebten Glaskonstruktionen (ETAG 002) [N2], welche von der EOTA herausgegeben wird, festgelegt. Darin wird eine Systematik der folgenden vier Typen angeführt:

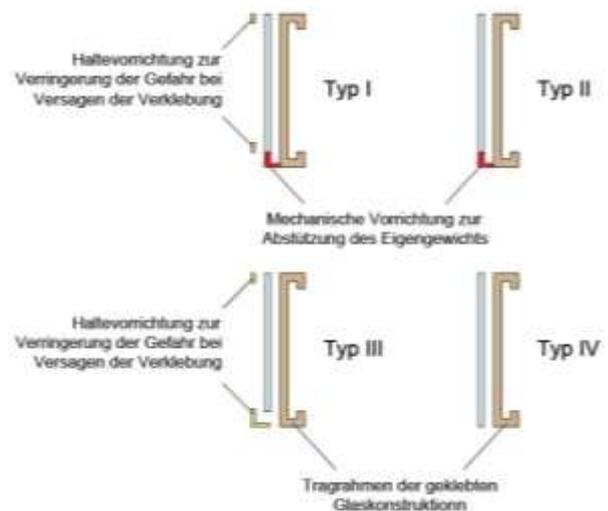


Abb. 2.13 (li.): SSG-Fassade bei IBM-Technical Park, Greenford, von Architekt Sir Norman Foster [<http://www.mimoo.eu>, 22.09.2017]
 Abb. 2.14 (re.): Systematik unterschiedlicher SSG-Konstruktionen [31]

Bei den Typen I und II sind die Klebeverbindungen der SSG-Konstruktion nur für die Aufnahme von Winddruck- und Sogkräfte ausgelegt - die Abtragung des Eigengewichts der Glasscheiben erfolgt über mechanische Haltevorrichtungen, so dass es zu keinen dauerhaften Scherkräften in der Klebefuge kommt. Typ III stellt ein System ohne mechanische Abstützung, jedoch mit mechanischen Halterungen, die ein Herabfallen der Verglasung bei einem Versagen der Verklebung verhindern, dar. In Österreich sind Anwendungen von SSG-Fassaden durch die Baustoffliste ÖE, die vom Österreichischen Institut für Bautechnik (OIB) herausgegeben wird, auf die Typen I und III beschränkt.

2.3.2 Holz-Glas-Verbundfassaden (HGV-Fassaden)

Fassadensysteme, die in Holz-Glas-Verbundbauweise hergestellt werden, unterscheiden sich von den zuvor beschriebenen SSG-Systemen nicht nur auf Grund der Verwendung von Holzwerkstoffen anstelle von Metallprofilen. Der wesentliche Systemunterschied besteht darin, dass die Verglasung auf Grund der spezifischen Bauweise auch als aussteifendes Element zur Aufnahme von Horizontallasten (Wind- und Erdbebenlasten) aktiviert werden kann.

Die gegenwärtig sehr intensive Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet beruht auf vielfältigen positiven Aspekten dieser innovativen Bauweise:

- Halbierung des Primärenergiebedarfs bei Verwendung von Holz-Glas-Fassaden (gegenüber konventionellen Aluminium-Glas-Konstruktionen)
- Mehrfachnutzung der Verglasung sowohl als Klimahülle als auch als strukturelles Element zur Gebäudeaussteifung
- Reduktion von thermischen Spannungen in Verbundelementen auf Grund ähnlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten von Glas und Holz
- Geringere Wärmeleitfähigkeit der Holzkonstruktion gegenüber Metallprofilen
- Nutzung nachwachsender Rohstoffe und gute Rezyklierbarkeit

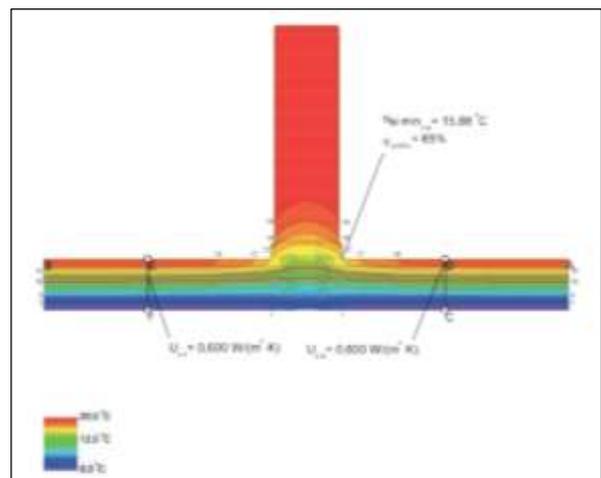


Abb. 2.15 (li.): Haus Schattenbox in Eichgraben, Niederösterreichischer Holzbaupreis 2009 [Handbuch Uniglas | Facade, 2014]
 Abb. 2.16 (re.): Isothermenverlauf des Pfostendetails einer HGV-Fassade [Handbuch Uniglas | Facade, 2014]

Es werden bereits marktreife Fassadensysteme in dieser Bauweise angeboten – die architektonischen Anwendungen sind gegenwärtig jedoch vorwiegend auf prototypische Objekte oder auf kleinmaßstäbliche Anwendungen (z.B. Fenster- und Wintergartenbau) beschränkt. Auf europäischer Ebene liegt auch noch keine Normung oder Leitlinie für die Zulassung von geklebten Holz-Glas-Fassaden vor. Einzelzulassungen erfolgen daher zumeist in Anlehnung an die ETAG 002 [N2], welche jedoch auf den Anwendungsbereich von SSG-Fassaden mit metallischen Adapterprofilen beschränkt ist.

2.3.2.1 System HFA – Schubverklebung mit gezahnter Koppelleiste

Dieses bereits zur Marktreife entwickelte Fassadensystem basiert auf einem Forschungsprojekt der Holzforschung Austria [3] und wurde 2005 zum Patent angemeldet. Durch die umlaufende Verklebung der Verglasung mit einer Koppelleiste aus Birkenfurniersperrholz können Horizontalkräfte durch ein Schubfeld

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

abgetragen werden. Die gezahnte Koppelleiste ermöglicht eine mechanische Befestigung auf einer Pfosten-Riegel-Unterkonstruktion bei gleichzeitiger Beibehaltung einer reduzierten Ansichtsbreite. Die folgende Abbildung zeigt die einzelnen Fertigungs- und Montageschritte.

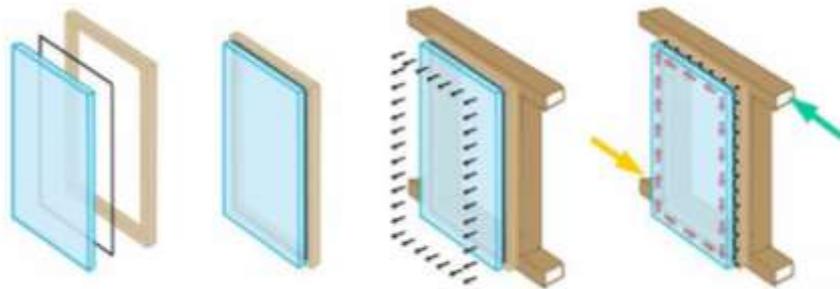


Abb. 2.17: System HFA - Schubverklebung mit gezahnter Koppelleiste [31]

Der Ablauf von Herstellung und Montage erfolgt dabei in folgenden Schritten:

- Verklebung der Glasscheibe mit der Koppelleiste (Birkenfurniersperrholz)
- Transport der Elemente auf die Baustelle (Pfosten-Riegel-Konstruktion ist bereits fertig montiert)
- Positionieren und Verschrauben der Elemente mit der Pfosten-Riegel-Konstruktion
- Versiegeln der Fugen
- Aussteifende Wirkung

2.3.2.2 System ITI/TU Wien - Schubverklebung und Verklötzung mit L-förmiger Koppelleiste

Eine Weiterentwicklung des Holz-Glas-Verbunds mit Schubverklebung stellt das von der Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau (ITI) der Technischen Universität Wien (TU Wien) entwickelte System mit L-förmiger Koppelleiste dar (Patentanmeldung 2011). Zusätzlich zur Schubverklebung erfolgt in den Eckbereichen eine Klotzung der Verglasung. Dadurch wird eine kombinierte Lastabtragung durch Ausbildung eines Schubfeldes und einer Druckdiagonale erreicht. Mit dieser Konstruktionsweise können im Vergleich zur reinen Schubverklebung höhere Lastaufnahmen erreicht werden. Nachstehende Abbildungen verdeutlichen den Unterschied zwischen den beiden Tragmechanismen:



Abb. 2.17 (li.): System HFA – Schubfeld [31]

Abb. 2.18 (re.): System ITI – Schubfeld und Druckdiagonale [31]

Auf Grund der L-förmigen Ausbildung des Koppelrahmens sind beim System ITI größerer Ansichtsbreiten der Unterkonstruktion erforderlich. In den beiden Detailschnitten ist die unterschiedliche Ausführung der Koppelrahmen des Systems HFA und des Systems ITI ersichtlich.

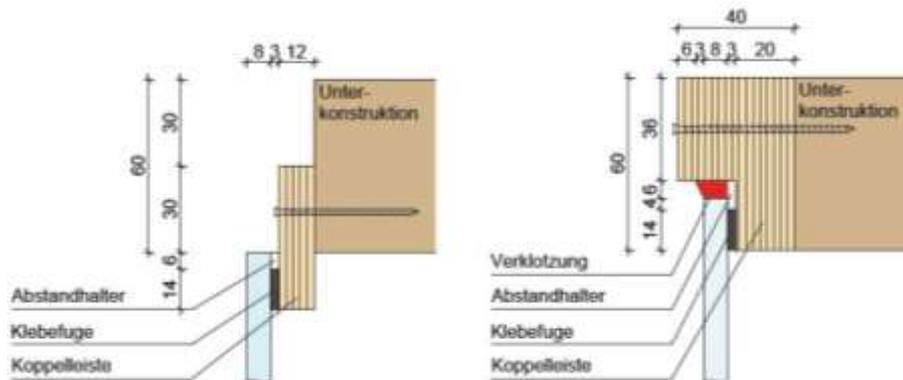


Abb. 2.19 (li.): Koppelleiste System HFA [31]

Abb. 2.20 (re.): Koppelrahmen System ITI [31]

2.3.2.3 Weiterentwicklung bestehender HGV-Fassadensysteme

Die zuvor angeführten Fassadensysteme sind unter Berücksichtigung der analytisch und experimentell ermittelten Kennwerte zur Aufnahme von Horizontallasten (Wind- und Erdbebenlasten) für zwei bis dreigeschoßige Gebäude geeignet, sofern die Aussteifung ausschließlich durch die HGV-Fassadenelemente erfolgt. Um höhere Lastaufnahmen zu erreichen und damit das Aussteifungspotential auf Gebäude mit einer größeren Geschoßanzahl zu erweitern, beschäftigen sich aktuelle Forschungsarbeiten und Dissertationen [27], [31] zum Thema Holz-Glas-Verbund unter anderem mit folgenden Themenbereichen:

- Untersuchung der Verbandwirkung von HGV-Einzelelemente
- Erforschung alternativer Klebstoffe mit höherer Steifigkeit (z.B. silanterminierte Epoxidharze)
- Normative Festlegung realistischer Bemessungsfaktoren für silikonverklebte HGV-Elemente

2.4 Relevante Forschungsarbeiten

2.4.1 Dissertationen und Forschungsberichte zum Thema Holz-Glas-Verbundkonstruktionen

2.4.1.1 Dissertation von Jan Hamm, 1999 [7]

Seit Ende des 20. Jahrhunderts manifestierte sich ein wachsendes Interesse, das Tragverhalten von Verbundkonstruktionen aus Holz und Glas zu untersuchen, welches sich an der Anzahl an Forschungsarbeiten zu diesem Thema niederschlug. Den Beginn dieser Forschungsarbeiten markierte die Dissertation von Hamm, dessen Untersuchungen mittels Wandscheiben, Biegeträgern und Plattenbalken in Holz-Glas-Verbundbauweise durchgeführt wurden. Besonderes Augenmerk wird dabei auch auf die Aussteifungsmöglichkeit durch die Holz-Glas-Verbundelemente gelegt. Durch experimentelle Untersuchungen unterschiedlicher Konstruktionsvarianten von scheibenförmigen Probekörpern wurden Erkenntnisse über das Tragverhalten dieser Bauteile gewonnen, welche in weiterer Folge zur Entwicklung eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts führten.

2.4.1.2 *Dissertation von Peter Niedermaier, 2005 [28]*

Niedermaier setzte in seiner Arbeit die Forschungstätigkeiten mit verklebten Wandscheiben aus Holz und Glas insbesondere für den Einsatz im Wintergarten- und Fassadenbau fort. Aus experimentellen Untersuchungen mit verschiedenen Klebstoffen wurde Silikon auf Grund der Möglichkeit eines Lasteintrags ohne Spannungsspitzen, jedoch gegenüber Hamm mit deutlich größeren Verformungen, als adäquater Klebstoff für Holz-Glas-Verbundkonstruktionen angesehen. Die von Niedermaier entwickelten Wandscheiben wurden durch Verklebung von Glasscheiben mit einem Fichtenholzrahmen, welche über ein Aluminiumprofil mit der Unterkonstruktion mechanisch verbunden sind, hergestellt. Anhand der Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen wurde ein analytisches und numerisches Berechnungsmodell zur Analyse von elastischen Verklebungen sowie ein numerisches Modell mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode zur Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens von Aussteifungselementen in Holz-Glas-Verbundbauweise entwickelt.

2.4.1.3 *Forschungsprojekt der Holzforschung Austria, 2005 [3]*

Basierend auf ersten Berechnungskonzepten von Niedermaier und Kreuzinger für aussteifende Wandscheiben mit HGV-Elementen führte die Holzforschung Austria (HFA) unter der Leitung von Thomas Edl und Peter Schober ein Forschungsprojekt, in dem das erste marktreife Holz-Glas-Verbund-System entstand, durch. Unter anderem wurde dabei das Prinzip der gezahnten Koppelleiste entwickelt. Außerdem erfolgte 2005 die Patentanmeldung des im Zuge des Forschungsprojekts entwickelten HGV-Fassadensystems.

2.4.1.4 *Dissertation von Thomas Edl, 2008 [2]*

Die Dissertation von Edl baut auf der Konzeption von Niedermaier und dessen Ansatz einer Trennung von Aussteifungseinheit und Tragwerk auf. Im Zuge seiner Arbeit wurde der Begriff der „Koppelleiste“, einer gezahnten Ausführungsvariante des von Niedermaier entwickelten „Hilfsrahmens“, eingeführt. Unterschiedliche Fassadenkonstruktionen mit Koppelleisten und elastischer Verklebung wurden hinsichtlich ihres statischen und bauphysikalischen Verhaltens sowie hinsichtlich der baupraktischen Umsetzbarkeit untersucht. Durch eine Diskussion über Versagensmodelle der Einzelbestandteile von Holz-Glas-Verbundkonstruktion wurden Sicherheitskonzepte entwickelt, die in weiterer Folge zur sicheren Bemessungsverfahren von Holz-Glas-Verbundscheiben führten.

2.4.1.5 *Dissertation von Georg Neubauer, 2011 [25]*

Neubauer führte in seiner Arbeit die Erkenntnisse von Edl zu schubverklebten Holz-Glas-Konstruktionen im Fassadenbereich fort. Der experimentelle Teil der Dissertation beschäftigte sich einerseits mit einer vergleichenden Untersuchung zwischen elastischen Silikonverklebungen und semielastischen Acrylatverklebungen und andererseits mit bauphysikalischen Aspekten wie Luft- und Schlagregendichtheit, Widerstand gegen Windbelastungen und Differenzklimata von Holz-Glas-Verbundfassadensystemen. Weiters wurde auf Grundlage der Ergebnisse von Versuchen mit großen Wandelementen sowie der Gegenüberstellung von Rechenmodellen ein Berechnungskonzept ausgearbeitet. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden anhand des prototypischen Bauwerks „Schattenbox“ realisiert und ermöglichten dadurch auch ein längerfristiges Monitoring von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen im Fassadenbereich.

2.4.1.6 *Dissertation von Werner Hochhauser, Werner, 2011 [9]*

In seiner Dissertation erweiterte Hochhauser das Spektrum der bereits bestehenden Berechnungs- und Bemessungsmethoden durch eine Fokussierung auf verschiedene systemspezifische Themenbereiche von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen. Bei der Untersuchung des Verformungsverhaltens wurde unter ande-

rem auch eine genaue Analyse des Beulverhaltens von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundkonstruktionen unter Schub- und Druckbelastung durchgeführt. Erklärtes Ziel war, durch die Entwicklung von Erweiterungs- und Pauschalierungsvorschlägen einen größeren Anwendungsbereich für diese innovative Bauweise zu ermöglichen.

2.4.1.7 *Forschungsprojekt von Hochhauser, Winter, Kreher, 2011 [10]*

In dem Forschungsprojekt „Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: Berechnung und Bemessungskonzept“ des Instituts für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau der Technischen Universität Wien wurden Berechnungs- und Bemessungskonzepte für Holz-Glas-Verbundscheiben, -träger und -platten entwickelt. Aufbauend auf dem Vorgängerprojekt der Holzforschung Austria [26] wurde für scheibenförmige Holz-Glas-Verbundkonstruktionen ein kombinierter Lasteintrag mittels Schubverklebung und Verklotzung entwickelt, welcher in weiterer Folge auch als Patent angemeldet wurde.

2.4.1.8 *Dissertation Matthias Rinnhofer, 2017 [31]*

Rinnhofer beschäftigte sich in seiner Arbeit vorrangig mit der Thematik des Langezeitverhaltens von Holz-Glas-Verbundelementen, insbesondere mit dem Kriechverhalten von Silikonverklebungen also der plastischen Verformung unter dauerhafter Belastung, sowie der daraus folgenden Abnahme der Festigkeit. In einem experimentellen Versuchsprogramm wurden anhand von Probekörpern mit unterschiedlichen Geometrien unter verschiedenen Belastungsniveaus, Zeitspannen und unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen Messwerte ermittelt und analysiert. Zusätzlich erfolgte auch eine rheologische Modellierung der Verformung unter Dauerlast und eine Analyse des Bruchverhaltens auf Basis der Finite-Elemente-Methode. Aus den gewonnen Erkenntnissen wurden realistische und wirtschaftliche Bemessungsbeiwerte für die Langzeitbeanspruchung von Klebefugen aus Silikon hergeleitet.

2.4.2 **Forschungsberichte betreffend Brandschutz und Fassaden**

2.4.2.1 *Forschungsbericht, Brandversuche Lehrte, 1978 [12]*

Die „Lehrter Brandversuche“ erfolgten unter der Leitung des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig gemeinsam mit dem Institut für Wärmetechnik und Industrieofenbau der Technischen Universität Clausthal. Planung, Durchführung und Auswertung der Versuche wurden in Abstimmung mit einem fachkundigen Beraterkreis vorgenommen. Die Durchführung der Naturbrandversuche erfolgte in der Zeit von August 1973 bis Juli 1974 in einem zum Abbruch bestimmten Gebäude aus dem Jahr 1962 in Lehrte. Das Versuchsprogramm bestand aus zwei Vorversuchen und acht Brandversuchen mit unterschiedlichen Settings und Versuchszielen.

Im Unterschied zu Modellversuchen, welche unter normierten Bedingungen ablaufen, konnten durch die realitätsnahe Abbildung unterschiedlicher Brandszenarien wichtige Erkenntnisse zur Erarbeitung praxisgerechter Normen und Vorschriften auf dem Gebiet des Brandschutzes gewonnen werden.

Das Versuchs- und Messprogramm der Brandversuche von Lehrte war dabei im Wesentlichen auf folgende Versuchsziele ausgerichtet:

- Untersuchung der Brandentwicklung und Brandausbreitung im Gebäude sowie des Feuerübersprungs von einem in Brand geratenen Stockwerk auf das nächsthöhere
- Untersuchung des Brandverhaltens von Bauteilen in praxisgerechtem Einbauzustand
- Untersuchung des Brandverhaltens von Stahl und Stahlbetonaußenstützen

Insbesondere das Kapitel über Brandentwicklung und Brandausbreitung vor der Fassade war im Zuge dieser Dissertation von besonderem Interesse. Durch die Brandversuche von Lehrte erfolgte eine fundierte Analyse der Branderscheinungen vor der Fassade, wie z.B. Temperaturverlauf, Flammenhöhe und Strömungsgeschwindigkeit des Heißgasstroms. In diesem Zusammenhang wurden auch die Wechselwirkungen auf Grund unterschiedlicher Windverhältnisse an den Fassadenfronten sowie unterschiedliche Strömungsverhältnisse im Brandhaus auf Grund von geöffneten bzw. geschlossenen Fenstern und Türen berücksichtigt und ausgewertet. Die Auswertung erfolgt dabei sowohl in numerischer als auch in grafischer Form, wie z.B. durch Isothermenbilder der Heißgasströme vor den Fassaden bei verschiedenen Windrichtungen.

Der Ergebnisbericht der Untersuchung wurde 1978 veröffentlicht und besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil sind die Ergebnisse dargestellt und kommentiert, und im zweiten Teil sind die Einzelmessergebnisse sämtlicher Versuche dokumentiert. Die Lehrter Brandversuche stellen auf Grund des umfangreichen Versuchsprogramms und der detaillierten Auswertung ein wesentliches Grundlagendokument auf dem Gebiet der Brandschutzplanung dar.

2.4.2.2 *Forschungsberichte, Jürgen Kuhnkelmann, 1996 bis 1999 [19], [20], [21], [22]*

Von der Forschungsstelle für Brandschutztechnik der Universität Karlsruhe wurden unter der Leitung von Jürgen Kuhnkelmann ein Forschungsprogramm zu der Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung realisiert. Die Veröffentlichung der Berichte erfolgte zwischen 1996 bis 1999 – diese sind folgendermaßen gegliedert:

Teil 1 (Forschungsbericht Nr. 100):

Literaturlauswertung, Einflussgrößen auf die Brand- und Rauchausbreitung, Brandversuche

Teil 2 (Forschungsbericht Nr. 105):

Untersuchungen an einer Ganzflächen-Doppelfassade: „Brandversuche bei unterschiedlichen Abständen zwischen Innen- und Außenfassade“ und „Verhalten von Wärmeschutzglas und Einscheiben-Sicherheitsglas im Brandfall“

Teil 3 (Forschungsbericht Nr. 108):

Auswirkungen des Einsatzes ortsfester Wassernebel-Löschanlagen auf die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden (Literaturlauswertung, Brand- und Löschanversuche)

Teil 4 (Forschungsbericht Nr. 114):

Brandversuche in einem Gebäudeausschnitt mit einer Kastendoppelfassade

Da auf dem Gebiet der Doppelfassaden eine geringe Anzahl an veröffentlichten Forschungsergebnissen vorliegt, stellen diese eine wichtige Grundlage für die Planung und Durchführung des experimentellen Teils dieser Dissertation dar. Einerseits sind die in Teil 1 angeführten brandschutztechnischen Aspekte im Zusammenhang mit Doppelfassaden, wie z.B. Rauchabfuhr, Brandausbreitung über den Fassadenzwischenraum, schnellerer Flammenüberschlag als bei einschaligen Fassadensystemen, essentiell für die Festlegung von spezifischen Schutzziele für Gebäude mit Doppelfassaden. Andererseits ist auch der Teil 4 von besonderem Interesse, da die Brandversuche, so wie in dieser Arbeit, ebenfalls mit Kastendoppelfassaden durchgeführt wurden. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass man auf Grund der Versuchsergebnisse mit unterschiedlich tiefen Zwischenfassadenräumen bei einer geringen Tiefe von 30 cm von einem sehr konservativen Szenario ausgehen kann, da die Versuchsergebnisse in diesem Fall die größten Bestrahlungsstärken ergaben.

Weiters wurde von Kuhnkelmann in [22] zusammenfassend festgestellt, dass sich bei einer Kastendoppelfassade mit rauchdichten und feuerwiderstandsfähigen Abschottungen im Vergleich mit einer Ganzflächendoppelfassade eine deutlich geringere Brand- und Rauchausbreitung im Zwischenfassadenbereich ergibt. Diese Erkenntnis ist aus brandschutztechnischer Sicht von entscheidender Bedeutung für die Festlegung, dass im Zuge dieser Arbeit bei den Fassadenprüfversuchen ebenfalls Prototypen von Typ der Kastendoppelfassade in Holz-Glas-Verbundbauweise untersucht wurden.

2.4.2.3 Forschungsbericht, Ingolf Kotthoff, 2002 [17]

Im Rahmen des „Baurecht & Brandschutz-Symposiums“ von 2002 wurde von Ingolf Kotthoff, dem geschäftsführenden Gesellschafter der MFPA Leipzig, ein Beitrag zum Thema Brandausbreitung an Glasfassaden veröffentlicht. Einleitend wird ein Überblick über die in Deutschland geltenden rechtlichen Anforderungen an Außenwände (Fassaden) in Abhängigkeit von Gebäudeklasse und Nutzungsart gegeben. Anhand unterschiedlicher Brandszenarien werden anschließend wesentliche Parameter von Brandereignissen im Fassadenbereich, wie z.B. Zeitpunkt und Dauer des Flammenaustritts durch eine Fensteröffnung sowie Wärmestromdichte und Temperaturverteilung an der Fassade, verglichen. Basierend auf der Analyse dieser Kennzahlen erfolgt eine Diskussion über die in Deutschland geltenden brandschutztechnischen Vorschriften für Außenwände und Glasfassaden von mittleren und hohen Gebäuden. Insbesondere werden geltende brandschutztechnische Anforderungen an Holz-Glas-Fassaden in Pfosten-Riegel-Konstruktion gegenüber Glasfassaden mit Aluminium-Profilen kritisch hinterfragt. In weiterer Folge werden auch Brandversuche mit unterschiedlichen Glasarten beschrieben und die Ergebnisse in tabellarischer Form mit Angabe des Versagenszeitraums der Verglasung in Abhängigkeit von der Glasart und der thermischen Belastung dargestellt. Zum Thema Doppelglasfassaden wird am Ende des Beitrags ein Überblick zu den wesentlichen brandschutztechnischen Risiken dieser Fassadensysteme gegeben und einige Maßnahmen zur brandschutztechnischen Verbesserung angeführt.

2.4.2.4 Konferenzbeitrag, Kinowski, Sedlak, Sulik, 2016 [16]

Bei der internationalen Konferenz „Fire Safety of Facades 2016“ in Lund wurde ein Beitrag über Brandversuche mit großflächigen Curtain-Wall-Verglasungen und den Einfluss der Glashalterung präsentiert und in Form eines Papers veröffentlicht. Die Versuchsanordnung bestand aus einschaligen Fassadenkonstruktionen aus Aluminiumprofilen und rechteckigen Verglasungen in unterschiedlichen Geometrien. Alle Fassadenkonstruktionen wurden als Brandschutzfassaden mit definiertem Feuerwiderstand ausgeführt. Im durchgeführten Versuchsprogramm unterschieden sich die Prüffassaden lediglich durch die Art der Glashalterung (Standard-System mit Pressleisten gegenüber Structural-Glazing-Verglasung). Die Prüfversuche erfolgten gemäß EN 1364-3 mit einer thermischen Belastung von der Fassadeninnenseite. Die Auswertung der Messwerte der Thermoelemente führte zu der Erkenntnis, dass Structural-Glazing-Systeme gegenüber Fassaden mit Pressleisten im Bereich der Glasstöße einen deutlich geringeren Wärmedurchgang aufweisen. Im Hinblick auf die Verformungen der Prüffassaden konnte bei den Versuchen kein nennenswerter Unterschied auf Grund unterschiedlicher Glashalterungen festgestellt werden. Der Beitrag ist insofern für die gegenständliche Arbeit von Interesse, da geklebte Holz-Glas-Fassaden als eine Sonderform von Structural-Glazing-Systemen angesehen werden können.

3 Brandschutztechnische Beurteilung von Fassaden

3.1 Begriffsbestimmung

3.1.1 Fassade und Außenwand

Der Begriff Fassade wird etymologisch vom lateinischen Wort *facies* (Gesicht) abgeleitet. Das Gestaltungsprinzip einer repräsentativen Schauseite, welche auch als „Gesicht eines Gebäudes“ angesehen werden kann, lässt sich sehr gut an vielen christlichen Sakralbauten erkennen, bei denen zumeist eine Gebäudefront über eine gegenüber den anderen Außenwänden besonders reichhaltige architektonische Gestaltung verfügt. Es handelt sich dabei in der Regel um die westseitige Gebäudefront, welche durch die Orientierung zum öffentlichen Raum oder auf Grund einer zentralen Blickachse über eine Schauseite bzw. Fassade als wesentliches Gestaltungsmerkmal verfügt.



Abb. 3.1 (li.): Basilika di San Giorgio Maggiore, Venedig – Architekt: Alberti [<https://upload.wikimedia.org>, 03.07.2017]

Abb. 3.2 (re.): Tempietto San Pietro di Montorio, Rom – Architekt: Bramante [<http://www.pinterest.com>, 21.07.2017]

Nicht alle historische Gebäude verfügen jedoch über nur eine Fassade in dem zuvor beschriebenen Sinn. Es handelt sich dabei zumeist um den Gebäudetypus des Zentralbaus (z.B. Tempel oder Türme), welcher auf Grund der besonderen Situierung im öffentlichen Raum über keine Differenzierung hinsichtlich der Wertigkeit und Ausgestaltung der Gebäudefronten verfügt. Für diesen Gebäudetypus ist die zuvor beschriebene Definition der Fassade als besondere Schauseite daher nicht gültig.

Mit dem Beginn der Moderne ab dem 20. Jahrhundert erfolgte eine grundsätzliche Veränderung der ursprünglichen Bedeutung des Begriffs der Fassade als rein gestalterisches Element zu einem durch die Funktion bestimmten Bauteil der gesamten Gebäudehülle. In diesem Kontext bezeichnete man nun Fassaden nach funktionalen, konstruktiven oder materiellen Kriterien – beispielhaft für diese Unterscheidung sind hier die Begriffe Lochfassade, Blendfassade oder Glasfassade angeführt.

Durch diese begriffliche Veränderung der Fassade seit der Moderne sowie durch die Entwicklung neuer Bauweisen (z.B. Skelettbauten ohne tragende Außenwände mit Curtain-Wall-Fassaden) ist nun auch eine Differenzierung zwischen den beiden Begriffen Außenwand und Fassade nicht bei jedem Gebäude a priori möglich.

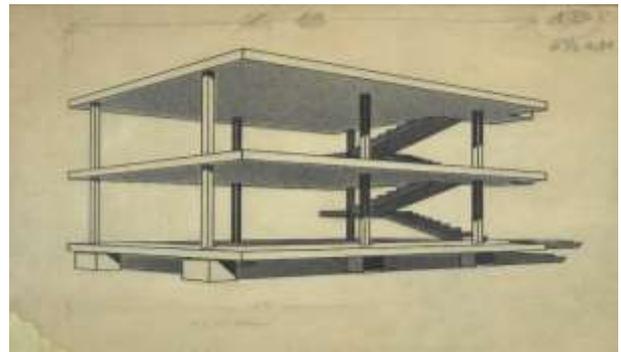


Abb. 3.3 (li.): Finlandia Hall, Helsinki – Architekt: Alvar Aalto [<http://www.casavogue.globe.com>, 21.09.2017]

Abb. 3.4 (re.): Maison Dom-ino, Architekt: Le Corbusier [<http://www.tyylit.com>, 21.09.2017]

Wikipedia definiert die Unterscheidung zwischen den Begriffen Fassade und Außenwand wie folgt:

„Spricht man von der Fassade, so geht es um die Ansicht und das wesentliche Prinzip der Gebäudehülle. [...] Der Begriff Außenwand dagegen bezeichnet das funktionale Bauteil, das den Außenraum vom Innenraum trennt. Außenwand ist ein eher technischer Begriff und impliziert häufig eine reizärmere Gestaltung.“ [W7]

Zur Beurteilung brandschutztechnischer Aspekte von Fassaden ist diese Definition jedoch zu ungenau, da je nach Fassadensystem Außenwände vorhanden sein können (z.B. tragende Außenwände mit vorgehängter Fassade) oder zur Gänze durch eine nichttragende Gebäudehülle (z.B. Skelettbauten mit Curtain-Wall Fassade) ersetzt sein können.

Um Brandschutzanforderungen von Fassaden zu untersuchen, ist eine eindeutige Begriffsbestimmung unerlässlich, da die Bauteile Fassade und Außenwand, funktional bedingt, unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Außerdem ist auf Grund der Vielzahl verschiedener Fassadensysteme eine Typologie erforderlich, um die unterschiedlichen Merkmale, Funktionen und Anforderungen beurteilen und zuordnen zu können.

Die beiden folgenden Abbildungen machen die unterschiedliche Verwendung von Begrifflichkeiten anhand von Außenwandkonstruktionen mit vorgehängten hinterlüfteten Fassadensystemen deutlich. Unter dem Begriff Fassade wird in Österreich üblicherweise der Schichtaufbau vor der Außenwand (Wandbildner) verstanden.

Im Unterschied dazu werden diese Außenschichten in der Schweiz als Außenwandverkleidungssystem bezeichnet. In der Lignum-Dokumentation Brandschutz [4], welche den Status eines „Stand der Technik“-Papiers in der Schweiz aufweist, sind die Begrifflichkeiten der Bestandteile einer Außenwandkonstruktion in der folgenden Abbildung dargestellt. Auffallend ist, dass hier keine Unterscheidung zwischen den Begriffen Fassade bzw. Außenwand erfolgt.

Eine ähnliche Einstufung dieser Begrifflichkeiten in Deutschland findet sich auch im Brandschutzatlas. Grundsätzlich wird zwischen tragenden und nichttragenden bzw. zwischen raumabschließenden und nichtraumabschließenden Außenwänden unterschieden. [23]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

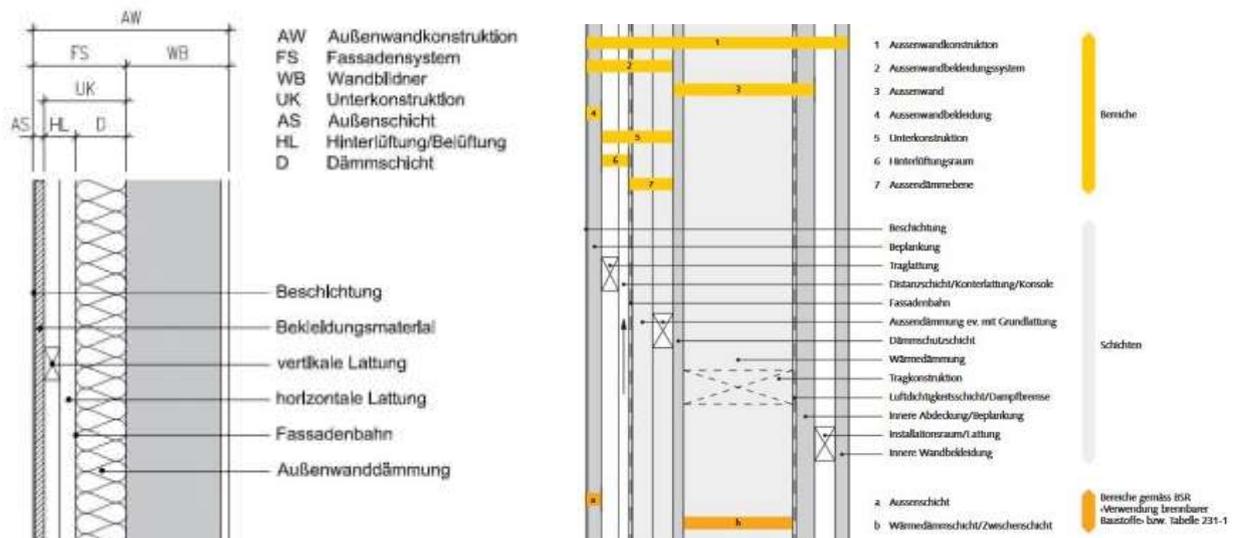


Abb 3.5 (li.): Bestandteile und Begriffsbestimmungen einer Außenwand (Österreich) [eigene Darstellung]

Abb 3.6 (re.): Bestandteile und Begriffsbestimmungen einer Außenwand (Schweiz) [4]

In Österreich wird in den Begriffsbestimmungen und der Richtlinie 2 des OIB [N4], welche den Stand der Technik darstellen, zwischen folgende Fassadensystemen unterschieden:

- I Außenwand-Wärmedämmverbundsysteme (WDVS)
- II vorgehängte Fassaden
- III Vorhangfassaden
- IV Doppelfassaden

Die Fassadensysteme I und II werden in den Nachbarländern Deutschland und Schweiz als Außenwandbekleidungs-system (CH) bzw. als Außenwandbekleidung (D) bezeichnet, da diese Fassadensysteme aus konstruktiven Gründen nur in Verbindung mit einer Außenwand realisiert werden können. Die beiden Fassadensysteme der Vorhang- und Doppelfassaden (III und IV) werden gemäß der in Deutschland üblichen Bezeichnung als nichttragende raumabschließende Außenwände angesehen.

In dieser Arbeit werden in weiterer Folge die in Österreich durch die OIB-Richtlinien und die nationalen Normen für Fassaden festgelegten Begrifflichkeiten verwendet.

3.2 Fassadentypologie

Bei dem Versuch einer übergeordneten Systematisierung von Fassaden stößt man in der Fachliteratur auf Grund der Vielzahl von Systemen, Konstruktionsmerkmalen und Beurteilungskriterien auf unterschiedlichste Gliederungen und Bezeichnungen. Beispielhaft sind zwei unterschiedliche Systematisierungen angeführt:

Unterscheidung nach Art der Einbausituation

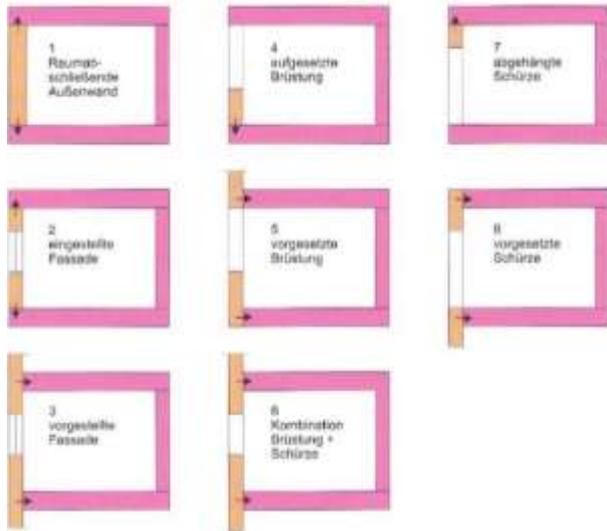
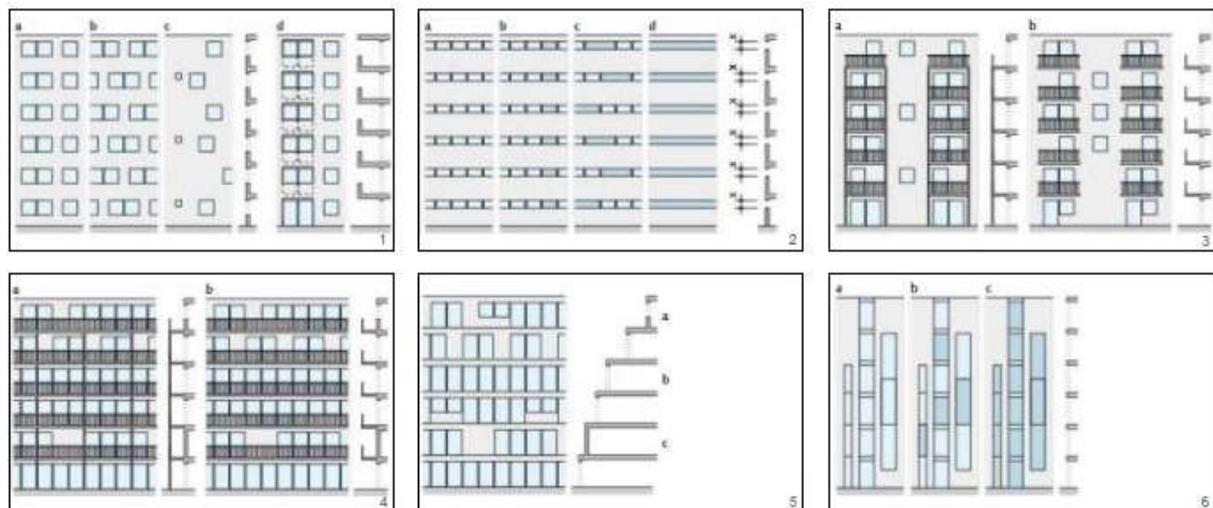


Abb. 3.7: Gliederung unterschiedlicher Außenwandsysteme [23]

Unterscheidung nach architektonischen Kriterien



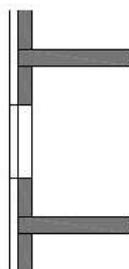
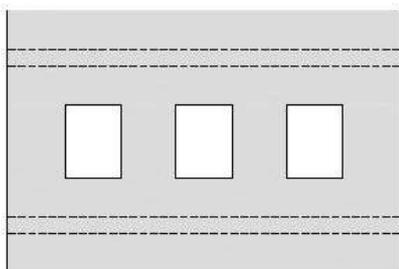
- 1 ... Lochfassade
- 2 ... Fensterbandfassade
- 3 ... Fassade mit Einzelbalkonen
- 4 ... Fassade mit Balkonbändern
- 5 ... Fassade mit Rücksetzung (Staffelgeschoße)
- 6 ... Fassade mit vertikaler Verglasung

Abb. 3.8: Gliederung von Außenwänden anhand architektonischer Merkmale [4]

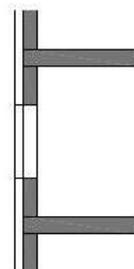
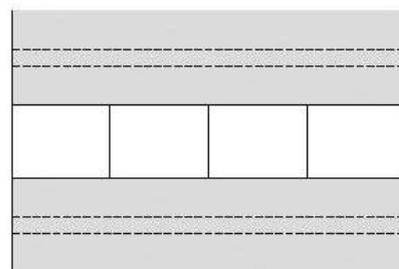
Da in weiterer Folge in dieser Arbeit die Terminologie und Unterscheidung von Fassaden gemäß dem österreichischen Stand der Technik sowie den nationalen Prüfnormen erfolgt, wird bei nachfolgender Fassadentypologie auf die brandschutzrelevanten Kriterien Bedacht genommen. Grundlage dafür ist die Differenzierung der zuvor angeführten Fassadenvarianten I bis IV gemäß Richtlinie 2 des OIB [N6].

Nachdem in der Art der Ausbildung von Bauteilen zur Begrenzung einer Brandausbreitung auf höhere Geschoße ein wesentliches Beurteilungskriterium im Hinblick auf den Brandschutz liegt, berücksichtigt die an dieser Stelle vorgeschlagene Systematisierung nicht ausschließlich die Art des Fassadensystems, sondern auch die damit in unmittelbarem Zusammenhang stehenden Bauteile wie Außenwände, Brüstungen, Balkonplatten etc. Die hier abgebildete Übersicht unterscheidet grundsätzlich zwischen Fassadensystemen mit bzw. ohne Außenwand sowie zwischen Fassadentypen mit Fensterbändern bzw. Balkonplatten in Anlehnung an die zuvor angeführte Systematisierung der Schweiz. Im folgenden Kapitel wird detailliert auf die verschiedenen Systeme eingegangen.

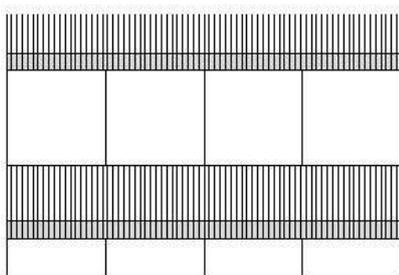
FASSADE MIT AUSSENWAND



FASSADE MIT FENSTERBAND



FASSADE MIT BALKONPLATTE



FASSADE OHNE AUSSENWAND

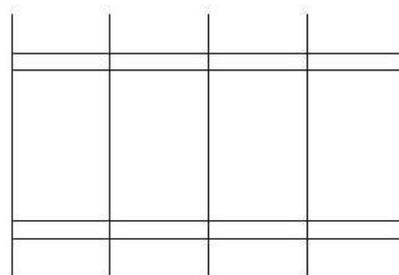


Abb. 3.9: Fassadensysteme mit bzw. ohne Außenwand [eigene Darstellung]

3.2.1 Fassadensysteme mit Außenwand

Konstruktionen dieses Typs bestehen im Regelfall aus einer Außenwand und einem Fassadensystem, welches entweder als Außenwand-Wärmedämmverbundsystem oder als vorgehängte Fassade ausgebildet sein kann. Die Außenwand kann dabei entweder tragend oder nichttragend bzw. raumabschließend (z.B. Feuermauer) oder nichtraumabschließend (z.B. Lochfassade) ausgebildet sein. Brandschutztechnische Anforderungen (z.B. Feuerwiderstand, Brandverhalten, Brandweiterleitung) können dabei in Abhängigkeit von den baurechtlichen Anforderungen sowohl an die Außenwand als auch an das Fassadensystem gestellt werden. Folgende Fassadensysteme können diesem Typus zugeordnet werden:

3.2.1.1 Außenwand-Wärmedämmverbundsysteme (WDVS)

Dieses Fassadensystem besteht aus den folgenden Komponenten:

- Klebemörtel
- Wärmedämmschicht (EPS, Mineralwolle, etc.)
- Verdübelung (sofern erforderlich)
- Armierungsschicht
- Außenputz

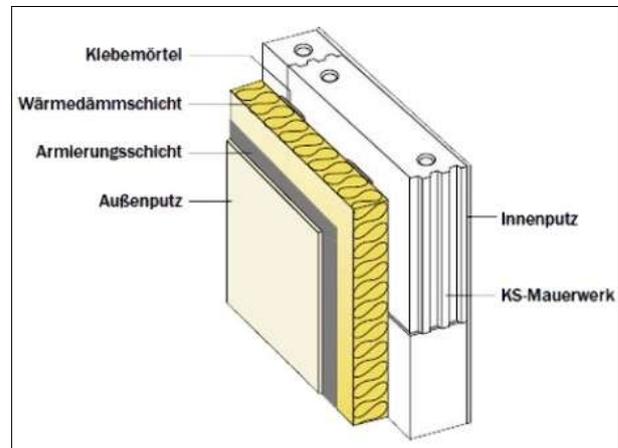


Abb.: 3.10: Aufbau eines Außenwand-Wärmedämmverbundsystems [http://www.baunetzwissen.de, 31.03.2016]

3.2.1.2 Vorgehängte Fassaden

Im Unterschied zu den Wärmedämmverbundsystemen verfügen vorgehängte Fassadensysteme über eine Außenschicht, die über eine stabförmige Unterkonstruktion mit der Außenwand verbunden ist. Üblicherweise ist die Außenschicht durch einen Luftspalt bzw. eine Hinterlüftungsebene von der Wärmedämmung getrennt. Diese Systeme bestehen im Regelfall aus den folgenden Komponenten:

- Unterkonstruktion
- Verbindungs- und Befestigungselemente
- Wärmedämmschicht (z.B. Mineralwolle)
- Winddichtungsfolie (sofern erforderlich)
- Luftspalt bzw. Hinterlüftungsebene
- Außenschicht

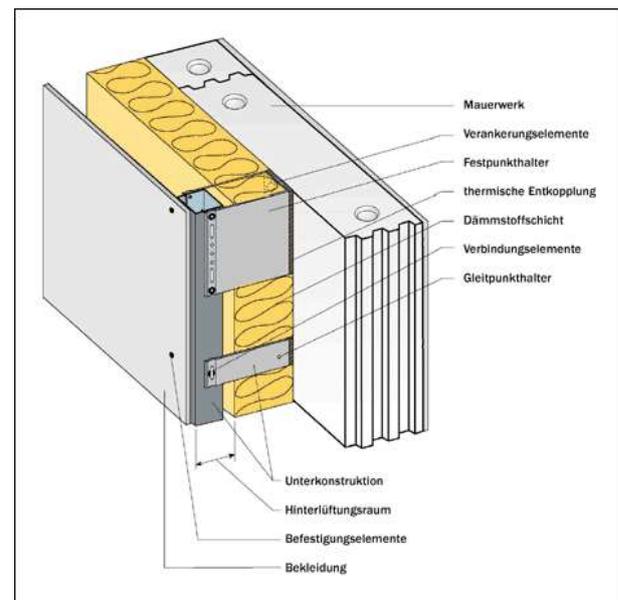


Abb.: 3.11: Aufbau eines vorgehängten Fassadensystems [http://www.baunetzwissen.de, 31.03.2016]

Je nach Ausbildung des Luftspalts bzw. der Hinterlüftungsebene unterscheidet man zwischen folgenden Arten von vorgehängten Fassaden:

- vorgehängte belüftete Fassaden
- vorgehängte hinterlüftete Fassaden
- nicht hinterlüftete Fassaden

3.2.2 Fassadensysteme mit Fensterbändern

Dieser Fassadentypus kann in unterschiedlichen Variationen ausgebildet werden. In Hinblick auf die in der Abbildung 3.7 angeführte Typologie sind Varianten mit Brüstung, mit Schürze (Sturz) sowie Kombinationen derselben möglich. Dabei können Brüstung bzw. Sturz sowohl tragend als auch nichttragend ausgeführt werden. Nachdem eine horizontale Öffnung in Form eines Fensterbandes vorliegt, liegen bei diesem Fassadentyp jedenfalls nichtraumabschließende Außenwände vor. Brandschutztechnische Anforderungen können dabei in Abhängigkeit von den baurechtlichen Anforderungen sowohl an die Brüstung und den Sturz als auch an das Fassadensystem gestellt werden. Die Ausbildung dieses Fassadentyps ist sowohl mit WDVS-Fassaden, mit vorgehängten Fassaden als auch mit Vorhang- und Doppelfassaden möglich.

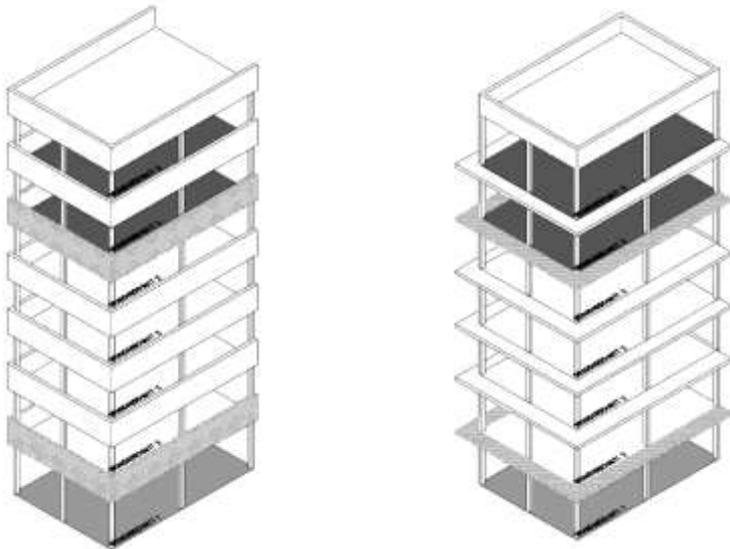


Abb. 3.12 (li.): Schemadarstellung Fensterbandfassade mit Brüstung [<https://www.wien.gv.at/wohnen/baupolizei>, 08.10.2017]

Abb. 3.13 (re.): Schemadarstellung Fassade mit Balkon- bzw. Loggienplatte [<https://www.wien.gv.at/wohnen/baupolizei>, 08.10.2017]

3.2.3 Fassadensysteme mit Balkonplatten

Dieser Fassadentypus kann sowohl mit als auch ohne Außenwand bzw. mit oder ohne Brüstung bzw. Sturz vorgefunden werden. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist das Vorhandensein von geschoßweise auskragenden horizontalen Platten im Bereich der Außenwandkonstruktion (siehe Abbildung 3.12 und 3.13). Bei entsprechender Ausführung (Geometrie, Feuerwiderstand, Brandverhalten) spielen diese Bauteile eine maßgebliche Rolle im Zusammenhang mit der Brandausbreitung und Brandweiterleitung im Außenwandbereich, weshalb im Rahmen dieser Systematisierung auch von einem gesonderten Fassadentypus gesprochen wird.

3.2.4 Fassadensysteme ohne Außenwand

Bei diesem Typus kann nicht zwischen Fassadensystem und Außenwand gemäß den zuvor angeführten Begriffsbestimmungen differenziert werden. In der Regel handelt es sich um Vorhangfassaden (Curtain-Wall-Fassaden), die ein- oder zweischalig ausgeführt sein können. Da diese Fassadensysteme keine Vertikallasten des Tragwerks aufnehmen, können sie auch als nichttragende Außenwände betrachtet werden. Brandschutztechnische Anforderungen (z.B. Feuerwiderstand, Brandverhalten, Brandweiterleitung) sind dabei in Abhängigkeit von den baurechtlichen Anforderungen zur Gänze durch das Fassadensystem zu erfüllen. Innerhalb dieses Fassadentyps kann folgende Differenzierung vorgenommen werden:

3.2.4.1 Vorhangfassaden

Dieser Fassadentyp wird auch als Curtainwall- oder Monofassade bezeichnet und ist wie folgt definiert:

„[Er] besteht in der Regel aus vertikalen und horizontalen, miteinander verbundenen, im Baukörper verankerten und mit Ausfachungen ausgestatteten Bauteilen, die eine leichte, raumschließende ununterbrochene Hülle bilden, die selbstständig oder in Verbindung mit dem Baukörper alle normalen Funktionen einer Außenwand erfüllt, jedoch nicht zu den lastaufnehmenden Eigenschaften des Baukörpers beiträgt.“ [N28]

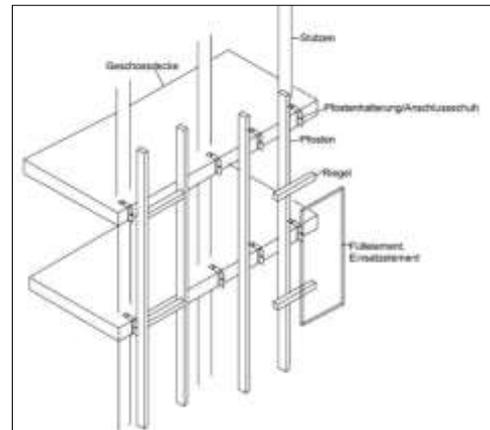


Abb. 3.14: Aufbau einer Vorhangfassade in Pfosten-Riegel-Bauweise [http://www.baunetzwissen.de, 31.03.2016]

In Abhängigkeit von der konstruktiven Ausbildung der Komponenten sowie deren Elementierung und dem Vorfertigungsgrad wird zwischen folgenden Bauarten unterschieden:

- Pfosten-Riegel-Fassade
„[Ein] leichtes Rahmentragwerk aus auf der Baustelle zusammengefügtten Bauteilen und mit vorgefertigten undurchsichtigen und/oder durchsichtigen Ausfachungen“ [N28]
- Elementfassade
„vormontierte, aus miteinander verbundenen Elementen bestehende geschoßhohe oder mehrgeschoßhohe Baugruppen, einschließlich Ausfachungen“ [N28]

3.2.4.2 Doppelfassaden

Dieser Fassadentyp wird auch als Glas-Doppel-, Klima-, Korridor- oder Twinfassade bezeichnet und ist wie folgt definiert:

„Es handelt sich um eine Konstruktion, bei der vor eine Außenwand mit in der Regel offenbaren Fenstern, Türen oder Lüftungsöffnungen, im Abstand von 0,2 m bis ungefähr 2,0 m eine Wandkonstruktion, z.B. Glas tafeln, gesetzt wird.“ [N10]

In der Praxis werden vielfältige Ausformungen von Doppelfassaden mit unterschiedlichen Merkmalen (z.B. Anordnung, Luftführung, Segmentierung) vorgefunden. Eine mögliche Systematisierung dieses Fassadentyps ist beispielhaft in Abbildung 3.15 dargestellt. Weiters ist die Art der Luftführung im Zwischenfassadenraum (ZFR) sowohl in bauphysikalischer als auch in brandschutztechnischer Hinsicht von wesentlicher Bedeutung. Die Abbildung 3.16 stellt eine schematische Darstellung unterschiedlicher Belüftungssysteme bei Doppelfassaden dar.

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

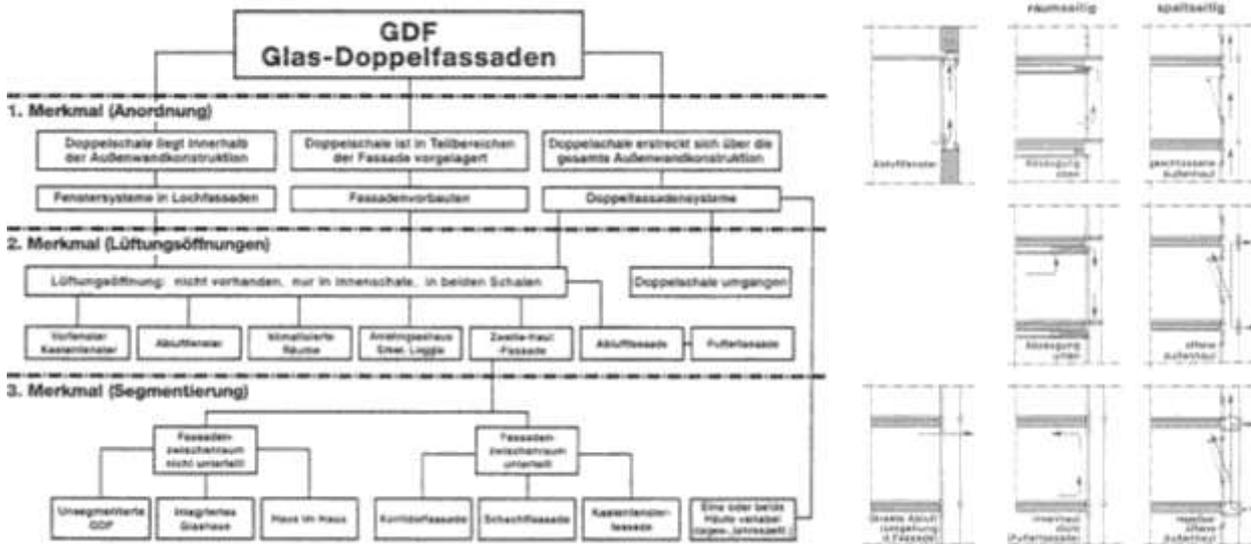


Abb. 3.15 (li.): Schematische Ordnung nach Merkmalen von Glas-Doppelfassaden [6]

Abb. 3.16 (re.): Schemadarstellung der Luftführung von Glas-Doppelfassaden [6]

Aus brandschutztechnischer Sicht wird je nach Ausbildung der Lüftungsführung im Zwischenfasadenbereich von Doppelfassaden zwischen folgenden Varianten unterschieden [19]:

- Ganzflächendoppelfassade
„Es handelt sich um eine Konstruktion, bei der die Luftführung im Zwischenraum über die gesamte Außenwand mit Zuluftöffnungen am unteren Ende und Abluftöffnungen am oberen Ende erfolgt.“ [N10]

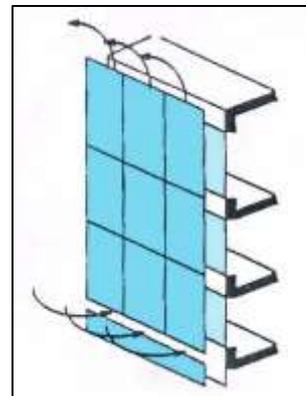


Abb. 3.17: Ganzflächenkastendoppelfassade [19]

- Kanal-Doppelfassade
„Es handelt sich um eine Konstruktion, bei der sich im Zwischenraum über die ganze Gebäudehöhe reichende Abluftschächte (vertikale „Abluftkanäle“) mit „Kastenfenstern“ und horizontaler Abschottung in Deckenhöhe abwechseln. Die Abluftschächte weisen am unteren Ende Zuluftöffnungen aus dem Freien und am oberen Ende Abluftöffnungen auf. Die „Kastenfenster“ weisen je Geschoß am unteren Ende Zuluftöffnungen aus dem Freien und im oberen Bereich seitlich Abluftöffnungen zu den Abluftschächten auf.“ [N10]

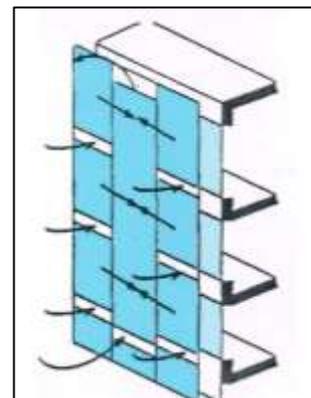


Abb. 3.18: Kanal-Doppelfassade [19]

- Kasten-Doppelfassade

„Es handelt sich um eine Konstruktion, bei der in der Regel geschobweise be- und entlüftete Zwischenraum horizontale Abschottungen in Deckenhöhe und vertikale Abschottungen je Fensterachse bzw. je Trennwand oder Brandabschnittsgrenze aufweist.“ [N10]

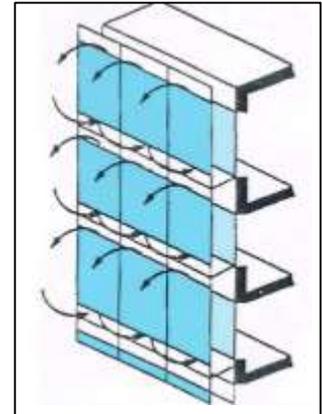


Abb. 3.19: Kasten-Doppelfassade [19]

3.2.5 Sonderfassaden

Neben den zuvor beschriebenen Fassadentypen gibt es eine Vielzahl von prototypischen Fassadensystemen und objektbezogenen Einzellösungen. Eine Differenzierung kann z.B. nach konstruktiven Kriterien oder nach der Art der Außenschicht erfolgen. In Abhängigkeit von der Gebäudeklasse und Nutzung sind die brandschutztechnischen Anforderungen zumeist in Verbindung mit einem objektspezifischen Brandschutzkonzept festzulegen. Auf Grund der Vielzahl der möglichen Ausformungen sind hier exemplarisch nur einige Sonderfassadentypen angeführt:

- Seilnetzfassaden
- Ganzglasfassaden
- Membranfassaden



Abb. 3.20: Allianz-Arena, München – Architektur: Herzog & de Meuron
[<http://footage.ramepool.com>, 08.10.2017]

3.3 Europäische Brandschutzanforderungen

3.3.1 Bauprodukteverordnung

Mit dem Inkrafttreten der Bauprodukteverordnung (Verordnung EU Nr. 305/2011) [N31] am 01.07.2013 wurde die vorhergehende Bauproduktenrichtlinie (89/116 EWG) aus dem Jahre 1989 ersetzt. Die bisherigen „wesentlichen Anforderungen“ der Bauproduktenrichtlinie wurden in „Grundanforderungen an Bauwerke“ umbenannt – diese Grundanforderungen sind darin folgendermaßen festgelegt:

- Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
- Brandschutz
- Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
- Nutzungssicherheit und Barrierefreiheit
- Schallschutz
- Energieeinsparung und Wärmeschutz
- Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

Betreffend Brandschutz sind folgende zielorientierte Anforderungen definiert:

Ein Bauwerk muss derart entworfen und ausgeführt sein, dass bei einem Brand

- die Tragfähigkeit des Bauwerks während eines bestimmten Zeitraums erhalten bleibt
- die Entstehung und Ausbreitung von Feuer und Rauch innerhalb des Bauwerks begrenzt wird
- die Ausbreitung von Feuer auf benachbarte Bauwerke begrenzt wird,
- die Bewohner das Gebäude unverletzt verlassen oder durch andere Maßnahmen gerettet werden können und
- die Sicherheit der Rettungsmannschaften berücksichtigt wird und wirksame Löscharbeiten möglich sind.

Diese zielorientierten Anforderungen können entweder als Leistungsanforderung (performance requirement) oder als konkrete Ausführung (prescriptive requirement) in Form einer vorgeschriebenen Ausführung gefordert werden

Auf Grund der rechtlichen Verbindlichkeit der Bauprodukteverordnung sind die zuvor angeführten Grundanforderungen sowie die damit verbunden zielorientierten Anforderungen von allen Mitgliedsstaaten der EU verbindlich in den jeweiligen nationalen Gesetzgebungen umzusetzen. In Österreich erfolgte dies durch die vom Österreichischen Institut für Bautechnik (OIB) herausgegebenen OIB-Richtlinien [W3] zur Festlegung der zielorientierten Anforderungen, unter Berücksichtigung der Grundanforderungen der Bauprodukteverordnung [N31].

3.3.2 Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen

Im Hinblick auf Fassaden und insbesondere geklebte Glasfassaden ist auf europäischer Ebene weiters die Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (ETAG 002) [N2] von Bedeutung.

Eine ETA-Leitlinie (ETAG) ist eine Grundlage für Zulassungen, das heißt ein Dokument für die technische Beurteilung der Brauchbarkeit für einen vorgesehenen Verwendungszweck. Die Leitlinie ETAG 002 gilt für geklebte Glaskonstruktionen (Structural Sealant Glazing Systems – SSGS) zur Verwendung in Fassaden und Dächern oder Teile davon mit einer Verglasung in einem beliebigen Winkel zwischen der Vertikalen und 7° Neigung zur Horizontalen. [N2]

Die in [N2] definierten Anforderungen betreffend Brandschutz lauten:

Die an das Brandverhalten und den Feuerwiderstand von geklebten Glaskonstruktionen zu stellenden Anforderungen müssen den Rechts- und Verwaltungsvorschriften entsprechen, die auf die Endnutzung der geklebten Glaskonstruktion anwendbar sind. Sie werden über die CEN-Klassifizierungsdokumente festgelegt. Folgende Anforderungen sind für den Bausatz (K) und die Verglasung (G) zu berücksichtigen:

- Begrenzung der Ausbreitung von Feuer und Rauch über den Brandentstehungsraum hinaus (K)
- Begrenzung der Brandausbreitung auf benachbarte Bauwerke (K)
- Rettung der Nutzer des Bauwerks (G)

Zur Anwendung der ETAG 002 sind unter anderem folgende Systemvoraussetzungen erforderlich:

Die Haftflächen der Verklebung müssen aus folgenden Materialien bestehen:

- unbeschichtetem oder anorganisch beschichtetem Glas
und
- anodisiertem Aluminium oder nichtrostendem Stahl

Weiters werden folgende Anforderungen an die Verklebung gestellt:

- Die Verklebung muss aus Silikon bestehen.
- Eine Haftung der Verklebung an drei Seiten ist nicht zulässig.

Auf Grund fehlender Systemvoraussetzungen kann daher für geklebte Holz-Glas-Fassaden keine Zulassung gemäß ETAG 002 erreicht werden. Die zielorientierten Anforderungen können bei der Planung und Beurteilung von geklebten Holz-Glas-Fassaden in Anlehnung berücksichtigt werden, um gegebenenfalls eine Einzelzulassung zu erwirken.

3.4 Schutzziele und Prüfmethoden im europäischen Kontext

Da Fassaden einen wesentlichen Einfluss im Hinblick auf die gemäß Bauprodukteverordnung definierte Grundanforderung Brandschutz darstellen, ist eine Harmonisierung der Schutzziele an Fassaden und die damit verbundenen Anforderungen in Form von Leistungsanforderungen oder technischen Ausführungen von wesentlicher Bedeutung. Im Unterschied zu der harmonisierten Normen EN 13501-1 [N26] zur Klassifizierung des Brandverhaltens von Bauprodukten bzw. der EN 13501-2 [N27] zur Klassifizierung des Feuerwiderstands von Bauteilen ist im europäischen Kontext keine Prüfnorm betreffend des Brandverhaltens und der Brandweiterleitung von Fassaden vorhanden.

Vor diesem Hintergrund wurden vom CSTB (Centre Cientifique et Technique du Batiment) in den Jahren 2013 und 2016 internationale Konferenzen zum Thema Brandschutz von Fassaden veranstaltet. Dabei wurden von renommierten Experten aktuelle Forschungsergebnisse präsentiert und diskutiert, mit der Zielsetzung, die nationalen Unterschiede aufzuzeigen und in weiterer Folge Vorschläge für eine Harmonisierung auf europäischer Ebene zu erarbeiten. [29]

Die gegenwärtigen nationalen Prüfmethoden für Fassaden der EU Mitgliedstaaten sind zum Teil sehr divergent. Eine zeitnahe europäische Harmonisierung in diesem Themenfeld ist als unwahrscheinlich zu betrachten. Die unterschiedlichen Konfigurationen und Kriterien der Prüfmethoden ermöglichen auch keine eindeutige Vergleichbarkeit. Die folgende tabellarische Übersicht stellt wesentliche Unterschiede verschiedener nationaler Prüfmethoden dar.

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

Norm	BS 8414-1	LEPIR II	MSZ 14800-6	SP FIRE 105	ÖNORM B 3800-5	DIN E 4102-20	PN-90/B-02867
Land	GB	F	H	S	A	D	PL
Brandlast	Holzkrippe 3,5 MW, 4500 MJ	600 kg Holzkrippe	380 kg Holzkrippe / 10 kg Dieselöl	60 l Heptan	25 kg Holzkrippe	25 kg Holzkrippe	20 kg Holzkrippe + Windanströmung (2 m/s)
Maximale Wärmestrom- dichte an der Oberfläche	70 kW/m ² in 1 m Höhe	Nicht spezi- fiziert	Nicht spezifiziert	15 oder 80 kW/m ²	Nicht spezifiziert	70 – 95 kW/m ² in 1 m Höhe	Nicht spezifiziert
Maximale Oberflächen- temperatur	600 °C / 20 min	Ø 500 °C peak 800 °C	600 °C 0,5 m hoch / 50 min	450 °C / 12 min	Nicht spezifiziert	Nicht spezifiziert	peak 800 °C
Versuchsdauer	30 min	≥ 30 min	40 min	≥ 12 min	30 min	21 min gas, 30 min Holz	30 min
Versuchs- konfiguration	Ecke: 2,5 m x 8 m + 1,5 x 8 m	Wand: 3 m x 5,5 m	Wand: 6 m x 7 m	Wand: 4 m x 6,7 m	Ecke: 3 m x 6 m + 1,5 m x 6 m	Ecke: 3 m x 5,2 m + 2 m x 5,2 m	Wand: 2,3 m hoch
Kriterien	Temperatur- limits	Flamme bis 2. Geschoß	Temperaturanstieg, Brandweiterleitung, abfallende Teile	Flammen über 2 Geschoße, abfallende Teile	Temperaturanstieg, Brandweiterleitung, abfallende Teile	Temperatur- anstieg, Brandweiter- leitung, abfal- lende Teile	Temperaturlimits, brennende Teile

Abb. 3.21: Vergleich unterschiedlicher nationaler Testmethoden [29]

3.5 Vergleich der Schutzziele in Österreich, Deutschland und der Schweiz

3.5.1 Übergeordnete Brandschutzanforderungen

In Österreich sowie den Nachbarländern Deutschland und Schweiz besteht grundsätzlich Konsens betreffend der Grundanforderungen, die in der Bauprodukteverordnung [N31] definiert sind. Da es sich bei Fassaden in der Regel um nichttragenden Bauteile handelt, besteht Übereinstimmung hinsichtlich der zielorientierten Anforderungen:

- Begrenzung der Ausbreitung von Feuer und Rauch innerhalb des Bauwerks
- Begrenzung der Ausbreitung von Feuer auf benachbarte Bauwerke
- Ermöglichung von Rettungsmaßnahmen für Bewohner des Gebäudes
- Berücksichtigung der Sicherheit der Rettungsmannschaften und wirksamer Löscharbeiten

3.5.2 Unterschiedliche Gebäudeeinstufung

Die Einstufung von Gebäuden und das damit zusammenhängende Schutzniveau erfolgt in Österreich, Deutschland und der Schweiz nach dem gleichen Grundprinzip. Mit steigender Geschoßanzahl und dem damit verbundenen steigenden Fluchtniveau werden sukzessive auch höhere Brandschutzanforderungen an das Gebäude gestellt. Übereinstimmung besteht auch bei der Begriffsbestimmung bzw. Einstufung von Hochhäusern - es handelt sich dabei um Gebäude mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m. Dieser auch als Hochhausgrenze bezeichnete Grenzwert resultiert aus der Möglichkeit, eine Personenrettung durch die Feuerwehr mittels Drehleiterfahrzeugen durchführen zu können.

Die Gliederung und Einstufung von Gebäuden unterhalb der Hochhausgrenze ist jedoch in Österreich, Deutschland und der Schweiz unterschiedlich. Sowohl Österreich als auch Deutschland unterscheiden zwischen fünf Gebäudeklassen, welche sich hauptsächlich durch das Fluchtniveau sowie die Größe der Nutzflächen unterscheiden. Es gibt jedoch im Detail Unterschiede zwischen den Einstufungen in Österreich und Deutschland. Die Festlegung der Gebäudeklassen ist in Österreich in den Begriffsbestimmungen des OIB

festgelegt [N4]. In Deutschland sind die Gebäudeklassen Bestandteil der jeweiligen Bauordnungen der einzelnen Bundesländer und können dadurch Abweichungen gegenüber der Definition der Deutschen Musterbauordnung aufweisen. Im Unterschied dazu wird in der Schweiz zwischen Bauten und Anlagen mit nicht mehr als drei Geschoßen bzw. mit vier und mehr Geschoßen bis zur Hochhausgrenze unterschieden.

Zusammenfassend besteht in D/A/CH übereinstimmend folgende überordnete Gliederung:

Gebäude niedriger Höhe

- D/A: Gebäudeklasse 1 bis 3
- CH: bis zu drei Geschoße

Gebäude mittlerer Höhe

- D/A: Gebäudeklasse 4 und 5
- CH: mehr als drei Geschoße

Hochhäuser

- D/A/CH: Fluchtniveau über 22 m

3.5.3 Brandszenarien

Übereinstimmung besteht im Hinblick auf die im Bereich von Außenwänden und Fassaden maßgeblichen Brandszenarien. Dabei ist die Art, der Ort und die Intensität des Entstehungsbrandes von wesentlicher Bedeutung für den Brandverlauf und die thermische Beanspruchung der Fassade bzw. Außenwand. Es wird zwischen den folgenden drei Brandszenarien unterschieden:

Szenario 1: Brand eines benachbarten Gebäudes

- Brandort: Nachbargebäude
- Einwirkungen: vorwiegend Wärmestrahlung an der Außenwand/Fassade
- zusätzlich Flugfeuer möglich
- Faktoren: Brandentwicklung, Gebäudeabstände

Szenario 2: Brand außerhalb eines Gebäudes

- Brandort: Terrassen, Balkone, Müllplätze, etc.
- Einwirkungen: direkte Flammeneinwirkung an der Außenwand/Fassade
- Faktoren: Art und Menge der Brandlast entscheidend

Szenario 3: Brand innerhalb eines Gebäudes (Raumbrand)

- Brandort: Innenraum mit Öffnungen in der Außenwand/Fassade
- Einwirkungen: thermische Belastung im Sturzbereich sowie an den Oberflächen
- Faktoren: Art und Menge der Brandlast sowie Ventilationsbedingungen

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

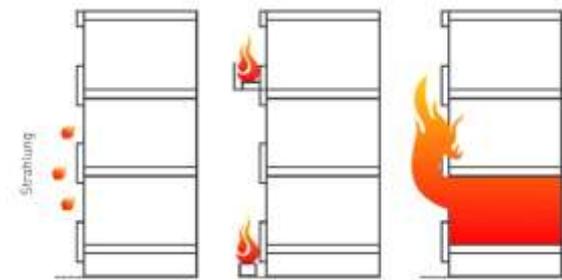


Abb. 3.22: unterschiedliche Brandszenarien im Bereich der Fassade [http://www.oefhf.at, 08.10.2017]

Das Szenario 3 eines Raumbrandes wird auf Grund von Untersuchungen von realen Schadenfeuern und Forschungen mit Naturbrandversuchen als Worst-Case-Szenario betrachtet. Bei der Beurteilung von Außenwänden und Fassaden wird daher im Sinne eines konservativen Ansatzes von einer Brandausbreitung durch eine Fensteröffnung in Folge eines Raumbrands ausgegangen.

3.5.4 Schutzziele für Außenwandverkleidungen bzw. Fassaden

Die zuvor beschriebenen Brandszenarien und die damit verbundene Brandausbreitung stellt die Grundlage für die Schutzziele für Außenwände bzw. Fassaden dar. Übereinstimmung besteht in Österreich, Deutschland und der Schweiz darin, dass eine Brandweiterleitung über Außenwandöffnungen nur durch einen rechtzeitigen Löschangriff der Feuerwehr vollständig verhindert werden kann. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Österreich und seinen beiden Nachbarländern besteht jedoch in der Anzahl der zu schützenden Geschoße im Fall einer Brandausbreitung an der Außenwand sowie in dem Zeitraum, der bis zum Beginn der Löscharbeiten vorgesehen ist. So gilt in Österreich die Anforderung, dass Fassaden ab der Gebäudeklassen 4 so auszuführen sind, dass eine Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoß und das Herabfallen großer Fassadenteile wirksam eingeschränkt wird. [N6], [N7]

In Deutschland und der Schweiz liegt diese Grenze um ein Geschoß höher, wobei der Zeitraum bis zum Eingreifen der Feuerwehr auf 20 bis 25 Minuten beschränkt ist. Das Schutzziel an der Gebäudeaußenwand wird von Kotthoff [17] folgendermaßen beschrieben: „Das baurechtliche Brandschutzziel an der Gebäudeaußenwand muss also darin bestehen, eine schnelle Brandausbreitung in das zweite bzw. das dritte Geschoss oberhalb bzw. unterhalb der Brandausbruchsstelle und damit eine nahezu zeitgleiche Brandentstehung zu verhindern.“ Die beiden folgenden Abbildungen verdeutlicht die unterschiedlichen Schutzziele anhand der unterschiedlichen Anzahl der zu schützenden Geschoße.

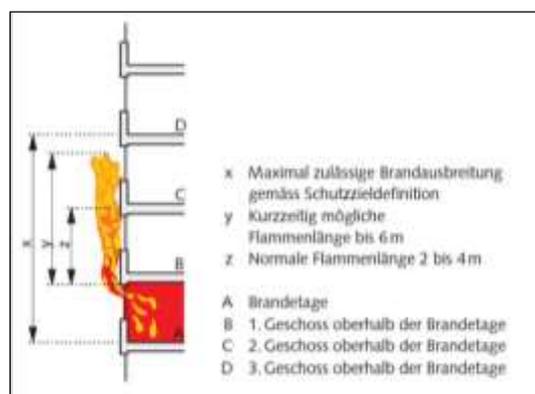


Abb. 3.23 (li.): Unterschiedliche Schutzziele: A: durchgezogene Linie, D/CH: strichlierte Linie [29]

Abb. 3.24 (re.): Schematische Darstellung der unterschiedlichen Schutzziele [4]

Weitere Unterschiede bestehen in den Anforderungen an das Brandverhalten der Baustoffe von Fassaden. In Österreich wird dies in Abhängigkeit von der Gebäudeklasse durch die OIB-Richtlinie 2 festgelegt und entspricht den harmonisierten Euroklassen laut EN 13501-1 [N26]. In Deutschland erfolgt ebenfalls eine Anpassung zur europäischen Klassifizierung des Brandverhaltens laut EN 13501-1 – zum Teil sind jedoch auch noch Anforderungen gemäß der nationalen Norm DIN 4102-1 in Verwendung. In der Schweiz werden Anforderungen an das Brandverhalten durch die Brandkennziffer, einer nationalen Standardisierung, festgelegt. Eine direkte Vergleichbarkeit hinsichtlich des Brandverhaltens von Fassaden ist daher schwierig – Übereinstimmung besteht darin, dass bei Hochhäusern keine brennbaren Baustoffe für Fassaden zulässig sind.

Auf die unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich des Feuerwiderstands von Außenwänden kann an dieser Stelle nicht im Detail eingegangen werden, da diese auf Grund der baurechtlichen Bestimmungen sehr unterschiedliche Anforderungen aufweisen und ein detaillierter Vergleich den Rahmen dieser Arbeit überschreiten würde. Einzelne Abweichungen werden in den folgenden Kapiteln zu Vorhang- und Doppelfassaden angeführt.

3.5.5 Vorhangfassaden

Bei Vorhangfassaden handelt es sich in der Regel um eine raumabschließende Gebäudehülle ohne tragende Funktion für das Bauwerk, daher können diese auch als nichttragende Außenwände betrachtet werden. Die national unterschiedlichen Anforderungen bezüglich des Brandverhaltens der Baustoffe wurden bereits im vorhergehenden Kapitel angeführt.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Österreich und Deutschland besteht darin, dass für Vorhangfassaden in Österreich grundsätzlich kein definierter Feuerwiderstand in den OIB-Richtlinien gefordert wird. Im Gegensatz dazu gilt in Deutschland für Gebäude ab der Gebäudeklasse 4 gemäß Musterbauordnung die Anforderung, dass nichttragende Außenwände entweder aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen müssen oder zumindest feuerhemmend ausgeführt sein müssen. [N3] Fenster (Außenwandöffnungen) in diesen Außenwänden sind von diesen Anforderungen jedoch ausgenommen. Kotthoff interpretiert dies wie folgt: *„Diese baurechtlichen Anforderungen an das raumabschließende Bauteil Außenwand legen den Schwerpunkt auf den Erhalt der Standsicherheit des Gebäudes, beinhalten aber keine Forderungen, die den Flammenaustritt auf die Fassade verhindern und den Flammenüberschlag in andere Geschoße begrenzen können [...]“* [17]

In der Schweiz werden die Brandschutzmaßnahmen von Fassaden in Abhängigkeit vom jeweiligen Fassadentyp bestimmt. Die Fassadentypologie der Schweiz unterscheidet sich jedoch deutlich, da sie auch Merkmale wie z.B. Fensterbänder, durchgehende Balkone oder Rücksprünge von Geschoßen beinhaltet. Eine direkte Vergleichbarkeit des Fassadentyps „Vorhangfassade“ mit den österreichischen und deutschen Brandschutzanforderungen ist dadurch nicht ohne weiteres möglich.

3.5.6 Doppelfassaden

Dieser Fassadentypus wird in Österreich, Deutschland als auch der Schweiz nach unterschiedlichen Kriterien gegliedert und auch die damit verbundenen Brandschutzanforderungen sind verschieden.

In Österreich unterscheidet man je nach Ventilationsbedingungen im Zwischenfassadenbereich zwischen drei Arten von Doppelfassaden:

- Kanaldoppelfassade (siehe Abb. 3.17)
- Ganzflächendoppelfassade (siehe Abb. 3.18)

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

- Kastendoppelfassade (siehe Abb. 3.19)

Grundsätzlich gelten auch für Doppelfassaden die zielorientierten Anforderungen, dass Fassaden ab der Gebäudeklassen 4 so auszuführen sind, dass eine Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoß und das Herabfallen großer Fassadenteile wirksam eingeschränkt wird. Für Kastendoppelfassaden erfolgt der Nachweis durch einen standardisierten Prüfversuch gemäß ÖNORM B 3800-6 [N16]. Für die beiden anderen Doppelfassadentypen liegen keine genormte Prüfverfahren vor.

Im Unterschied dazu wird in Deutschland, baurechtlich gesehen, die äußere Fassadenebene einer Doppelfassade als eigentliche Fassadenebene (nichttragende Außenwand) betrachtet. Zwischen der inneren und der äußeren Fassadenebene sind aus baurechtlicher Sicht Deckendurchbrüche in der Ebene der Trenndecken vorhanden, welche gemäß Musterbauordnung nur bei Gebäuden mit bis zu zwei Geschoßen ohne Abschottung zulässig sind. Bei Gebäuden mit einer größeren Geschoßanzahl müssen Deckendurchbrüche die gleiche Feuerwiderstandsfähigkeit wie die Trenndecke aufweisen – diese Anforderung gilt auch für den Zwischenfassadenbereich von Doppelfassaden. [23]

In der Schweiz wird laut Brandschutzerläuterung der Vereinigung kantonaler Feuerversicherungen zwischen drei Typen von Doppelfassaden unterschieden:

- Typ A: Doppelfassade mit Segmentierungen mit Feuerwiderstand
- Typ B: Doppelfassade ohne Segmentierungen oder mit Segmentierungen ohne Feuerwiderstand
- Typ C: Doppelfassade mit Innenfassade mit Feuerwiderstand und fester Verglasung

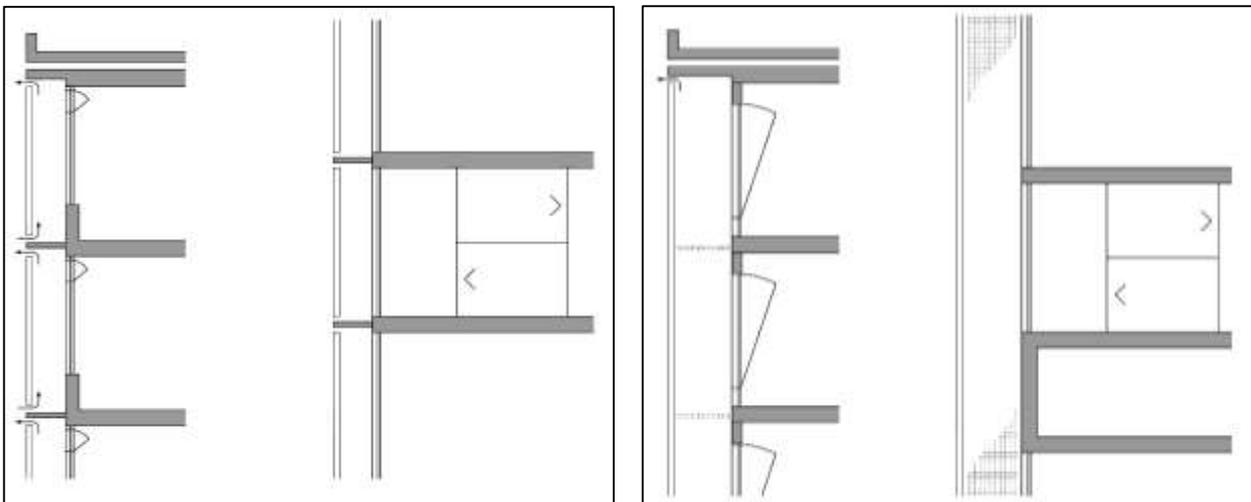


Abb. 3.25 (li.): Typ A: Doppelfassade mit Segmentierungen mit Feuerwiderstand [N1]

Abb. 3.26 (re.): Typ B: Doppelfassade ohne Segmentierungen oder mit Segmentierungen ohne Feuerwiderstand [N1]

Art und Umfang der erforderlichen Brandschutzmaßnahmen für den jeweiligen Fassadentyp richten sich dabei nach verschiedenen Faktoren (z.B. Geschoßanzahl, Nutzungsart, Brandlast und Personengefährdung). Alternativlösungen sowie Kombinationen vorgeschriebener Lösungsmöglichkeiten sind möglich, sofern ein gleichwertiges Sicherheitsniveau erreicht wird. Explizit untersagt sind Lösung von Sprinkler- und Sprühflutanlagen, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen bzw. brandfallgesteuerten Fensterflügeln nur in der Pufferzone (Fassadenzwischenbereich). [N1]

3.6 Leistungsanforderungen der OIB-Richtlinien an Vorhang- und Doppelfassaden in Österreich

An dieser Stelle wird - auch im Hinblick auf den nachfolgenden experimentellen Teil dieser Arbeit - auf die Brandschutzanforderungen hinsichtlich Vorhang- und Doppelfassaden in Österreich eingegangen. Die von Österreichischem Institut für Bautechnik herausgegebene Richtlinien werden folgendermaßen beschrieben:

„Die OIB-Richtlinien dienen der Harmonisierung der bautechnischen Vorschriften in Österreich. Sie werden vom Österreichischen Institut für Bautechnik nach Beschluss in der Generalversammlung herausgegeben und stehen damit den Bundesländern zur Verfügung. Die Bundesländer können die OIB-Richtlinien in ihren Bauordnungen für verbindlich erklären, was bereits in acht Bundesländern der Fall ist. Von den OIB-Richtlinien kann jedoch gemäß den Bestimmungen in den diesbezüglichen Verordnungen der Bundesländer abgewichen werden, wenn der Bauwerber nachweist, dass ein gleichwertiges Schutzniveau erreicht wird, wie bei Einhaltung der OIB-Richtlinien. Dies soll die notwendige Flexibilität für innovative architektonische und technische Lösungen sicherstellen.“ [W3]

Die OIB-Richtlinien sind in Übereinstimmung mit den Grundanforderungen für Bauwerke der Bauprodukteverordnung wie folgt gegliedert:

- Richtlinie 1 – Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
- Richtlinie 2 – Brandschutz
- Richtlinie 2.1 – Brandschutz bei Betriebsbauten
- Richtlinie 2.2 – Brandschutz bei Garagen, überdachten Stellplätzen und Parkdecks
- Richtlinie 2.3 – Brandschutz bei Gebäuden mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m
- Richtlinie 3 – Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
- Richtlinie 4 – Nutzungssicherheit und Barrierefreiheit
- Richtlinie 5 – Schallschutz
- Richtlinie 6 – Energieeinsparung und Wärmeschutz

In Zusammenhang mit der Thematik dieser Arbeit werden in diesem Kapitel nur die OIB Richtlinie 2 [N6] und die OIB Richtlinie 2.3 [N8] betreffend Vorhang- und Doppelfassaden ausführlicher erläutert.

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

3.6.1 Vorhangfassaden

Folgende Anforderungen sind für Vorhangfassaden zu berücksichtigen:

- Brandverhalten des Gesamtsystems bzw. der Einzelkomponenten entsprechend OIB RL 2, Tab.1

Gebäudeklassen (GK)	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5	
					≤ 6 oberirdische Geschoße	> 6 oberirdische Geschoße
1 Fassaden						
1.1 Außenwand-Wärmedämmverbundsysteme	E	D	D	C-d1	C-d1	C-d1
1.2 Fassadensysteme, vorgehängte hinterlüftete, belüftete oder nicht hinterlüftete						
1.2.1 Gesamtsystem oder	E	D-d1	D-d1	B-d1 ⁽¹⁾	B-d1 ⁽¹⁾	B-d1
1.2.2 Einzelkomponenten						
- Außenschicht	E	D	D	A2-d1 ⁽²⁾	A2-d1 ⁽²⁾	A2-d1 ⁽³⁾
- Unterkonstruktion stabförmig / punktförmig	E / E	D / D	D / A2	D / A2	D / A2	C / A2
- Dämmschicht bzw. Wärmedämmung	E	D	D	B ⁽²⁾	B ⁽²⁾	B ⁽³⁾
1.3 sonstige Außenwandbekleidungen oder -beläge	E	D-d1	D-d1	B-d1 ⁽⁴⁾	B-d1 ⁽⁴⁾	B-d1
1.4 Gebäudetrennfugenmaterial	E	E	E	A2	A2	A2
1.5 Geländerfüllungen bei Balkonen, Loggien u. dgl.	-	-	-	B ⁽⁴⁾	B ⁽⁴⁾	B
<small>(1) Es sind auch Holz und Holzwerkstoffe in D zulässig, wenn das Gesamtsystem die Klasse D-d0 erfüllt;</small>						
<small>(2) Bei einer Dämmschicht/Wärmedämmung in A2 ist eine Außenschicht in B-d1 oder aus Holz und Holzwerkstoffen in D zulässig;</small>						
<small>(3) Bei einer Dämmschicht/Wärmedämmung in A2 ist eine Außenschicht in B-d1 zulässig;</small>						
<small>(4) Es sind auch Holz und Holzwerkstoffe in D zulässig;</small>						

Abb. 3.27: Anforderung an das Brandverhalten von Fassaden [N6]

Zusätzliche Anforderungen ab der Gebäudeklasse 4 gemäß OIB Richtlinie 2, Pkt. 3.5.9, so dass

- eine Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoß,
- das Herabfallen großer Fassadenteile und
- eine Brandausbreitung über Anschlussfugen und Hohlräume innerhalb der Vorhangfassade im Bereich von Trenndecken bzw. brandabschnittsbildenden Decken wirksam eingeschränkt werden.

Diese Anforderungen werden gemäß den Erläuterungen zur OIB-Richtlinie 2 folgendermaßen begründet:

„Es wurde festgelegt, dass erst bei Gebäuden der Gebäudeklassen 4 und 5 Fassaden so auszuführen sind, dass eine Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoß und das Herabfallen großer Fassadenteile wirksam eingeschränkt wird. Diese zielorientierte Anforderung wird jedenfalls erfüllt, wenn ein positiver Prüfbericht einer hierfür akkreditierten Prüfstelle gemäß ÖNORM B 3800-5, Ausgabe 2013-04-15 vorliegt. Für Gebäude der Gebäudeklassen 1 bis 3 müssen für Fassaden somit nur die Anforderungen an das Brandverhalten gemäß Tabelle 1a der OIB-Richtlinie 2 eingehalten werden. [...]

Auch Vorhangfassaden stellen brandschutztechnisch ein besonderes Risiko dar, wenn keine vorbeugenden Maßnahmen getroffen werden. Dies betrifft vor allem eine Brandausbreitung über Anschlussfugen und Hohlräume im Bereich der anschließenden Decke innerhalb der Vorhangfassade.

Da die einzelnen Maßnahmen aber vielfältig und vom Gebäudetyp bzw. der Ausgestaltung der Fassaden abhängig sind, wurden nur zielorientierte Anforderungen für Doppelfassaden und Vorhangfassaden in den Punkten 3.5.8 und 3.5.9 festgehalten, wobei lit. a und lit. b auf die Inhalte der ÖNORM B 3800-5, Ausgabe 2013-04-15 abzielt und lit. c technische Ausführungsdetails intendiert.“[N7]

Weitere Anforderungen ab der Gebäudeklasse 5 gemäß OIB Richtlinie 2, Pkt. 3.3:

- Begrenzung der vertikalen Brandausbreitung bei Nichtwohngebäuden der Gebäudeklasse 5 mit mehr als sechs oberirdischen Geschoßen (deckenübergreifender Außenwandsteifen)

Diese Anforderung wird gemäß den Erläuterungen zur OIB-Richtlinie 2 folgendermaßen begründet:

„Um die vertikale Brandausbreitung über die Fassade zu begrenzen, wurde erst für Gebäude ab der Gebäudeklasse 5 mit mehr als sechs oberirdischen Geschoßen – ausgenommen Wohngebäude – ein deckenübergreifender Außenwandstreifen mit einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten aus Baustoffen der Klasse A2 gefordert. Anstelle des deckenübergreifenden Außenwandstreifens werden auch bauliche bzw. anlagentechnische Alternativen ermöglicht.“ [N7]

Für Hochhäuser mit einem Fluchtniveau über 22 m ist gemäß OIB Richtlinie 2.3 ein höheres Sicherheitsniveau erforderlich, daher gelten für Vorhangfassaden folgende Anforderungen:

- Brandverhalten der Fassade gemäß folgender Tabelle:

1 Fassaden		
1.1	Außenwand-Wärmedämmverbundsysteme	A2-d1
1.2	Fassadensysteme, vorgehängte hinterlüftete, belüftete oder nicht hinterlüftete	
1.2.1	Gesamtsystem oder	A2-d1
1.2.2	Einzelkomponenten	
	- Außenschicht	A2-d1
	- Unterkonstruktion stabförmig / punktförmig	A2 / A2
	- Dämmschicht bzw. Wärmedämmung	A2
1.3	sonstige Außenwandbekleidungen oder -beläge	A2-d1
1.4	nichttragende Außenwandbauteile	A2-d1
1.5	Gebäudetrennfugenmaterial	A2
1.6	Geländerfüllungen bei Balkonen, Loggien u. dgl.	A2

Abb. 3.28: Anforderung an das Brandverhalten von Fassaden [N8]

- Vorhangfassaden sind so auszuführen, dass
 - (a) eine Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoß, das Herabfallen großer Fassadenteile und
 - (b) eine Brandausbreitung über Anschlussfugen und Hohlräume innerhalb der Vorhangfassade im Bereich von Trenndecken bzw. brandabschnittsbildenden Decken wirksam eingeschränkt werden.

- Begrenzung der vertikalen Brandausbreitung durch eine der folgenden Maßnahmen:

„In jedem oberirdischen Geschoß muss ein deckenübergreifender Außenwandstreifen von mindestens 1,20 m Höhe in EI 90 und A2 vorhanden sein oder die brandabschnittsbildende Decke muss mit einem mindestens 0,80 m horizontal auskragenden Bauteil gleicher Feuerwiderstandsklasse verlängert werden. Die Anforderung an den Feuerwiderstand gilt nicht, wenn eine geeignete Löschanlage zur Verhinderung der vertikalen Brandausbreitung oder eine automatische Sprinkleranlage vorhanden ist.“ [N8]

3.6.2 Doppelfassaden

Folgende Anforderungen sind für Doppelfassaden zu berücksichtigen:

- Brandverhalten des Gesamtsystems bzw. der Einzelkomponenten entsprechend OIB RL 2, Tab.1 (siehe Abb. 3.27)

Zusätzliche Anforderungen ab der Gebäudeklasse 4 gemäß OIB Richtlinie 2, Pkt. 3.5.8, so dass

- eine Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoß,

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

- das Herabfallen großer Fassadenteile und
- eine Brandausbreitung über die Zwischenräume im Bereich von Trenndecken bzw. brandabschnittsbildenden Decken wirksam eingeschränkt werden.

Diese Anforderungen werden gemäß den Erläuterungen zur OIB-Richtlinie 2 folgendermaßen begründet:

„Doppelfassaden wirken sich in brandschutztechnischer Sicht gegenüber konventionellen Fassaden vor allem in folgender Hinsicht nachteilig aus:

- *„Kanalisierung“ von Feuer und Rauch im Zwischenraum und daher schnellere Brandausbreitung über den Zwischenraum in oberhalb gelegene Geschoße.*
- *Gefährdete Personen können sich infolge des verrauchten Zwischenraumes für die Feuerwehr nur schwer bemerkbar machen.*
- *Für die Feuerwehr ist ein Löschangriff von außen praktisch nicht durchführbar, da eine mechanische Zerstörung der Verkleidung mit Mitteln der Feuerwehr in der Regel nicht möglich ist und eine Zerstörung durch Brandeinwirkung – wenn überhaupt – erst sehr spät eintreten wird.*

Da die einzelnen Maßnahmen aber vielfältig und vom Gebäudetyp bzw. der Ausgestaltung der Fassaden abhängig sind, wurden nur zielorientierte Anforderungen für Doppelfassaden und Vorhangfassaden in den Punkten 3.5.8 und 3.5.9 festgehalten, wobei lit. a und lit. b auf die Inhalte der ÖNORM B 3800-5, Ausgabe 2013-04-15 abzielt und lit. c technische Ausführungsdetails intendiert. [...]

Für Kasten-Doppelfassaden (2-schalige Fassade) gelten die zielorientierten Anforderungen gemäß Punkt 3.5.8 jedenfalls als erfüllt, wenn ein positiver Prüfbericht gemäß ÖNORM B 3800-6, Ausgabe 2013-04-15 vorliegt.“ [N7]

Weitere Anforderungen ab der Gebäudeklasse 5 gemäß OIB Richtlinie 2, Pkt. 3.3:

- Begrenzung der vertikalen Brandausbreitung bei Nichtwohngebäuden der Gebäudeklasse 5 mit mehr als sechs oberirdischen Geschoßen (deckenübergreifender Außenwandsteifen)

Für Hochhäuser mit einem Fluchtniveau über 22 m ist gemäß OIB Richtlinie 2.3 ein höheres Sicherheitsniveau erforderlich, daher gelten für Doppelfassaden folgende Anforderungen:

- Brandverhalten der Fassade sinngemäß wie bei Vorhangfassaden
- Vorhangfassaden sind so auszuführen, dass
 - (a) eine Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoß, das Herabfallen großer Fassadenteile und
 - (b) eine Brandausbreitung über die Zwischenräume im Bereich von Trenndecken bzw. brandabschnittsbildenden Decken wirksam eingeschränkt werden
- Begrenzung der vertikalen Brandausbreitung sinngemäß wie bei Vorhangfassaden

3.7 Brandschutztechnische Risiken von geklebten Holz-Glas-Fassaden

Grundsätzlich sind auch bei Anwendungen von geklebten Holz-Glas-Fassaden die zuvor angeführten Anforderungen für Vorhang- bzw. Doppelfassaden einzuhalten bzw. nachzuweisen. Neben den Anforderungen an das Brandverhalten der Einzelkomponenten des Fassadensystems sind zusammenfassend für Fassadenanwendungen für Gebäude ab der Gebäudeklasse 4 folgende Leistungsanforderungen nachzuweisen:

- Verhinderung der Brandweiterleitung über die Fassadenoberfläche auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoß
- Keine Gefährdung von Personen und Rettungsmannschaften durch das Herabfallen großer Fassadenteile
- Verhinderung der Brandausbreitung über Zwischenräume bzw. Anschlussfugen und Hohlräume im Bereich von Trenndecken

Diese brandschutztechnischen Anforderungen, welche den Stand der Technik gemäß den Richtlinien des Österreichischen Instituts für Bautechnik darstellen, schließen Anwendungen von geklebten Holz-Glas-Fassaden bei mehrgeschoßigen Objekten bis zur Gebäudeklasse 5 a priori nicht aus. Bei Gebäuden mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m (Hochhäusern) gilt jedoch auf Grund des erhöhten Sicherheitsniveaus die Anforderung, dass Fassaden ausschließlich aus nichtbrennbaren Einzelkomponenten bestehen müssen – dies ist mit HGV-Fassaden, welche zum Teil brennbaren Bestandteilen aufweisen, nicht gegeben. Ein Abweichen von diesen Anforderungen ist nur dann zulässig, wenn das gleiche Schutzniveau in Verbindung mit entsprechenden Kompensationsmaßnahmen nachgewiesen werden kann.

Zusammenfassend können bei HGV-Fassadenanwendungen für mehrgeschoßige Gebäude auf Grund der spezifischen Bauweise folgende brandschutztechnische Risiken maßgeblich sein:

- Brennbarkeit von Einzelkomponenten (Holz-Unterkonstruktion, Koppelleiste) des Fassadensystems
- Einhalten des gleichen Schutzniveaus bei Verwendung brennbarer Materialien im Fassadenbereich bei Hochhäusern mit einem Fluchtniveau über 22 m
- Versagen der aussteifenden Funktion der HGV-Fassadenelemente im Brandfall, sofern diese als statisch wirksame Bauteile für die Gebäudeaussteifung konzipiert sind

4 Entwurf und Evaluierung geklebter Holz-Glas-Fassadenvarianten

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Fassadenvarianten unter Berücksichtigung der Verbundbauweise von geklebten Holz-Glas-Fassaden entworfen. Es handelt sich dabei sowohl um Vorhangfassaden als auch um Doppelfassaden. Bei Entwurf und Detailierung der in diesem Abschnitt entwickelten Fassadentypen wurde der Schwerpunkt auf folgende Planungsprämissen gelegt:

Architektur

- Es wird eine transparente Gebäudehülle mit Holz-Glas-Elementen angestrebt.
- Bürotrennwandanschlüsse sind an jeder Fassadenachse möglich.
- In jedem zweiten Fassadenfeld wird ein Öffnungsflügel angeordnet.

Tragwerksplanung

- HGV-Elemente werden als aussteifende Elemente für Horizontalkräfte eingesetzt.
- Die maximal zulässige Verformung eines Fassadenelements beträgt $H/500$.
- Die Eigengewichtsabtragung der verklebten Verglasung erfolgt mit mechanischen Auflagern.
- Die innere Verglasung wird als absturzsichernde Verglasung bemessen.
- Die äußere Verglasung wird mechanisch gesichert.

Brandschutz

- Verhinderung der Brandweiterleitung auf das zweite über dem Brandherd gelegene Geschoß
- Verhinderung des Herabfallens von großen Teilen der Fassade
- Begrenzung der vertikalen Brandausbreitung
- Maßnahmen bei Verlust der HGV-Aussteifung im Brandfall

Bauphysik

- Isolierverglasungen mit einem U-Wert von mindestens $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Reduktion der Wärmebrücken durch Holzunterkonstruktion
- Außenliegender Sonnenschutz gegen sommerliche Überwärmung

Technische Gebäudeausrüstung

- Mechanische Lüftung durch öffnenbare Elemente als Haupt- oder Zusatzlüftung
- Blendschutz durch außenliegenden Sonnenschutz

Ökologie/Ökonomie

- Verwendung von nachhaltigen und rezyklierfähigen Baustoffen (Holz und Glas)
- Ressourceneinsparung durch den Einsatz von HGV-Fassadenelementen
- Öffnenbare Elemente zur Reduktion der Wartungs- und Instandhaltungskosten
- Verwendung serieller Elemente und Anschlußdetails

Vorfertigung/Montage

- hoher Vorfertigungsgrad mit modularen Elementen
- leichte Handhabung der Module (max. Gesamtgewicht ca. 650 kg)
- elementweise Demontage für Reparaturarbeiten

4.1 Fassadensystem HGV-EF 01

- Fassadentyp:** Vorhangfassade
Bauart: Pfosten-Riegel-Fassade
Geometrie: Fassadenraster 130-135 cm, Geschoßhöhe 320 – 340 cm
HGV-Elemente: jede zweite Achse, B/H = 130/280 cm bis 135/300 cm

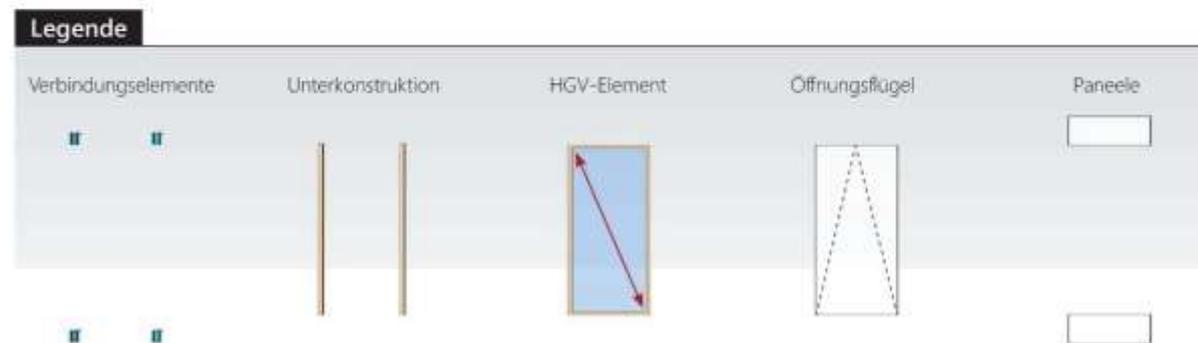
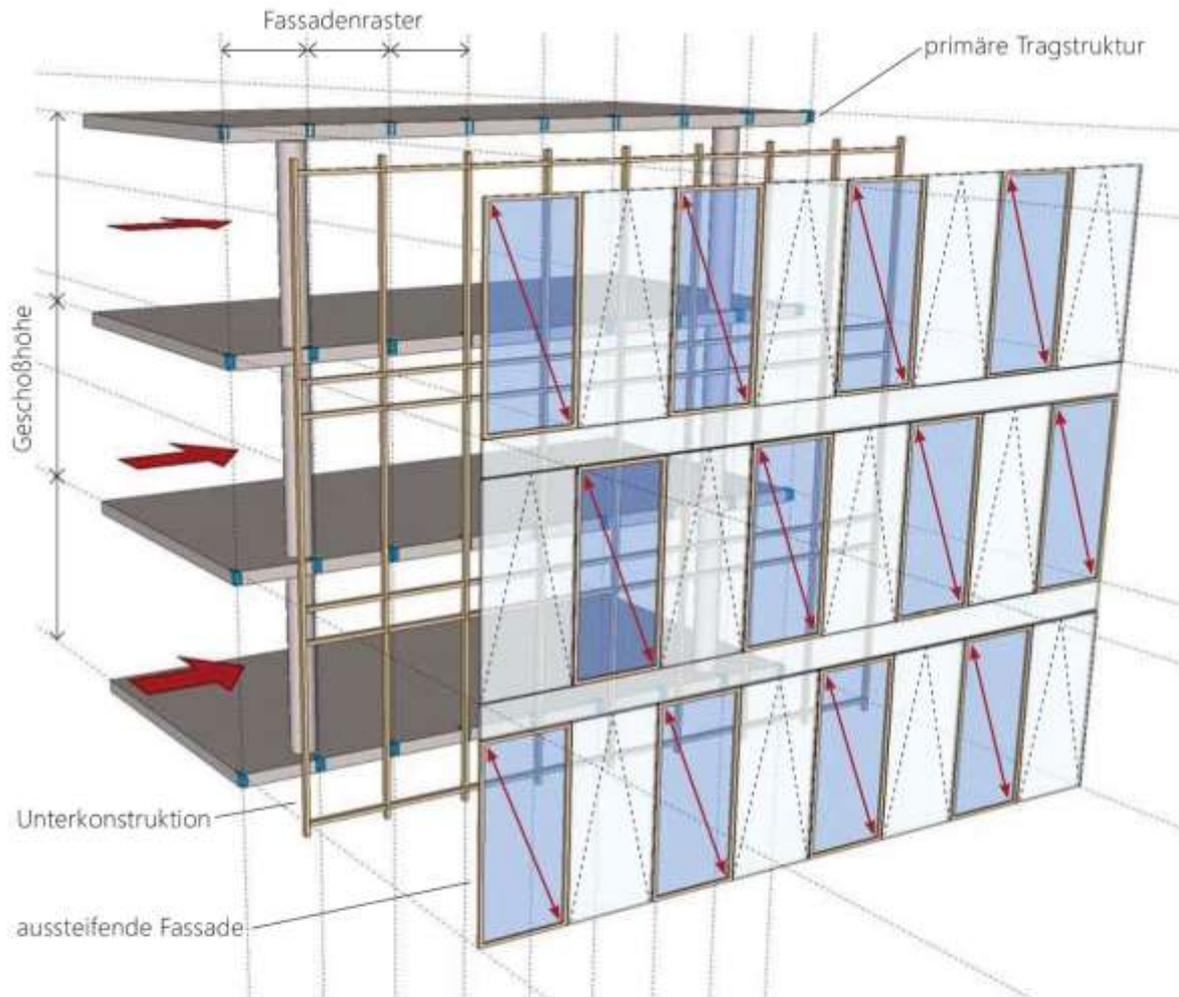
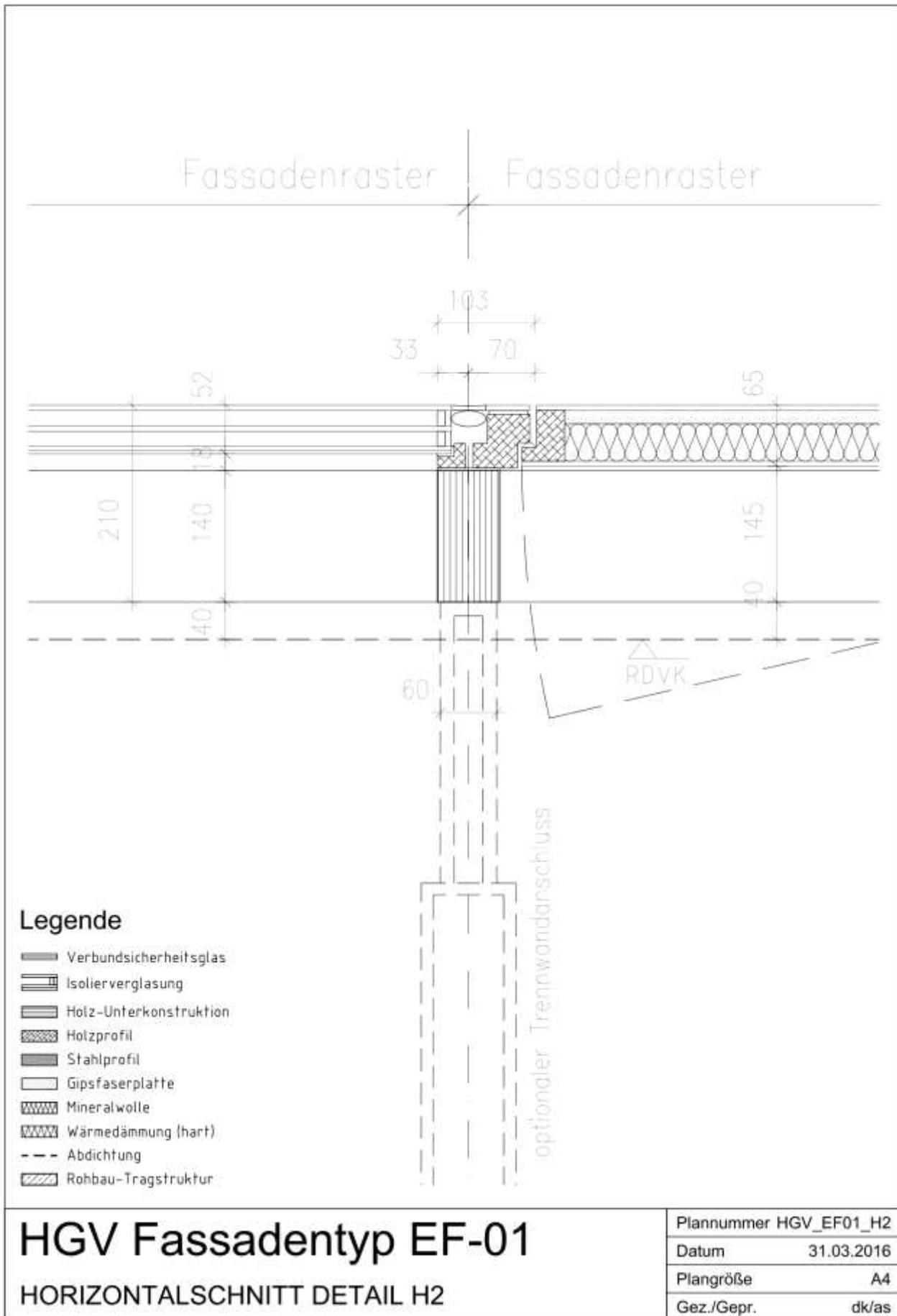
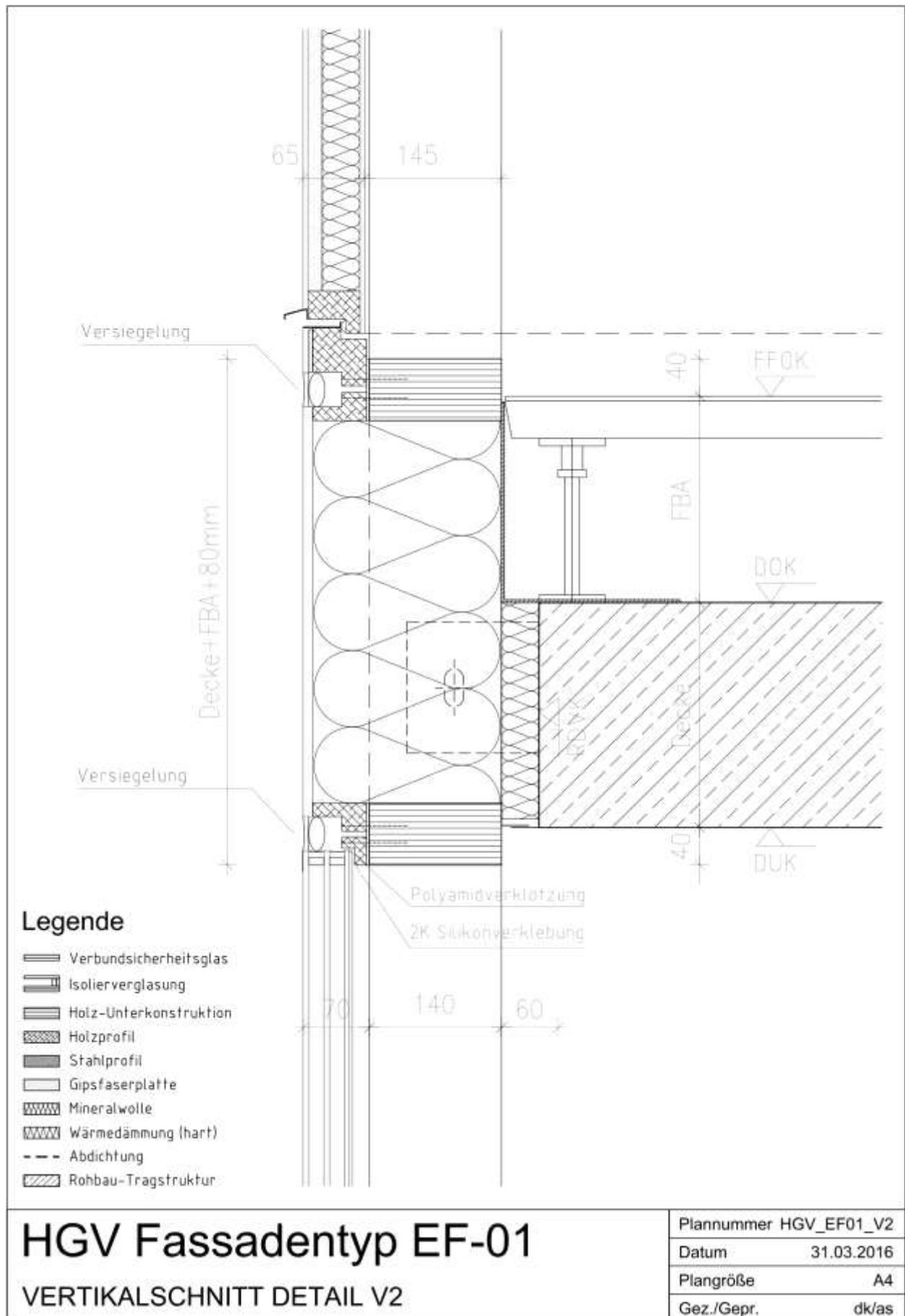


Abb. 4.1: Explosionszeichnung Fassadentyp HGV-EF01 [eigene Darstellung]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall





4.2 Fassadensystem HGV-EF 02

- Fassadentyp:** Vorhangfassade
Bauart: Elementfassade
Geometrie: Fassadenraster 130-135 cm, Geschoßhöhe 320 – 340 cm
HGV-Elemente: jede zweite Achse, B/H = 190/280 cm bis 200/300 cm

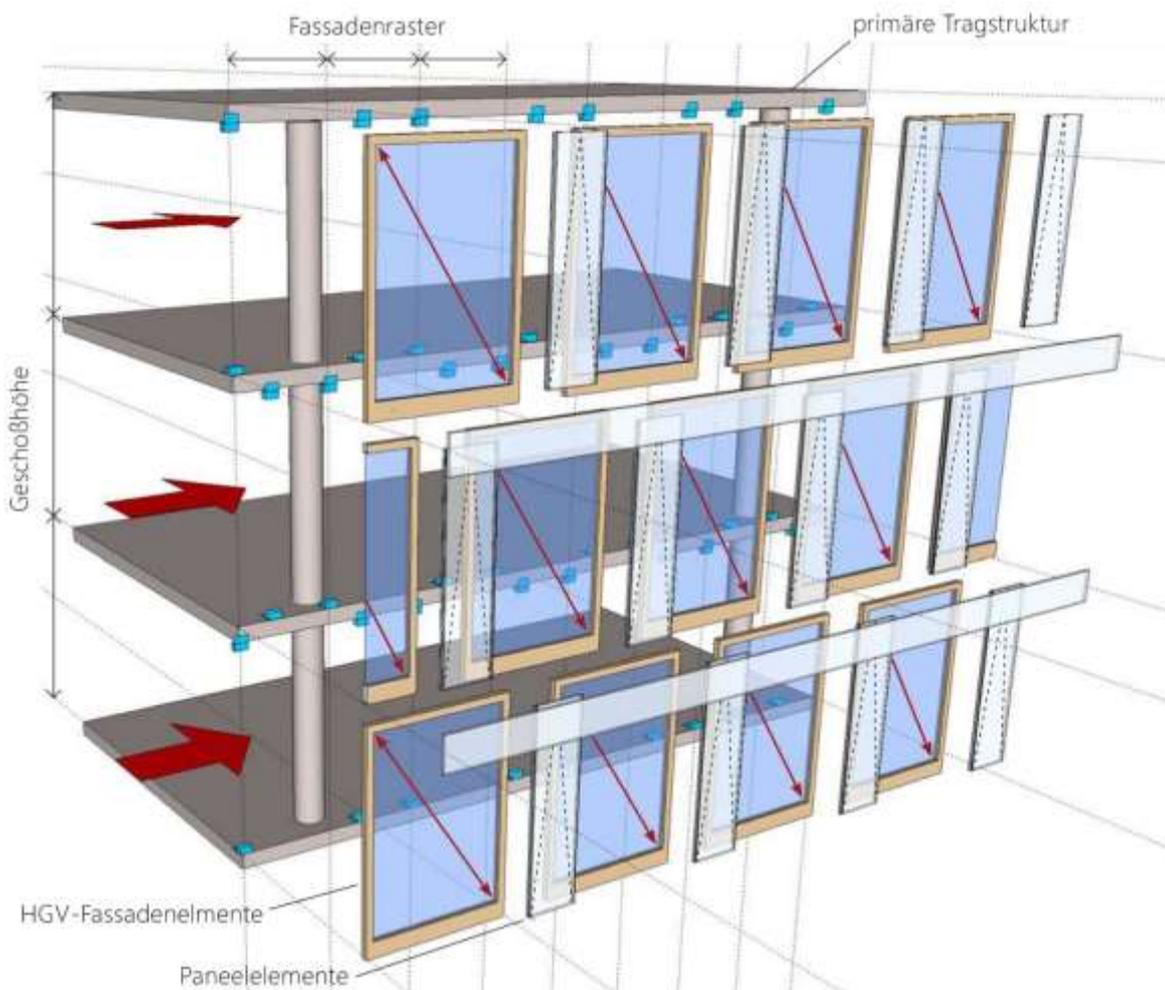
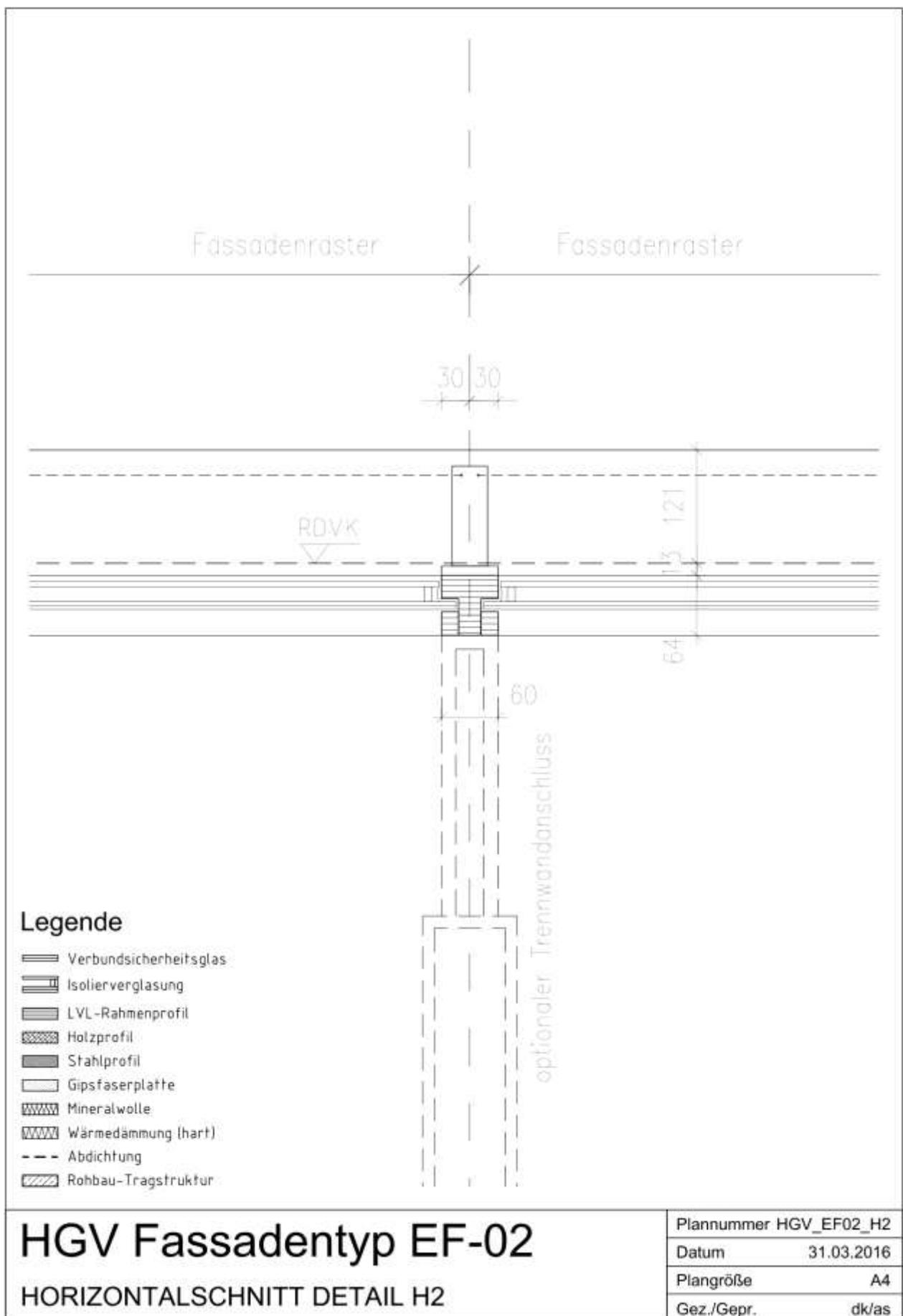
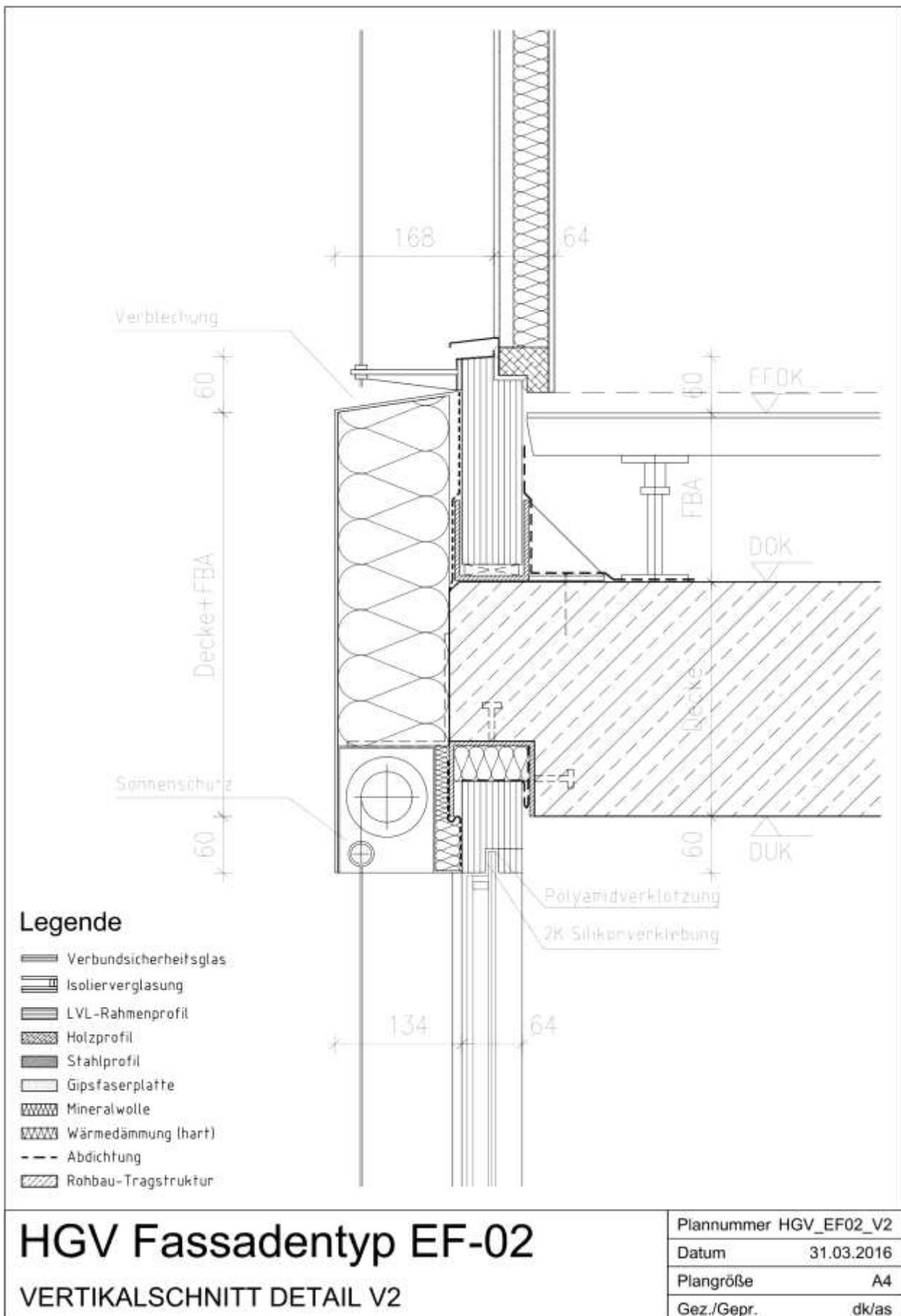


Abb. 4.2: Explosionszeichnung Fassadentyp HGV-EF02 [eigene Darstellung]



Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall



4.3 Fassadensystem HGV-DF 01

- Fassadentyp:** Kastendoppelfassade
Bauart: Elementfassade (innere Ebene) mit Prallscheibe (äußere Ebene)
Geometrie: Fassadenraster 130-135 cm, Geschoßhöhe 320 – 340 cm
HGV-Elemente: über 1,5 Fassadenachsen, B/H = 190/280 cm bis 200/300 cm, innere Fassadenebene

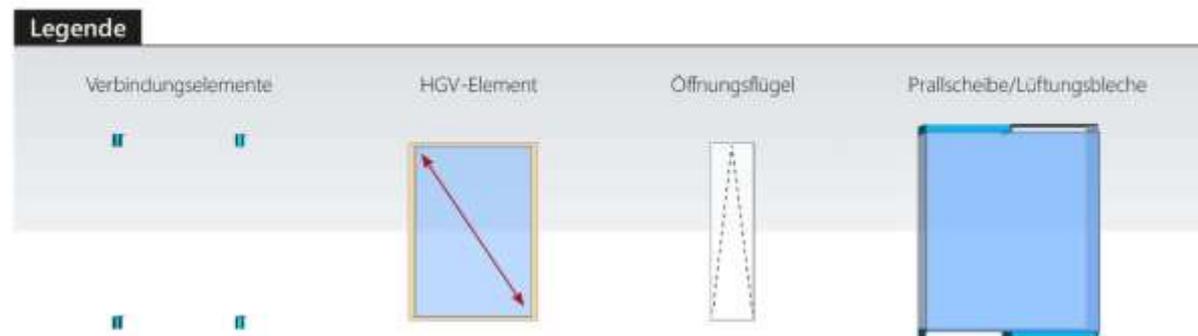
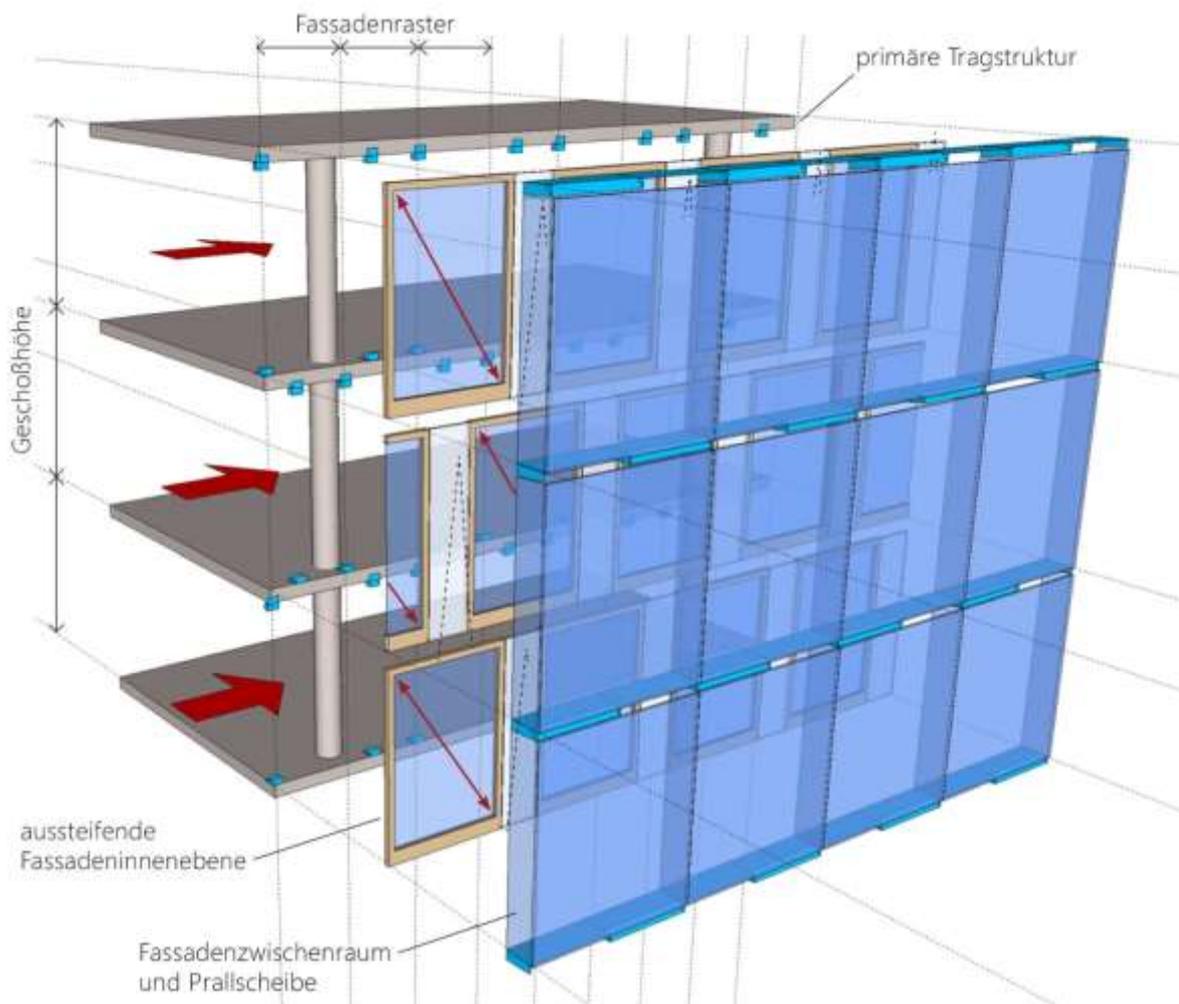
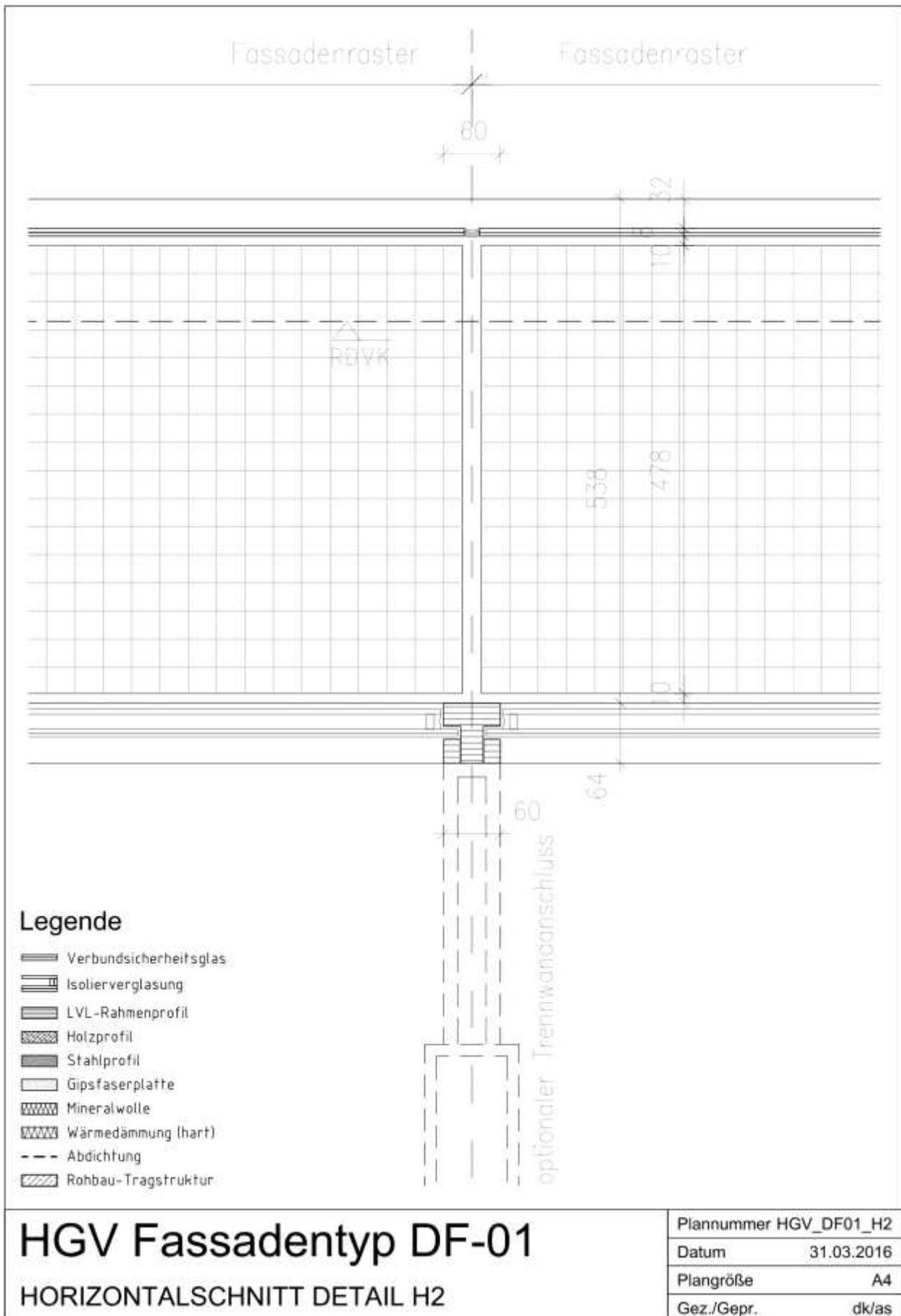
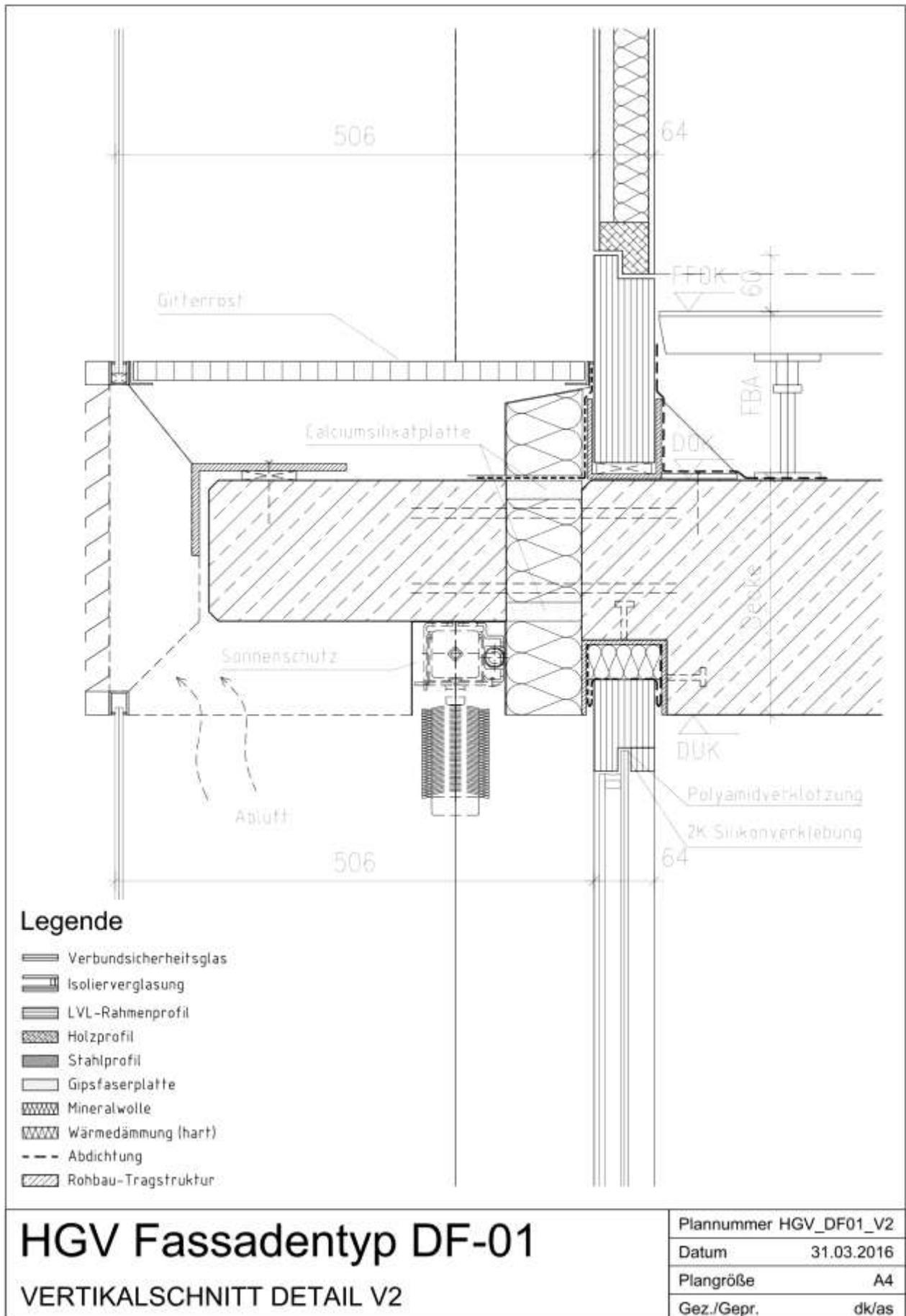


Abb. 4.3: Explosionszeichnung Fassadentyp HGV-D01 [eigene Darstellung]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall





4.4 Fassadensystem HGV-DF 02

- Fassadentyp:** Kastendoppelfassade
Bauart: Elementfassade
Geometrie: Fassadenraster 130-135 cm, Geschoßhöhe 320 – 340 cm
HGV-Elemente: über 2 Fassadenachsen, B/H = 260/300 cm bis 270/330 cm, innere Fassadenebene

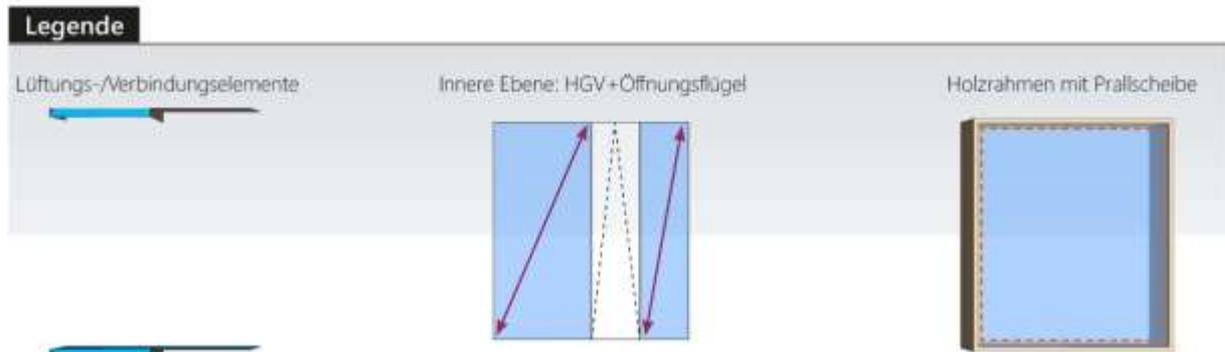
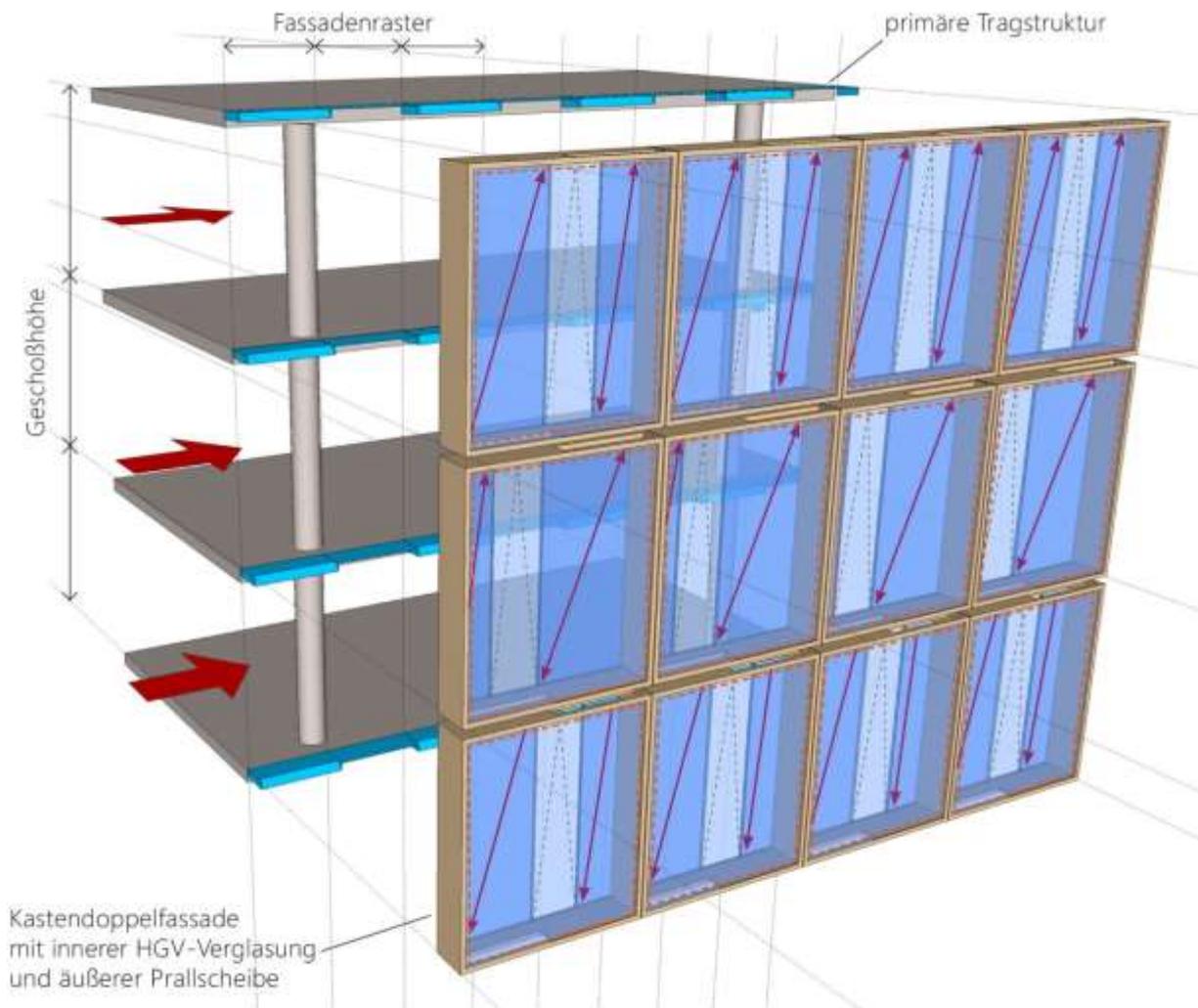
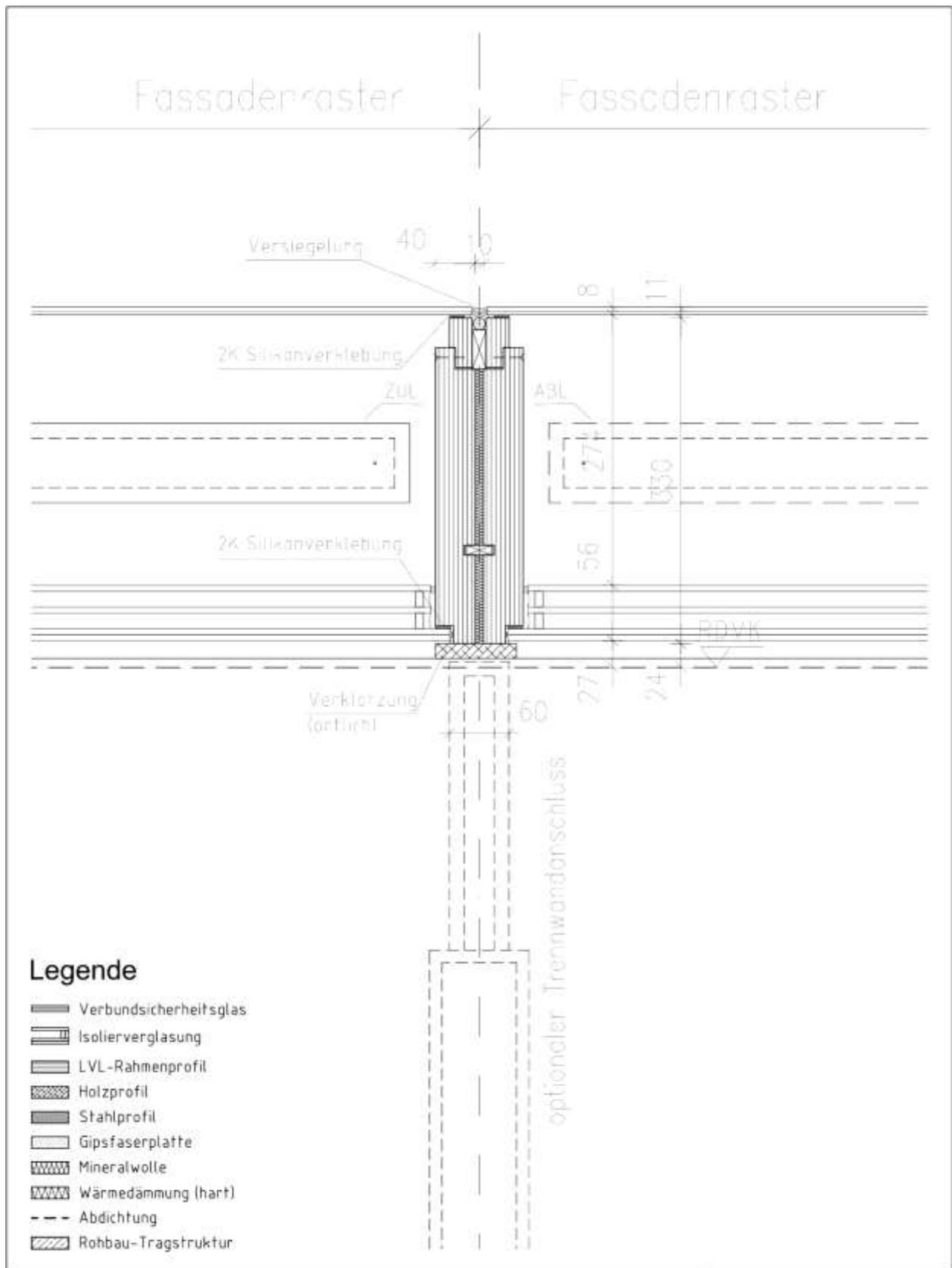


Abb. 4.4: Explosionszeichnung Fassadentyp HGV-DF02 [eigene Darstellung]



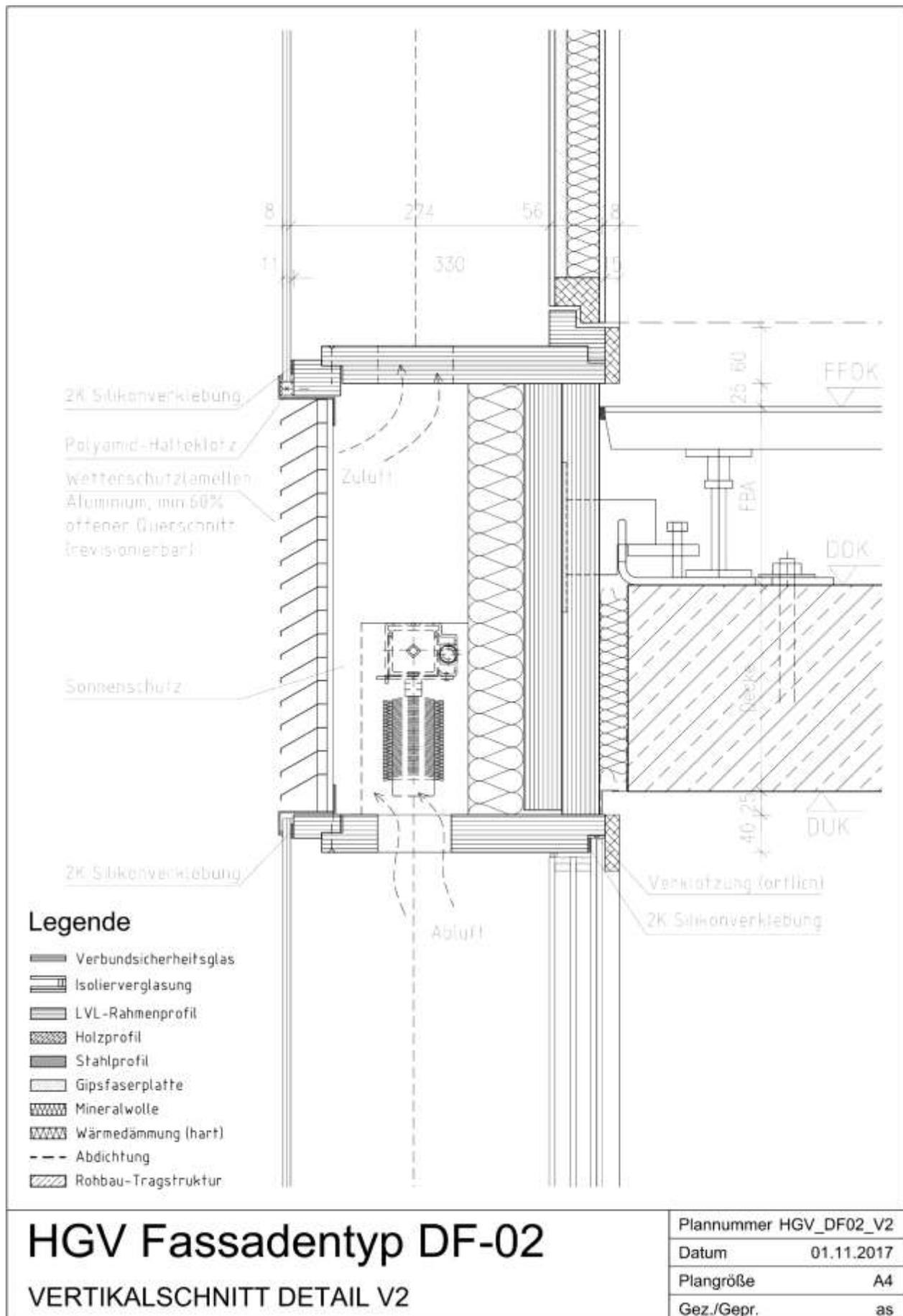
HGV Fassadentyp DF-02

HORIZONTALSCHNITT DETAIL H2

Plannummer	HGV_DF02_H2
Datum	01.11.2017
Plangröße	A4
Gez./Gepr.	as

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall



4.5 Evaluierung der Fassadenvarianten

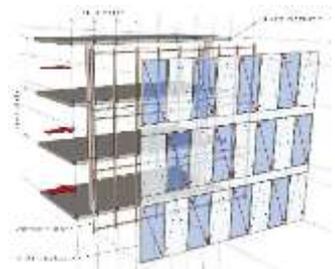
Die Evaluierung der entwickelten HGV-Fassadentypen erfolgte unter Berücksichtigung der zu Beginn dieses Abschnitts angeführten Planungsparameter. Da architektonische, statische und brandschutztechnische Aspekte bei den in dieser Forschungsarbeit entworfenen Fassadensystemen im Vordergrund stehen, wurden diese mit jeweils drei Bewertungskriterien stärker gewichtet. Die übrigen Aspekte wurden jeweils mit nur einem Kriterium bewertet - dabei wurde für jeden Themenbereich ein besonders relevanter Aspekt ausgewählt. Durch die reduzierte Anzahl der Kriterien erfolgte eine Fokussierung auf die wesentlichen Merkmale der entwickelten Fassadenvarianten in Form einer tabellarischen Übersicht, wobei in den nachfolgenden Tabellen 4.1 bis 4.4 nicht auf sämtliche Aspekte des jeweiligen Fassadentyps detailliert eingegangen werden konnte.

Durch die Evaluierung zeigte sich, dass die entwickelten Fassadenvarianten in der Bauart von Doppelfassaden positive Aspekte hinsichtlich möglicher Anwendungen bei mehrgeschoßigen Objekten aufweisen. Der Fassadentyp HGV-DF02 in der Bauart einer belüfteten Kasten-Doppelfassade erhielt bei der Evaluierung die höchste Anzahl positiver Bewertungskriterien und wurde daher für die weitere Bearbeitung, die Herstellung der Fassadenprototypen und die Durchführung der Brandversuche ausgewählt.

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

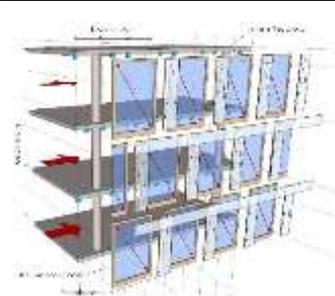
4.5.1 Fassadensystem HGV-EF 01



HGV-EF01	positive Bewertungskriterien	+	negative Bewertungskriterien	-
Architektur		+1		-2
	geringe Bautiefe/hohe Flächenausbeute	•	Sonnenschutz vor der Fassadenebene	•
			gleichförmiger, kleinteiliger Fassadenraster	•
Tragwerksplanung				-3
			begrenzte Lastaufnahme der HGV-Elemente	•
			Kopplung der HGV-Elemente vs. Öffenbarkeit	•
			„weiche“ Verbindung der Rahmenecken	•
Brandschutz		+2		-1
	Integration Brandschutzpaneel in Fassade	•		
	Brandweiterleitung unkritisch	•		
			Massnahmen gegen Herabfallen erforderlich	•
Bauphysik				-1
			geringer Schallschutz bei natürlicher Lüftung	•
TGA				-1
			Energieeintrag (Sonnenschutz windabhängig)	•
Ökologie		+1		
	Primärenergiebedarf, Rezyklierbarkeit	•		
Wartung/Reinigung		+1		
	Fassadenreinigung konventionell möglich	•		
Fertigung/Montage		+1		
	konventionelle und erprobte Bauweise	•		
Gesamtbewertung		+6		-8

Tabelle 4.1: Auswertung Fassadentyp HGV-EF 01

4.5.2 Fassadensystem HGV-EF 02



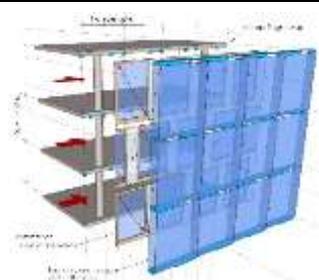
HGV-EF02	positive Bewertungskriterien	+	negative Bewertungskriterien	-
Architektur		+2		-1
	geringe Bautiefe/hohe Flächenausbeute	•		
	Integration des Sonnenschutzes	•		
			dominierende horizontale Gliederung	•
Tragwerksplanung		+2		-1
	höhere Lastaufnahme der HGV-Elemente	•		
			Kopplung der HGV-Elemente vs. Öffenbarkeit	•
	Rahmenecken und Rohbauanbindug	•		
Brandschutz		+1		-2
			Integration Brandschutzpaneel problematisch	•
	Brandweiterleitung unkritisch	•		
			Sicherung gegen Herabfallen	•
Bauphysik				-1
			geringer Schallschutz bei natürlicher Lüftung	•
TGA				-1
			Energieeintrag (Sonnenschutz windabhängig)	•
Ökologie		+1		
	Primärenergiebedarf, Rezyklierbarkeit	•		
Wartung/Reinigung		+1		
	Fassadenreinigung von innen möglich	•		
Fertigung/Montage				-1
			höherer Aufwand gegenüber P-R-Fassade	•
Gesamtbewertung		+7		-7

Tabelle 4.2: Auswertung Fassadentyp HGV-EF 02

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

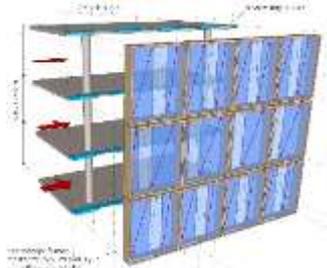
4.5.3 Fassadensystem HGV-DF 01



HGV-DF01	positive Bewertungskriterien	+	negative Bewertungskriterien	-
Architektur		+2		-1
	Sonnenschutz im Fassadenzwischenraum	•	höhere Bautiefe/geringere Flächenausbeute	•
	transparente Außenhülle	•		
Tragwerksplanung		+2		-1
	höhere Lastaufnahme der HGV-Elemente	•		
	Rahmenausbildung, Rohbauanbindug	•	keine Kopplung der HGV-Elemente	•
Brandschutz		+2		-1
	wirksame horizontale Brandsperrren	•	Integration Brandschutzpaneel schwierig	•
	Sicherung gegen Herabfallen	•		
Bauphysik		+1		
	Schallschutz auch bei natürlicher Lüftung	•		
TGA		+1		
	Sonnen- u. Blendschutz windunabhängig	•		
Ökologie		+1		
	Primärenergiebedarf, Rezyklierbarkeit	•		
Wartung/Reinigung				-1
			erhöhter Aufwand für Fassadenreinigung	•
Fertigung/Montage				-1
			höherer Aufwand gegenüber P-R-Fassade	•
Gesamtbewertung		+9		-5

Tabelle 4.3: Auswertung Fassadentyp HGV-DF 01

4.5.4 Fassadensystem HGV-DF 02



HGV-DF02	positive Bewertungskriterien	+	negative Bewertungskriterien	-
Architektur		+2		-1
	Sonnenschutz im Fassadenzwischenraum	•	höhere Bautiefe/geringere Flächenausbeute	•
	transparente Außenhülle	•		
Tragwerksplanung		+3		
	höhere Lastaufnahme der HGV-Elemente	•		
	Kopplung der Elemente bedingt möglich	•		
	Rahmenausbildung, Rohbauanbindung	•		
Brandschutz		+2		-1
	Integration Brandschutzpaneel in Fassade	•		
	Sicherung gegen Herabfallen	•	brennbare Brandsperrern (Holz)	•
Bauphysik		+1		
	Schallschutz auch bei natürlicher Lüftung	•		
TGA		+1		
	Sonnen- u. Blendschutz windunabhängig	•		
Ökologie		+1		
	Primärenergiebedarf, Rezyklierbarkeit	•		
Wartung/Reinigung				-1
			erhöhter Aufwand für Fassadenreinigung	•
Fertigung/Montage				-1
			höherer Aufwand gegenüber P-R-Fassade	•
Gesamtbewertung		+10		-4

Tabelle 4.4: Auswertung Fassadentyp HGV-DF 02

5 Experimentelle Untersuchungen

5.1 Methodik

Der experimentelle Teil dieser Arbeit ist in drei aufeinander aufbauende Versuchsreihen gegliedert. Im ersten Teil werden Kleinproben mit unterschiedlichen Klebeverbindungen auf deren Verhalten unter Temperaturbelastung untersucht. Daraus sollen die Grundlagen für die nachfolgenden Versuchsreihen sowie die Auswahl der geeigneten Klebstoffe für die Fassadenprototypen gewonnen werden.

In der zweiten Versuchsreihe erfolgt anhand von orientierenden Vorversuche die Ermittlung des Worst-Case-Szenarios betreffend eines Fensterausbrands in Bezug auf die Lage der darüber liegenden Belüftungsöffnungen des Zwischenraums einer Doppelfassade. Zusätzlich sollen im Zuge der Vorversuche auch der Einfluss unterschiedlicher Detailausbildungen, wie z.B. die Ausführung von Brandsperren und der Einfluss unterschiedlicher Verglasungsdetails, untersucht werden.

In der dritten Versuchsreihe soll der Nachweis der Einhaltung der erforderlichen Schutzziele mittels großmaßstäblicher Fassadenprototypen in genormten Prüfscenarien erfolgen.

Der zeitliche Ablauf der Versuchsreihen ist dahingehend ausgelegt, dass Erkenntnisse in die jeweils nachfolgende Versuchsreihe einfließen können.

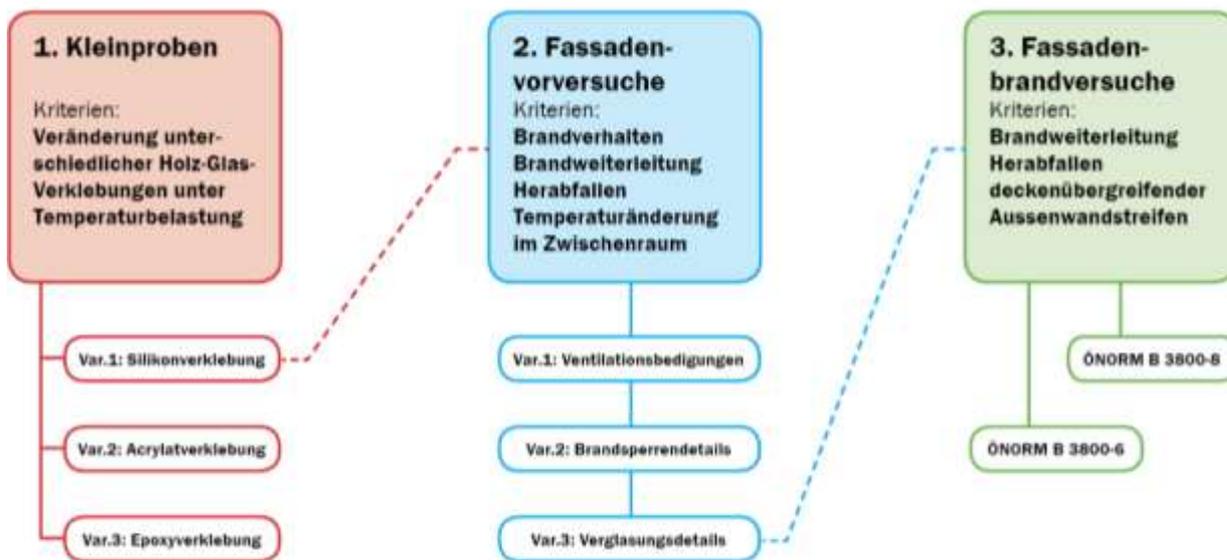


Abb. 5.1: Ablaufdiagramm der Versuchsreihen [eigene Darstellung]

5.2 Versuche mit Kleinproben unter Temperaturbelastung

Die für die Versuche ausgewählten Klebstoffarten werden einerseits bei seriellen HGV-Fassadensystemen (z.B. System der HFA) angewendet, bzw. in aktuellen Forschungsprojekten [27] untersucht und stellen somit eine repräsentative Auswahl entsprechend dem Stand der Technik bzw. Forschung dar.

Die Probekörper mit unterschiedlichen Klebeverbindungen wurden im Ofen auf die jeweilige Temperaturstufe erhitzt und danach in der Prüfmaschine in Druckversuchen bis zum Versagen belastet - dabei traten in den Klebeverbindungen Scherspannungen quer zur Fuge auf. Die im Zuge der Versuchsreihen ermittelten Messdaten der drei verschiedenen Klebstoffserien wurden im Zuge dieses Abschnitts ausgewertet und verglichen. Dabei wurden vor allem die Kriterien der Bruchspannung, Verformung, Schubverformung sowie des Bruchverhaltens untersucht und bewertet.

5.2.1 Aufbau Probekörper

Die Abmessungen der Probekörper (Sollwerte) betragen wie folgt:

- Holz: $b/h/d = 50/60/15$ mm (Faser parallel zu b)
- Glas: $b/h/d = 50/75/8$ mm (obere Glaskante geschliffen)
- Kleber: $b/h/d = 50/12/3$ mm

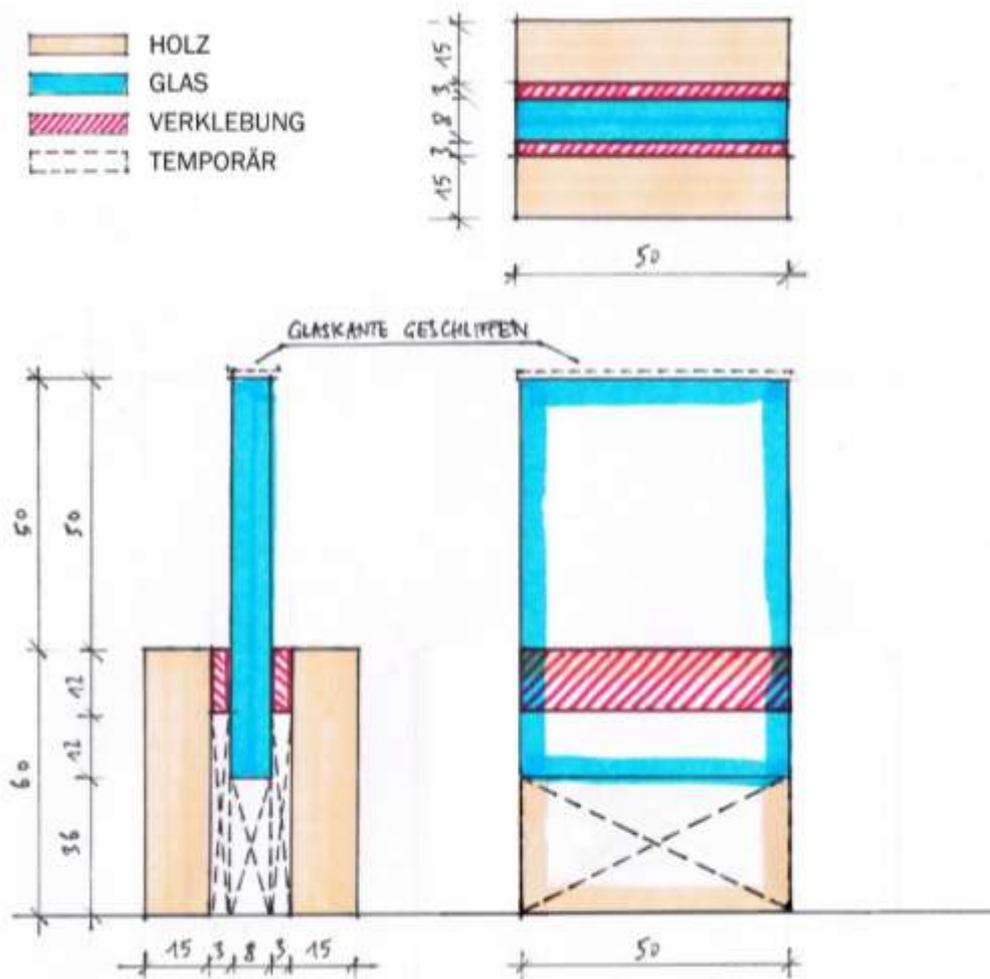


Abb. 5.2: Darstellung des Probekörpers [eigene Darstellung]

5.2.2 Materialien der Probekörper

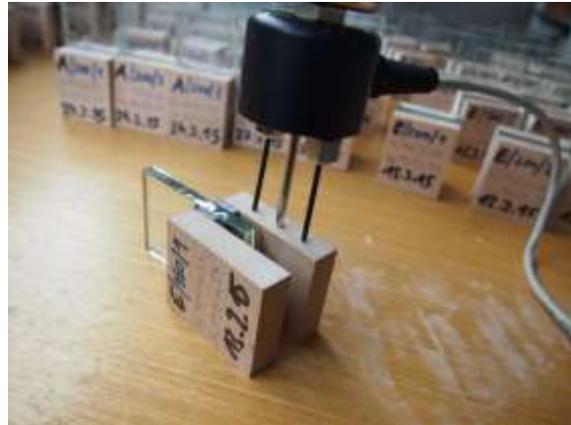


Abb. 5.3 (li.): Ansicht eines Probekörpers [Foto des Autors]

Abb. 5.4 (re.): Holzfeuchtemessung bei einem Probekörper [Foto des Autors]

5.2.2.1 Holz

Die Holzelemente wurden aus massiven, gehobelten Profilen mit einem Querschnitt von 60/15 mm aus Rotbuchenholz hergestellt. Es wurden Elemente mit 50 mm Länge quer zu Faser geschnitten. Vor Durchführung der Versuche wurde die Holzfeuchte der Prüfkörper gemessen. Die Werte betragen zwischen 3,6 bis 7,0 %.

5.2.2.2 Glas

Die Gläser wurden aus 8 mm Floatglas hergestellt. Die obere Glaskante wurde geschliffen, um eine möglichst flächige Auflage des Stempels der Prüfmaschine zu gewährleisten.

5.2.2.3 Klebstoffe

Es wurden drei Serien von Probekörpern mit den folgenden Klebstoffen hergestellt:
Die Datenblätter der Klebstoffe sind im Anhang angeführt.

- Nolax C44.8505
Zweikomponentenkleber auf EP-Basis
Komponente A: Silanterminiertes Polymer, formuliert
Komponente B: Epoxid Harz, formuliert
- Sikafast-5221 NT
Zweikomponentenkleber auf Acrylatbasis
Komponente A: Sikafast-5221 NT
Komponente B: Sikafast-5200
- Ottocoll S 660
Zweikomponenten Silicon-Klebstoff auf Alcoxy-Basis

5.2.3 Anzahl der Probekörper

Je Klebstoffserie wurden 25 Probekörper hergestellt, sodass je Temperaturbelastungsstufe (20, 80, 120, 160, 200°C) jeweils 5 Probekörper zur Verfügung standen.



Abb. 5.5, 5.6, 5.7: (v.l.n.r.) Probeserie mit Epoxid-, Acrylat- und Silikonverklebung [Foto des Autors]

5.2.4 Herstellung der Probekörper

Die Proben wurden in der Werkstätte der Camillo-Sitte-Lehr- und Versuchsanstalt gefertigt. Die Holz-Klebeflächen wurden vor der Verklebung mit Druckluft staubfrei gemacht. Die Glas-Klebeflächen wurden mittels Primer gemäß Herstellerrichtlinien vorbehandelt. Mittels Druckluftpistolen mit Statikmischer wurden die Klebstoffe in die Fugen eingebracht. Der überschüssige Kleber wurde mit einer Spachtel abgezogen.



Abb. 5.8: Fertigung der Probekörper in der Werkstatt [Foto des Autors]

Die Probekörper mit Silikonverklebung bzw. Epoxidverklebung wurden bei Raumtemperatur (ca. 20°C) mindestens 30 Tage gelagert. Die Probekörper mit Acrylatverklebung wurden bei Raumtemperatur

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

(ca. 20°C) mindestens 19 Tage gelagert. Laut Herstellerangaben ist nach diesen Lagerungszeiten die Endfestigkeit der Klebeverbindung gegeben.



Abb. 5.9: Herstellen der Verklebung [Foto des Autors]



Abb. 5.10: Herstellen der Verklebung [Foto des Autors]

5.2.5 Versuchsaufbau und Durchführung

5.2.5.1 Vorversuche

Um die Eignung der Probekörper zu überprüfen, wurden vor Herstellung der gesamten Kleinserie Versuche an einzelnen Prototypen durchgeführt. Da plausible Ergebnisse erzielt wurden, konnten die Probekörper ohne wesentliche Änderungen hergestellt werden.



Abb. 5.11: Druckversuch [Foto des Autors]



Abb. 5.12: Probekörper nach dem Druckversuch [Foto des Autors]

Außerdem wurde die Verformung der Buchenholzelemente bei einer Druckbelastung normal zur Faser vor Durchführung der Versuchsreihen ermittelt. Die Verformungen lagen bei einer Belastung von 3750 N zwischen 0,82 bis 1,27 mm. Dieser Wert entspricht in etwa der maximal aufgetretenen Belastung auf die beiden Holzelemente bei den Versuchsreihen.

Im folgenden Diagramm sind die Verformungen der Holzelemente dargestellt.

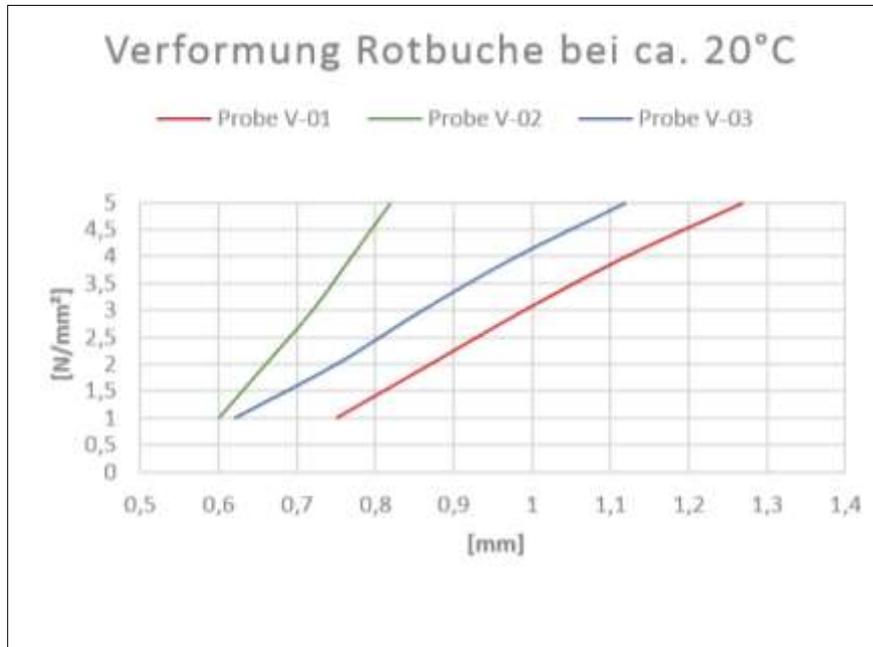


Abb. 5.13: Verformungen der Holzelemente bei den Vorversuchen [Foto des Autors]

5.2.5.2 Temperaturstufen

Für die Versuchsreihen wurden folgende Temperaturstufen festgelegt:

- Raumtemperatur (ca. 20°C)
- 80°C
- 120°C
- 160°C
- 200°C



Abb. 5.14 (li.): Temperaturmessung in der Klebefuge [Foto des Autors]



Abb. 5.15 (re.): Probekörper mit Thermoelemente im Ofen [Foto des Autors]

Zur Abschätzung der erforderlichen Ofen-Verweilzeiten der Probekörper wurden zwei Probekörper mit Thermoelementen im Bereich der Klebefuge bei einer Temperatur von 200°C im Ofen gelagert. Auf Grund dieser Ergebnisse wurde eine Ofen-Verweildauer von ca. 90 bis 120 min. (5400 bis 7200 s) festgelegt, da sich in der Klebefuge annähernd die gleiche Temperatur wie im Ofen eingestellt hatte.

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

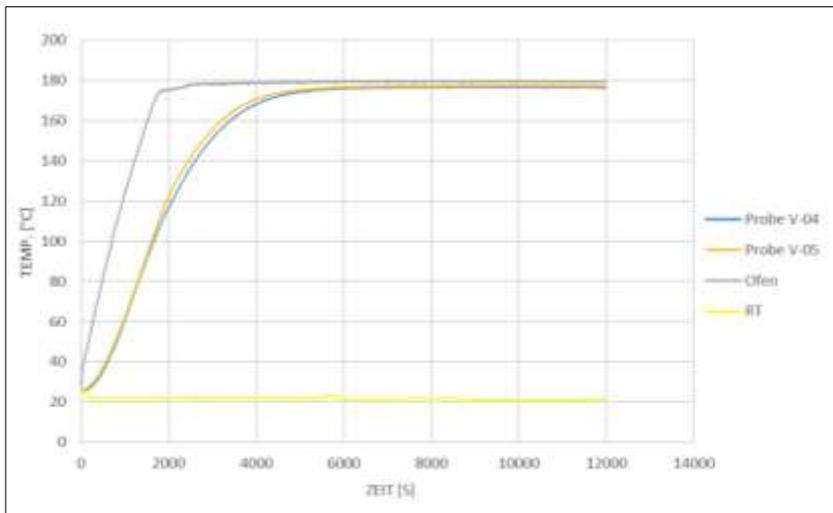


Abb. 5.16: Temperaturverlauf während der Erwärmung im Ofen [eigene Darstellung]

In jeweils einem Probekörper je Klebstoffserie und Temperaturstufe wurde ein Thermoelement in der Klebefuge angebracht. Dadurch konnte das Erreichen der Zieltemperatur der jeweiligen Temperaturstufe überprüft werden.

Im Anhang sind die Ofenprotokolle der Versuchsreihen 80, 120, 160 und 200°C angefügt.

5.2.5.3 Abkühlzeiten

Bei der Versuchsdurchführung wurden die Prüfkörper nach Erreichen der Zieltemperatur einzeln aus dem Ofen entnommen und in die Prüfmaschine eingestellt. Bis zum Beginn des Belastungsversuchs war eine Zeit von bis zu zwei Minuten erforderlich. Die Temperatur in der Klebefuge reduzierte sich in diesem Zeitraum bei einer Ofentemperatur von 200°C um 10 bis 14 K.

Im folgenden Diagramm sind die Abkühlzeiten von jeweils einem Probekörper je Klebstoffserie ersichtlich.

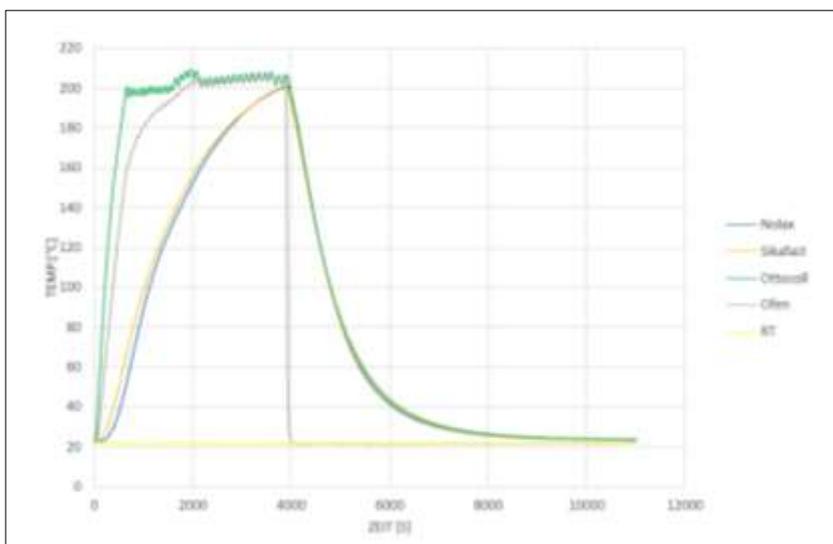


Abb. 5.17: Temperaturverlauf nach der Entnahme aus dem Ofen [eigene Darstellung]

5.2.5.4 Versuchsablauf

Die Versuche wurden im Labor des Instituts für Hochbau und Technologie der TU Wien durchgeführt. Nach Erreichen der jeweiligen Zieltemperatur wurden die Probekörper einzeln dem Ofen entnommen und in einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick, Type Z250 abgedrückt.

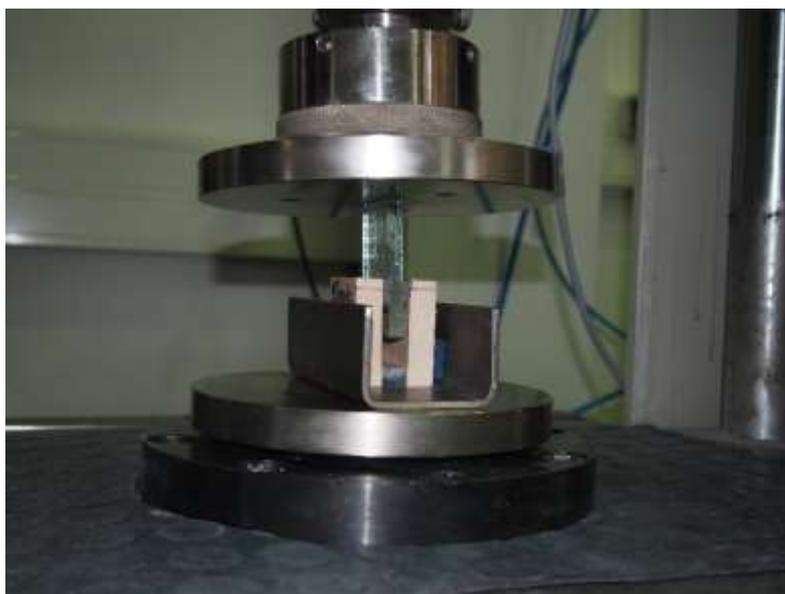


Abb. 5.18 (li.): Universalprüfmaschine Zwick Z250 [Foto des Autors]

Abb. 5.19 (re.): Probekörper unter Belastung [Foto des Autors]

Die Versuchsreihen wurden mit folgenden Belastungsgeschwindigkeiten durchgeführt:

- Klebstoffserie Nolax C44.8505: 1 mm/min
- Klebstoffserie Sikafast-5221 NT: 1 mm/min
- Klebstoffserie Ottocoll S 660: 0,5 mm/min

Die Vorkraft wurde mit 30 N gewählt. Die Versuche wurden bei kontinuierlicher Belastungsgeschwindigkeit bis zum Versagen des Probekörpers durchgeführt.

Bei den Versuchsreihen traten folgende Versagensarten auf:

- Bruch im Kleber (Kohäsionsbruch)
- Bruch der Klebefuge beim Holz (Adhäsionsbruch)
- Bruch der Klebefuge beim Glas (Adhäsionsbruch)
- Mischbruch (Kohäsions- und Adhäsionsbruch)
- Bruch im Holzelement

5.2.6 Auswertung

5.2.6.1 Bruchspannung

Aus den Messwerten der Versuchsreihen wurde die Bruchspannung (maximale Schubspannung beim Versagen der Probe) der verwendeten Klebstoffarten bei den verschiedenen Temperaturstufen ermittelt. Aus den Einzelwerten je Klebstoff und Temperaturstufe wurden jeweils das arithmetische Mittel und die Standardabweichung berechnet.

Die nachfolgende Auswertung ist folgendermaßen gegliedert:

- Übersicht Bruchspannung der Klebstoffarten
- Bruchspannung Nolax C44.8505
- Bruchspannung Sikafast-5221 NT
- Bruchspannung Ottocoll S 660

In den Tabellen werden folgende Abkürzungen verwendet:

n ... Anzahl der Proben

T ... Temperatur [°C]

τ ... Bruchspannung [N/mm²]

F_{\max} ... maximale Belastung bei Versagen [N]

A ... Klebefläche [mm²]

σ ... Standardabweichung [N/mm²]

$$\tau = F_{\max}/A$$

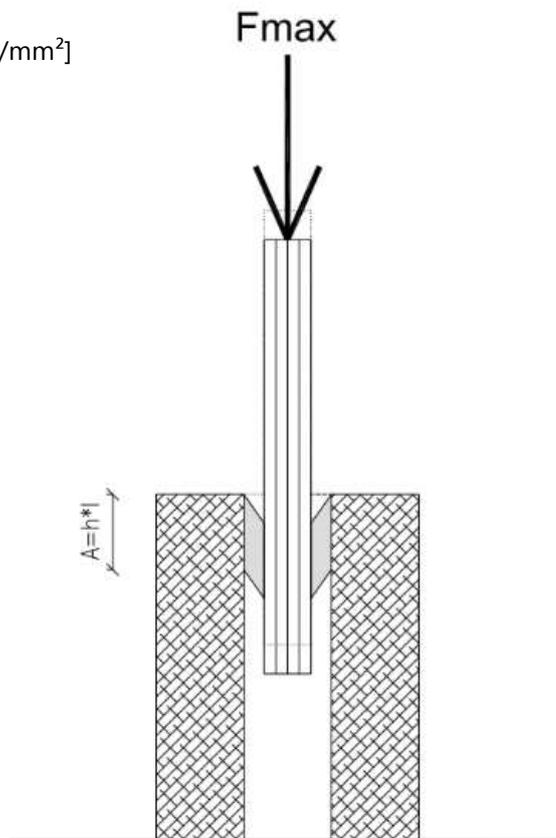
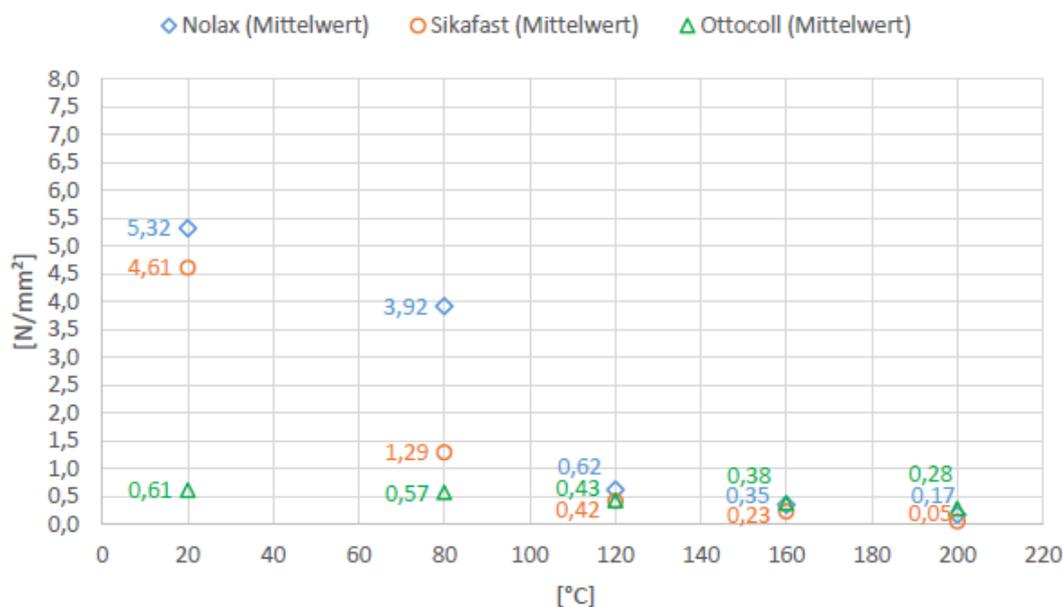


Abb. 5.20: Schematische Darstellung der Schubspannung in der Klebefuge [eigene Darstellung]

Übersicht - Bruchspannung



Temperaturstufe	ca. 20°C
Mittelwert d. Bruchspannung	[N/mm ²]
Nolax	τ = 5,32
Sikafast	τ = 4,61
Ottocoll	τ = 0,61

Temperaturstufe	80°C
Mittelwert d. Bruchspannung	[N/mm ²]
Nolax	τ = 3,92
Sikafast	τ = 1,29
Ottocoll	τ = 0,57

Temperaturstufe	120°C
Mittelwert d. Bruchspannung	[N/mm ²]
Nolax	τ = 0,62
Sikafast	τ = 0,42
Ottocoll	τ = 0,43

Temperaturstufe	160°C
Mittelwert d. Bruchspannung	[N/mm ²]
Nolax	τ = 0,35
Sikafast	τ = 0,23
Ottocoll	τ = 0,38

Temperaturstufe	200°C
Mittelwert d. Bruchspannung	[N/mm ²]
Nolax	τ = 0,17
Sikafast	τ = 0,05
Ottocoll	τ = 0,28

Abb. 5.21 (o.): Diagramm der maximalen Bruchspannungen in Abhängigkeit von Klebstoffart und Temperatur [eigene Darstellung]

Abb. 5.22 (u.): Tabellarische Darstellung der Bruchspannungen (Mittelwerte) [eigene Darstellung]

5.2.6.2 *Verformung bei Erreichen der Bruchspannung*

Aus den Messwerten der Versuchsreihen wurde die Verformung der Prüfkörper bei Erreichen der Bruchspannung ermittelt. In der Auswertung wurde die Gesamtverformung der Proben betrachtet, wobei diese überwiegend in der Klebefuge auftrat. Die Verformung der Buchenhölzer wurde in den Vorversuchen untersucht. Die Verformung des Glaselements ist bei den auftretenden Belastungen vernachlässigbar. Aus den Einzelwerten je Klebstoff und Temperaturstufe wurden jeweils das arithmetische Mittel und die Standardabweichung berechnet.

Die nachfolgende Auswertung ist folgendermaßen gegliedert:

- Übersicht Verformung bei Bruchspannung der Klebstoffarten
- Verformung bei Bruchspannung Nolax C44.8505
- Verformung bei Bruchspannung Sikafast-5221 NT
- Verformung bei Bruchspannung Ottocoll S 660

In den Tabellen werden folgende Abkürzungen verwendet:

n ... Anzahl der Proben

T ... Temperatur [°C]

ΔL ... Verformung [mm]

σ ... Standardabweichung [mm]

$$\Delta L = L1 - L2$$

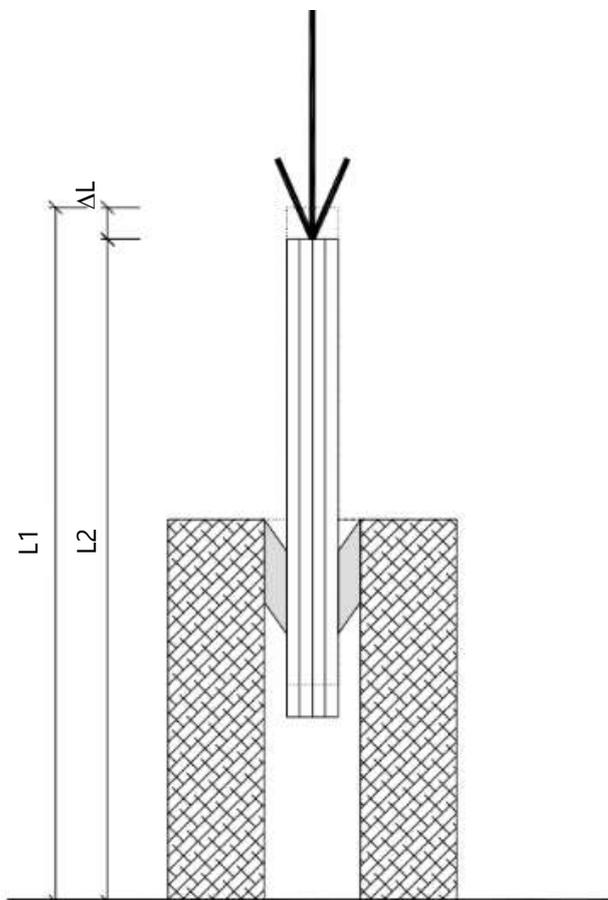
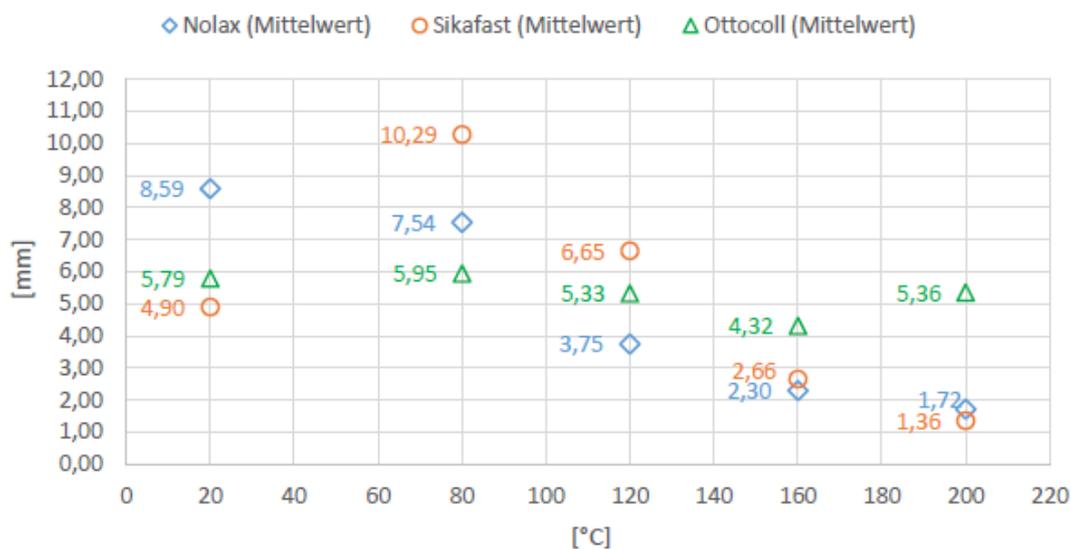


Abb. 5.23: Schematische Darstellung der Verformung der Klebefuge [eigene Darstellung]

Übersicht - Verformung bei Bruchspannung



Temperaturstufe	ca. 20°C
Mittelwert d. Verformung bei Bruchspannung	[mm]
Nolax	$\Delta L = 8,59$
Sikafast	$\Delta L = 4,90$
Ottocoll	$\Delta L = 5,79$

Temperaturstufe	80°C
Mittelwert d. Verformung bei Bruchspannung	[mm]
Nolax	$\Delta L = 7,54$
Sikafast	$\Delta L = 10,29$
Ottocoll	$\Delta L = 5,95$

Temperaturstufe	120°C
Mittelwert d. Verformung bei Bruchspannung	[mm]
Nolax	$\Delta L = 3,75$
Sikafast	$\Delta L = 6,65$
Ottocoll	$\Delta L = 5,33$

Temperaturstufe	160°C
Mittelwert d. Verformung bei Bruchspannung	[mm]
Nolax	$\Delta L = 2,30$
Sikafast	$\Delta L = 2,66$
Ottocoll	$\Delta L = 4,52$

Temperaturstufe	200°C
Mittelwert d. Verformung bei Bruchspannung	[mm]
Nolax	$\Delta L = 1,72$
Sikafast	$\Delta L = 1,36$
Ottocoll	$\Delta L = 5,36$

Abb. 5.24 (o.): Diagramm der Verformungen der Proben bei Erreichen der Bruchspannung [eigene Darstellung]

Abb. 5.25 (u.): Tabellarische Darstellung der Verformungen (Mittelwerte) bei Erreichen der Bruchspannung [eigene Darstellung]

5.2.6.3 Schubverformung

Aus den Messwerten der Versuchsreihen und den Istwerten der Klebefugegeometrie wurde die Schubverformung bis zum Versagen der Proben ermittelt. Je verwendeter Klebstoffart und Temperaturstufe wurde aus den Einzelwerten das arithmetische Mittel der Schubverformung errechnet. In den Diagrammen wurde die Schubverformung jeweils anhand von repräsentativen Proben dargestellt.

Die nachfolgende Auswertung ist folgendermaßen gegliedert:

- Schubverformung bei ca. 20°C
- Schubverformung bei 80°C
- Schubverformung bei 120°C
- Schubverformung bei 160°C
- Schubverformung bei 200°C
- Schubverformung Nolax C44.8505
- Schubverformung Sikafast-5221 NT
- Schubverformung Ottocoll S 660

In den Tabellen werden folgende Abkürzungen verwendet:

n ... Anzahl der Proben

T ... Temperatur [°C]

τ ... Bruchspannung [N/mm²]

A ... Klebefläche [mm²]

e ... Breite der Klebefuge [mm]

ΔL ... Verformung [mm]

d ... Schubverformung [%]

$$d = \arctg(\gamma) = \Delta L/e$$

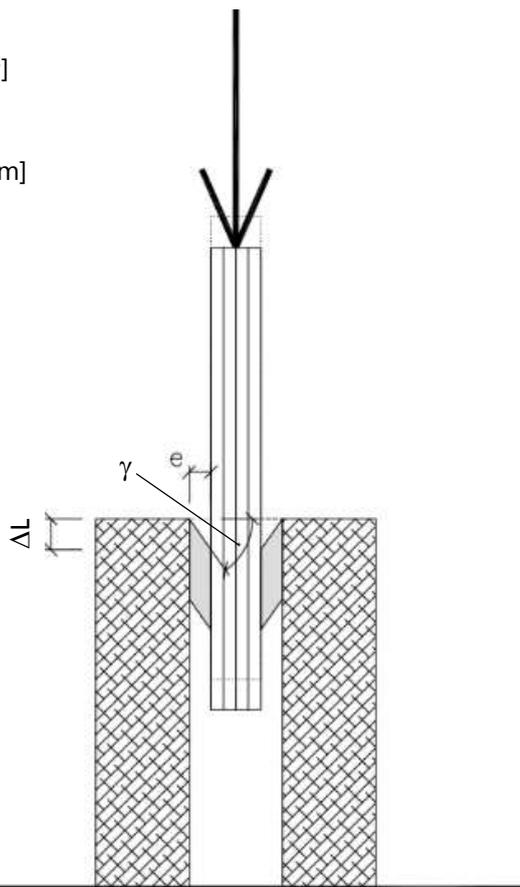
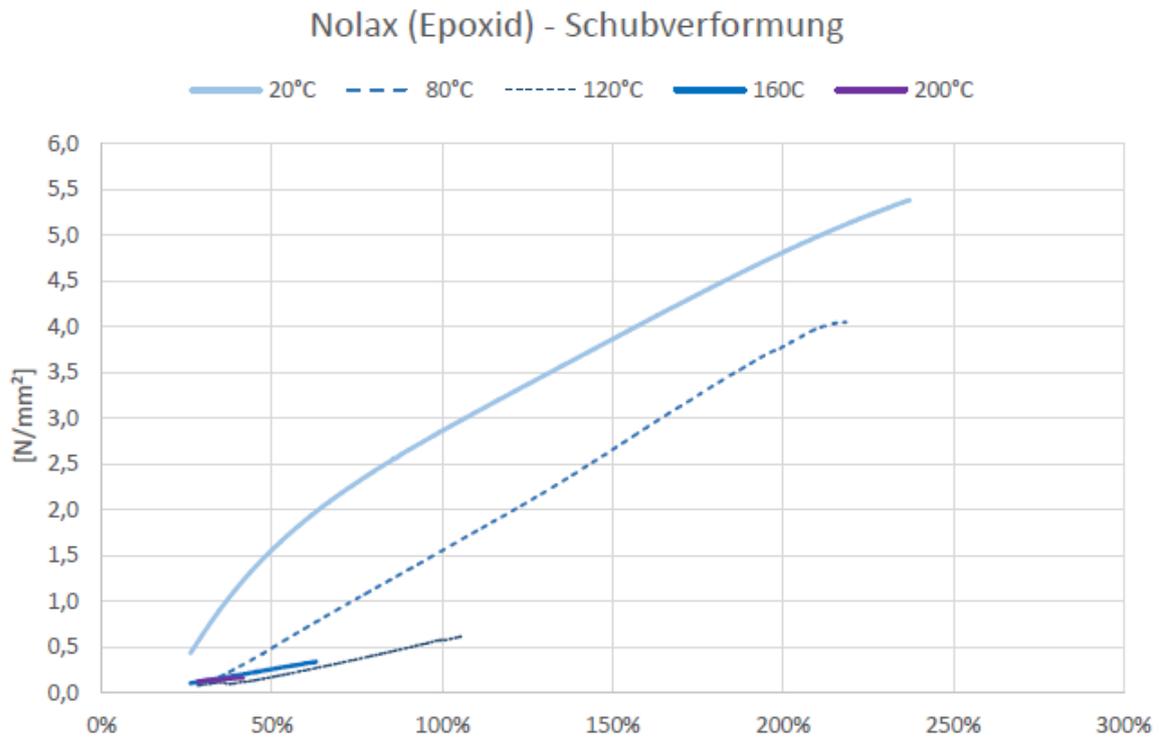


Abb. 5.26: Schematische Darstellung der Schubverformung der Klebefuge [eigene Darstellung]



Temperaturstufe	ca. 20°C
Bruchspannung [N/mm ²]	$\tau = 5,32$
Verformung [mm]	$\Delta L = 8,59$
Schubverformung [%]	$d = 232,11$

Temperaturstufe	80°C
Bruchspannung [N/mm ²]	$\tau = 3,92$
Verformung [mm]	$\Delta L = 7,54$
Schubverformung [%]	$d = 203,84$

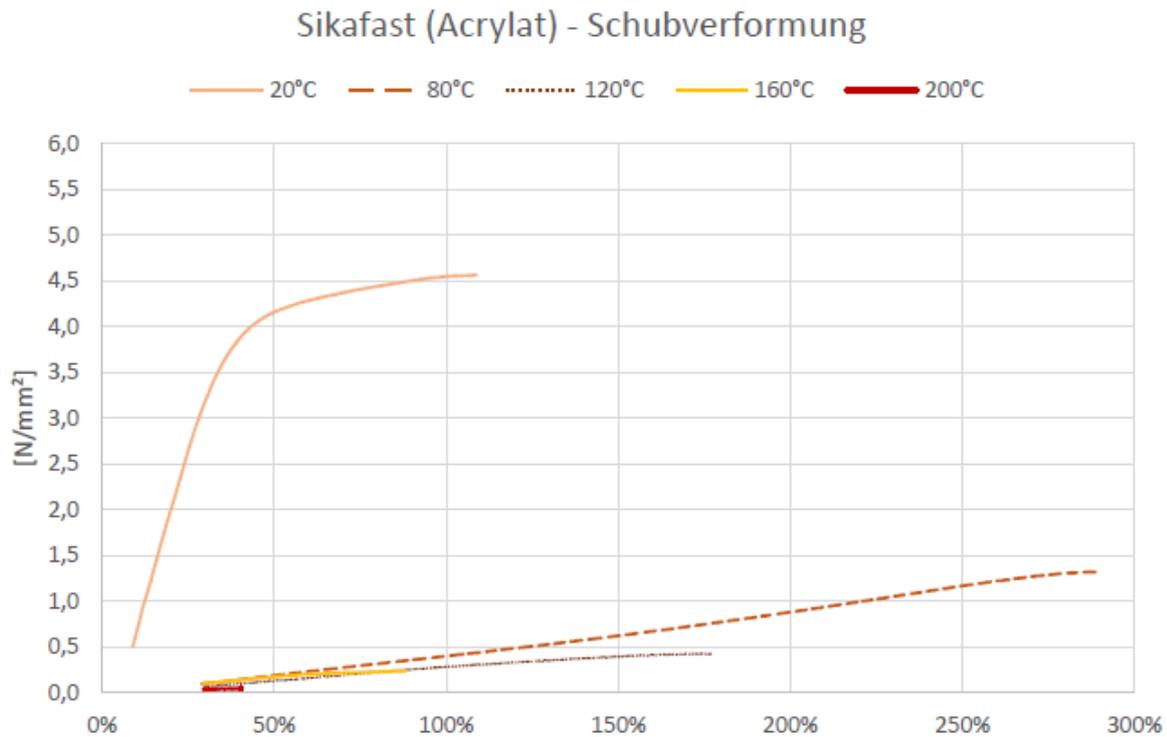
Temperaturstufe	120°C
Bruchspannung [N/mm ²]	$\tau = 0,62$
Verformung [mm]	$\Delta L = 3,75$
Schubverformung [%]	$d = 98,79$

Temperaturstufe	160°C
Bruchspannung [N/mm ²]	$\tau = 0,35$
Verformung [mm]	$\Delta L = 2,30$
Schubverformung [%]	$d = 60,47$

Temperaturstufe	200°C
Bruchspannung [N/mm ²]	$\tau = 0,17$
Verformung [mm]	$\Delta L = 1,72$
Schubverformung [%]	$d = 45,26$

Abb. 5.27 (o.): Diagramm der Schubverformungen der Probeserie mit Epoxidverklebung [eigene Darstellung]

Abb. 5.28 (u.): Tabellarische Darstellung der Schubverformungen der Probeserie mit Epoxidverklebung [eigene Darstellung]



Temperaturstufe	ca. 20°C
Bruchspannung [N/mm²]	τ = 4,61
Verformung [mm]	ΔL = 4,90
Schubverformung [%]	d = 144,12

Temperaturstufe	80°C
Bruchspannung [N/mm²]	τ = 1,29
Verformung [mm]	ΔL = 10,29
Schubverformung [%]	d = 294,00

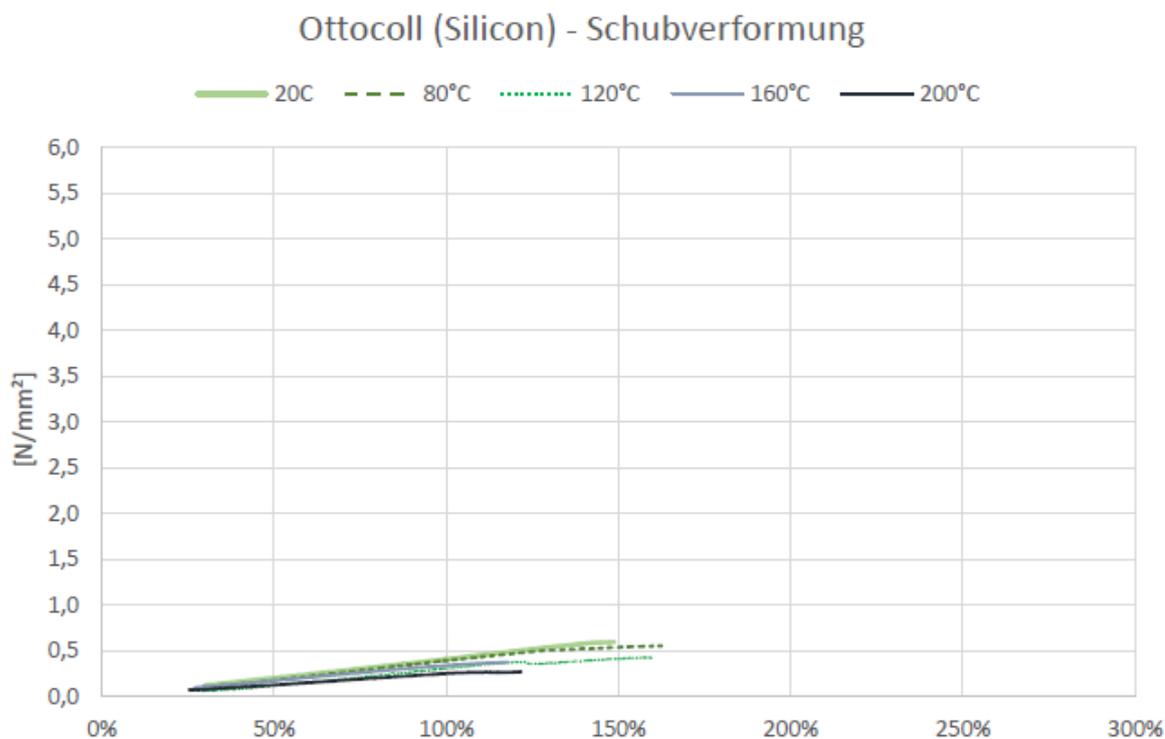
Temperaturstufe	120°C
Bruchspannung [N/mm²]	τ = 0,42
Verformung [mm]	ΔL = 6,65
Schubverformung [%]	d = 190,06

Temperaturstufe	160°C
Bruchspannung [N/mm²]	τ = 0,23
Verformung [mm]	ΔL = 2,66
Schubverformung [%]	d = 75,94

Temperaturstufe	200°C
Bruchspannung [N/mm²]	τ = 0,05
Verformung [mm]	ΔL = 1,36
Schubverformung [%]	d = 39,94

Abb. 5.29 (o.): Diagramm der Schubverformungen der Probeserie mit Acrylatverklebung [eigene Darstellung]

Abb. 5.30 (u.): Tabellarische Darstellung der Schubverformungen der Probeserie mit Acrylatverklebung [eigene Darstellung]



Temperaturstufe	ca. 20°C
Bruchspannung [N/mm ²]	$\tau = 0,61$
Verformung [mm]	$\Delta L = 5,79$
Schubverformung [%]	$d = 156,54$
Temperaturstufe	80°C
Bruchspannung [N/mm ²]	$\tau = 0,57$
Verformung [mm]	$\Delta L = 5,95$
Schubverformung [%]	$d = 160,70$
Temperaturstufe	120°C
Bruchspannung [N/mm ²]	$\tau = 0,43$
Verformung [mm]	$\Delta L = 5,33$
Schubverformung [%]	$d = 147,94$
Temperaturstufe	160°C
Bruchspannung [N/mm ²]	$\tau = 0,38$
Verformung [mm]	$\Delta L = 4,52$
Schubverformung [%]	$d = 125,61$
Temperaturstufe	200°C
Bruchspannung [N/mm ²]	$\tau = 0,28$
Verformung [mm]	$\Delta L = 5,36$
Schubverformung [%]	$d = 137,49$

Abb. 5.31 (o.): Diagramm der Schubverformungen der Probeserie mit Silikonverklebung [eigene Darstellung]

Abb. 5.32 (u.): Tabellarische Darstellung der Schubverformungen der Probeserie mit Silikonverklebung [eigene Darstellung]

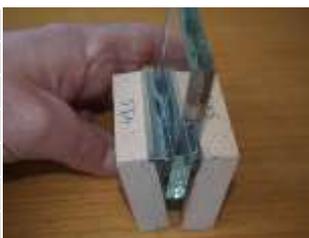
Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

5.2.6.4 Bruchverhalten Epoxidverklebung

Temperaturstufe	20°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	-	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	-	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	-	
Holzbruch	5	

Temperaturstufe	80°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	-	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	5	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	-	
Holzbruch	-	

Temperaturstufe	120°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	-	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	-	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	5	
Holzbruch	-	

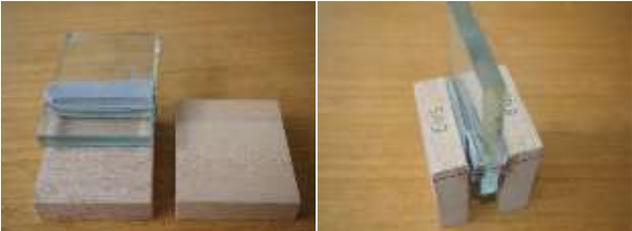
Temperaturstufe	160°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	-	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	-	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	5	
Holzbruch	-	

Temperaturstufe	200°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	-	
Adhäsionsbruch (Glas)	2	
Adhäsionsbruch (Holz)	2	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	1	
Holzbruch	-	

Abb. 5.33: Tabellarische Auswertung und exemplarische Abbildungen der Bruchverhaltens der Probekörper mit Epoxidverklebung [eigene Darstellung]

5.2.6.5 Bruchverhalten Acrylatverklebung

Temperaturstufe	20°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	-	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	-	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	-	
Holzbruch	5	

Temperaturstufe	80°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	-	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	3	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	2	
Holzbruch	-	

Temperaturstufe	120°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	-	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	-	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	5	
Holzbruch	-	

Temperaturstufe	160°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	-	
Adhäsionsbruch (Glas)	2	
Adhäsionsbruch (Holz)	1	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	2	
Holzbruch	-	

Temperaturstufe	200°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	2	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	-	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	3	
Holzbruch	-	

Abb. 5.34: Tabellarische Auswertung und exemplarische Abbildungen der Bruchverhaltens der Probekörper mit Acrylatverklebung [eigene Darstellung]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

5.2.6.6 Bruchverhalten Silikonverklebung

Temperaturstufe	20°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	5	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	-	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	-	
Holzbruch	-	

Temperaturstufe	80°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	5	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	-	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	-	
Holzbruch	-	

Temperaturstufe	120°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	5	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	-	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	-	
Holzbruch	-	

Temperaturstufe	160°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	5	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	-	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	-	
Holzbruch	-	

Temperaturstufe	200°C	
Anzahl der Proben	n = 5	
Kohäsionsbruch	5	
Adhäsionsbruch (Glas)	-	
Adhäsionsbruch (Holz)	-	
Mischbruch (Koh.- u. Adh.)	-	
Holzbruch	-	

Abb. 5.35: Tabellarische Auswertung und exemplarische Abbildungen der Bruchverhaltens der Probekörper mit Slikonverklebung [eigene Darstellung]

5.2.7 Zusammenfassung

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte im Hinblick auf die Kriterien der Bruchspannung, Verformung, Schubverformung und des Bruchverhaltens. Die drei Probeserien weisen im Verlauf der Versuche bei steigender Temperaturbelastung unterschiedliche Veränderungen dieser Kriterien auf. Die wesentlichen Unterschiede sind hier in Form eines kurzen Überblicks zusammengefasst.

Die Probeserie mit Epoxidverklebung Nolax C44.8505 weist bei Raumtemperatur im Vergleich zu den beiden anderen Probeserien die größten Scherfestigkeiten auf. Die Bruchspannung beträgt mit $5,32 \text{ N/mm}^2$ ungefähr das Neunfache der Bruchspannung des Silikonklebstoffs Ottocoll S 660. Mit steigender Temperaturbelastung nimmt die Scherfestigkeit jedoch deutlich ab – bei 160°C liegt diese bereits unter dem Wert der Probeserie mit Silikonverklebung. Bei 200°C beträgt die Bruchspannung noch 3 % gegenüber dem ursprünglichen Wert.

Die Schubverformung nimmt bei steigender Temperaturbelastung ebenfalls stetig ab. Ab 120°C beträgt sie weniger als die Hälfte und hat sich bei 200°C auf ungefähr ein Fünftel des Anfangswertes reduziert.

Die Auswertung des Bruchverhaltens lässt diese Veränderungen ebenfalls erkennen. Bei Raumtemperatur tritt das Versagen in Form von Rissen in den Holzelementen auf. Im Temperaturbereich zwischen 80°C bis 160°C treten in den Klebefugen Mischbrüche in Form von Kohäsions- und Adhäsionsbrüchen auf. Ab 200°C ist kein ausgeprägtes Bruchverhalten mehr zu erkennen. Die auftretenden Adhäsions- und Kohäsionsbrüche erfolgen zumeist in Form eines spontanen Abscherens an einer der Randflächen der Klebefuge.

Die Probeserie mit Acrylatverklebung Sikafast-5221 NT weist bei Raumtemperatur ebenfalls hohe Scherfestigkeiten auf. Die Bruchspannung liegt mit $4,61 \text{ N/mm}^2$ jedoch etwas unter den Werten der Epoxidproben. Bei einer Temperaturbelastung von 80°C tritt bereits ein markanter Festigkeitsverlust auf – die Bruchspannung beträgt nur noch 28% des Ausgangswertes. Ab 120°C liegt die Bruchspannung bereits unter dem Wert der Probeserie mit Silikonverklebung und hat sich bei 200°C gegenüber dem Wert bei Raumtemperatur auf 1 % reduziert.

Auch im Hinblick auf die Schubverformung ist analog zu den Bruchspannungen eine deutliche Änderung ab einer Temperaturbelastung von 80°C zu erkennen. Es kommt zu einer wesentlichen Abnahme des Schubmoduls, bei gleichzeitigem Auftreten der höchsten Schubverformungen der gesamten Versuchsreihe. Mit zunehmender Temperaturbelastung nehmen die Schubverformungen aber wieder stetig ab und haben sich bei 200°C auf ungefähr ein Viertel des Ausgangswertes reduziert.

Das Bruchverhalten der Proben mit Acrylatverklebung weist mit Rissbildungen in den Holzelementen ähnliche Merkmale wie die Epoxidserie bei Raumtemperatur auf. Ab 80°C ist kein ausgeprägtes Bruchverhalten mehr zu erkennen – es treten sowohl Adhäsions- und Mischbrüche auf. Ab 200°C ist die zunehmende Sprödigkeit der Klebefuge anhand der Struktur der Bruchflächen deutlich ersichtlich.

Die Probeserie mit Silikonverklebung Ottocoll S 660 weist bei Raumtemperatur gegenüber den beiden anderen Probeserien deutlich geringere Scherfestigkeiten auf – die Bruchspannung liegt nur bei $0,61 \text{ N/mm}^2$. Im Gegensatz zu den beiden anderen Klebstoffen tritt bei der Silikonverklebung ein wesentlich geringerer Festigkeitsverlust unter Temperaturbelastung auf. Bei 120°C sind 70% und bei 200°C sind noch 46 % der Anfangsfestigkeit vorhanden. Ab 160°C liegen die Bruchspannungen der Silikonproben über den Werten der beiden anderen Probeserien.

Im Hinblick auf die Schubverformungen zeigen die Ergebnisse, dass zwar gewisse Schwankungen, aber keine wesentlichen Veränderungen unter Temperaturbelastung auftreten.

Das konstante Verhalten der Proben mit Silikonverklebungen ist auch anhand der Auswertung des Bruchverhaltens ersichtlich. Es treten unabhängig von der Temperaturstufe ausschließlich Kohäsionsbrüche in

der Klebefuge auf. Eine wesentliche Veränderung der Elastizität der Klebeverbindung ist nicht zu erkennen.

Im Hinblick auf die vorgesehenen Brandversuche mit großformatigen Fassadenelementen wurden auf Grund der Erkenntnisse aus dieser Versuchsreihe folgende Rückschlüsse und weitere Festlegungen getroffen:

- Holz-Glas-Verklebungen mit den untersuchten Epoxid- bzw. Acrylatklebstoffen können bei Raumtemperatur deutlich höhere Scherspannungen als Silikonverklebungen aufnehmen.
- Da im Fassadenbereich Temperaturen über 80°C auftreten können, sind Holz-Glas-Verklebungen mit dem untersuchten Acrylatklebstoff ungeeignet und werden im Zuge dieser Arbeit nicht weiter untersucht.
- Holz-Glas-Verklebungen mit der untersuchten Epoxidverklebung können bei den im Brandfall auftretenden Temperaturbelastungen keine nennenswerten Scherfestigkeiten mehr aufnehmen und werden als aussteifende Elemente unwirksam.
- Holz-Glas-Verklebungen mit der untersuchten Silikonverklebung weisen unter Temperaturbelastung ein sehr konstantes Verhalten bei einer geringeren Reduktion der Scherfestigkeit auf. Inwieweit diese Verklebungen auch bei höheren Temperaturbelastungen eines Fassadenbrandes funktionsfähig bleiben, wird in den folgenden Versuchsreihen untersucht.

5.3 Vorversuche V1a und V1b

5.3.1 Zielsetzung

In dieser Versuchsreihe werden die besonderen Ventilationsbedingungen der Kastendoppelfassade mit belüftetem Zwischenraum untersucht. Auf Grund der diagonal versetzten Zu- und Abluftöffnungen kann es je nach Lage des Fassadenausbrands (bzw. der Lage der Brandkammer bei der Versuchsanordnung) in Bezug zur Belüftungssituation des Fassadenzwischenraums zu unterschiedlichen Strömungsverhältnissen vor der Fassade bzw. im Fassadenzwischenraum kommen. Um für die weitere Versuchsdurchführung den Einfluss der Belüftungssituation zu ermitteln, wurden für die ersten beiden Vorversuche zwei Probekörper hergestellt, die sich nur durch die Zuluftsituation des Fassadenzwischenraums unterscheiden. Variante 1a bildet eine Situation ab, bei der sich die Zuluftöffnung des Fassadenzwischenraums oberhalb der Brandkammer befindet. Bei Variante 1b liegt die Abluftöffnung der Fassade des Brandgeschoßes direkt über der Brandkammer, und der darüber liegende Fassadenzwischenraum weist in diesem Bereich keine Zuluftöffnung auf.

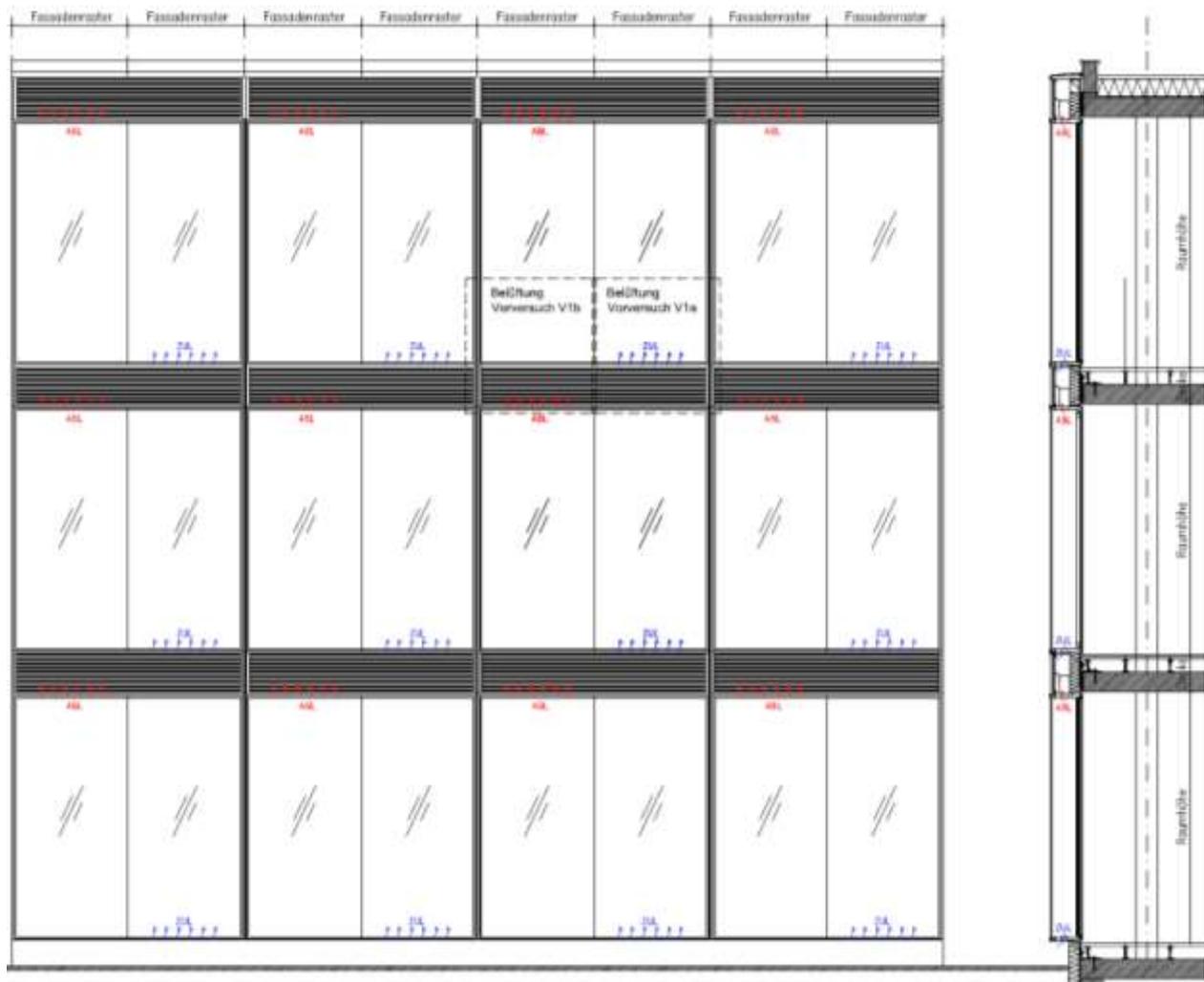


Abb. 5.36: Schemadarstellung der Belüftung des Zwischenfassadenraums [eigene Darstellung]

5.3.2 Probekörper

Die Ausbildung der Probekörper baut auf den Systemdetails der HGV-Kastendoppelfassade Typ DF02 auf, welche im vierten Abschnitt entworfen und evaluiert wurden.

Da bei der Versuchsanordnung gemäß ÖNORM B 3800-6 [N16] die innere Ebene der Doppelfassade nicht Gegenstand des Prüfversuchs ist, bzw. diese durch die Wand des Prüfstands abgebildet wird, wurden die Probekörper nur mit der äußeren Fassadenebene hergestellt.

Für die Vorversuche wurde die Elementgröße (B x H x T) mit 1300 x 1550 x 295 mm festgelegt, da dies dem maßgeblichen Bereich über der Brandkammer entspricht und mit einem adäquaten Aufwand herstellbar ist.

Die unterschiedliche Belüftungssituation zwischen Variante V1a und V1b ist in den folgenden Schnittzeichnungen dargestellt. Die Größe der Zu- und Abluftöffnungen beträgt jeweils 1140 x 80 mm.

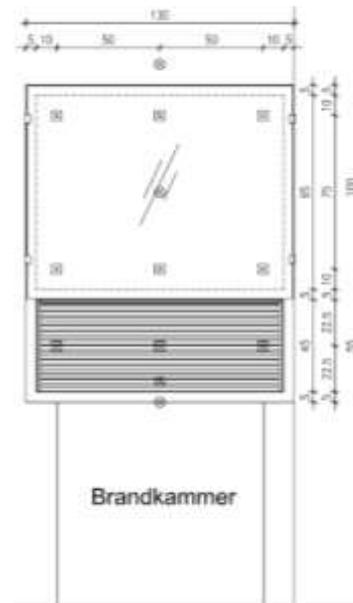


Abb.5.37: Ansicht V1a und V1b [eigene Darstellung]

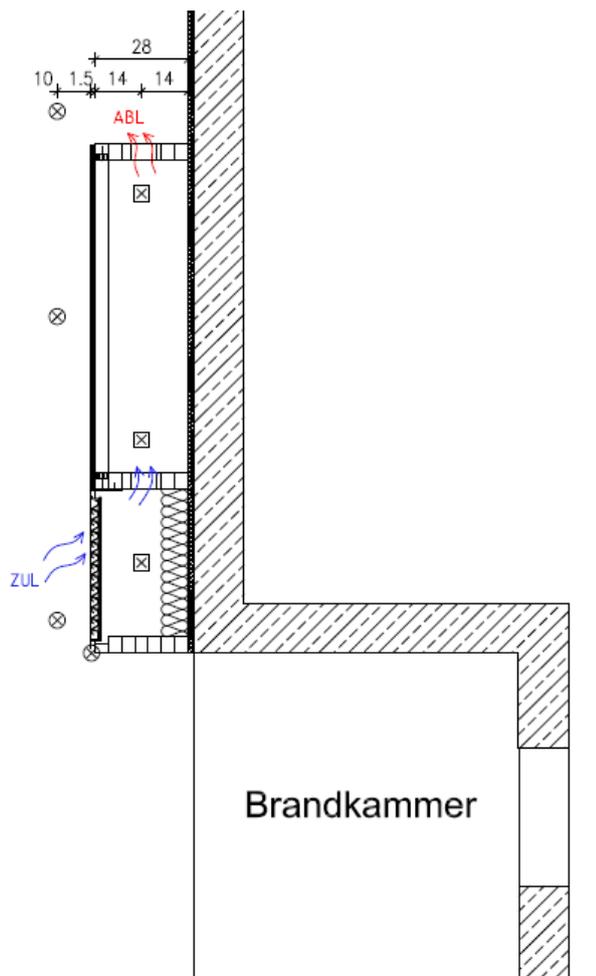


Abb. 5.38: Schnitt V1a [eigene Darstellung]

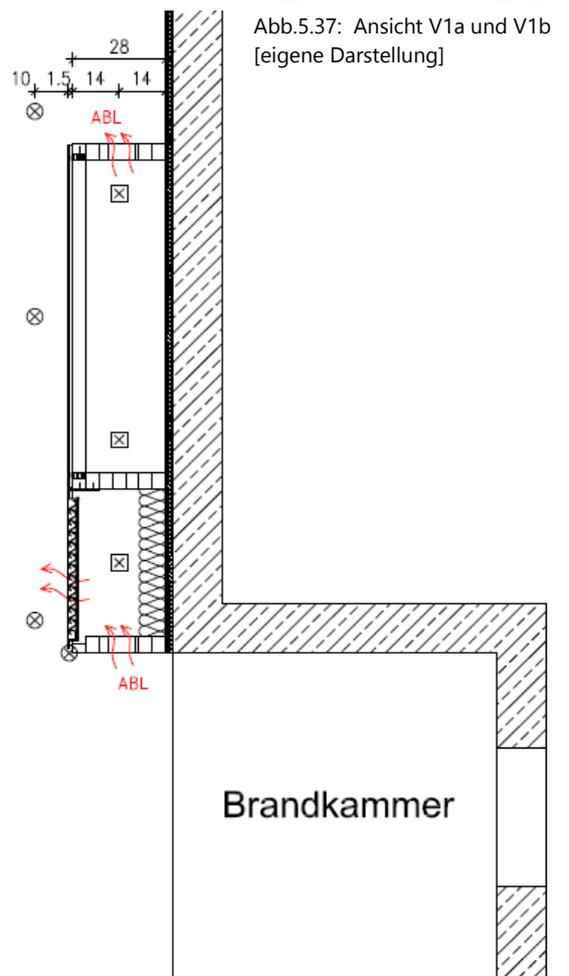


Abb. 5.39: Schnitt V1b [eigene Darstellung]

5.3.3 Materialien

Die Probekörper wurden mit folgenden Materialien hergestellt:

- Holzrahmen aus Brettschichtholz, BSH GL 24h, Fichte, Querschnitt: 50 x 280 mm
- Eckverbindungen des BSH-Konstruktion mit Hartholzdübeln und versenkten Holzschrauben
- Koppelrahmen aus BFU Birkenfurniersperrholz, Querschnitt: 20 x 40 mm, Oberfläche geschliffen, Qualität S/BB, Verleimungsklasse EN 314-2/KL3
- Verbundsicherheitsglas gemäß ÖNORM EN ISO 12543-2 aus 2 x 6 mm Floatglas, dazwischen Ethylenvinylacetat-Folie 0,38 bzw. 0,76 mm
- Holz-Glas-Verklebung mit 2K-Silikonklebstoff und Vorlegeband
- Verklotzung der Verglasung mit zwei Brandschutzklötzen auf 5 mm Flachstahlblech
- Edelstahlwinkel zur mechanischen Glasscheibensicherung
- Brandschutzsilikonverfugung entlang einer Seitenhälfte der Glaskante
- Aluminium-Lüftungslamellen mit Insektenschutzgitter
- Steinwolle-Dämmplatten gemäß ÖNORM EN 13162, D = 80 mm
- Stahlwinkel zur Verdübelung am Prüfstand

5.3.4 Herstellung und Montage

Die Fertigung der Brettschichtholzrahmen und der Koppelrahmen erfolgte in der Werkstatt der Firma Alco GmbH. Nach der Verklebung der Verglasung mit dem Koppelrahmen durch die Firma Petschenig GmbH wurde diese mit der Rahmenkonstruktion verschraubt. Die Brandschutzverfugung an einer Hälfte der Glaskanten erfolgte ebenfalls in der Werkstatt. Für die Befestigung der Thermoelemente in Fassadenzwischenraum wurden Stahldrähte in den entsprechenden Höhen zwischen die Rahmenkonstruktion gespannt.

Die Montage der Probekörper am Prüfstand der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien (MA 39) erfolgte mit Stahlwinkeln, die in die Rückwand verdübelt und mit dem BSH-Rahmen verschraubt wurden. Um die Unebenheiten zwischen der Wand des Prüfstands zur Rahmenkonstruktion auszugleichen, wurde die Fugen mit Steinwolle ausgestopft. Die Rückwand zwischen unterem und mittlerem BSH-Riegel wurde mit Steinwolle gedämmt. Abschließend wurde das Aluminium-Gitterelement eingesetzt und im Bereich des Rahmenprofils mit der Rahmenkonstruktion verschraubt. Die folgenden Abbildungen zeigen die wesentlichen Schritte des Herstellungsprozesses.



Abb. 5.40: Brettschichtholzrahmen in der Abbundhalle [Foto des Autors]



Abb. 5.41: HG-Elemente [Foto des Autors]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall



Abb. 5.42: Einsetzen des HGV-Elements in den BSH-Rahmen
[Foto des Autors]



Abb. 5.43: Verschrauben des HGV-Elements [Foto des Autors]



Abb. 5.44: Verfugung der Außenkante mit Brandschutzsilikon
[Foto des Autors]



Abb. 5.45: Detailansicht Verklotzung und Haltewinkel
[Foto des Autors]



Abb. 5.46: Montage des Probekörpers am Prüfstand
[Foto des Autors]



Abb. 5.47: Komplettierung mit Aluminium-Lüftungsgitter
[Foto des Autors]

5.3.5 Versuchsanordnung

Die Vorversuche wurden in Anlehnung an die Vorgaben der nationalen Prüfnorm ÖNORM B 3800-6 [N16] durchgeführt. Die Anordnung der Prüfkörper am Prüfstand über der Brandkammer entspricht in den Vorversuchen einer Flächenanordnung, wobei abweichend von den normativen Vorgaben nur ein Element unmittelbar über der Brandkammer ausgeführt wurde. Die Ausbildung der Eckanordnung erfolgt erst bei dem abschließenden Fassadenprüfversuch P1.

„Das Prüfverfahren dient der Beurteilung der Schadenswirkung auf die anschließende Baugruppe im Falle des Ausbrandes aus einer Baugruppe.“

5.3.5.1 Prüfstand

Die Anforderungen an den Prüfstand (siehe Abb. 5.48) sind gemäß [N16] folgendermaßen festgelegt:

„Der Prüfstand ist als Ecke einer Gebäudeaußenwand mit einer bereit für den Versuchsausbrand geöffneten Fläche zu betrachten. Der Prüfkörper ist unmittelbar auf die Wände des Prüfstandes anzubringen. Der Prüfstand selbst stellt dabei die innere der beiden Schalen der Kasten-Doppelfassade dar, wobei anstelle der Innenverglasung bzw. allfälliger Fenstereinbauten eine Calcium-Silikat-Platte ($g = (870 \pm 50) \text{ kg/m}^3$; $d = 15 \text{ mm}$) zu montieren ist; die äußere jedenfalls aus Glas bestehende Schale ist auf dem Prüfstand zu montieren

Der Prüfstand besteht aus zwei Wänden aus mineralischen Bauprodukten der Klasse des Brandverhaltens mindestens A2-s1, d0 gemäß ÖNORM EN 13501-1 (Dicke mindestens 15 cm), die im rechten Winkel zueinander stehen und zusammen eine Kante bilden. Die abgewinkelte Breite des Prüfstandes beträgt mindestens 4,5 m (Rückwand 3,0 m, Seitenwand 1,5 m) und die Höhe mindestens 5,0 m. In der Rückwand des Prüfstandes befindet sich in der unteren Ecke eine Brandkammer, die 1 m breit, 1 m hoch und 1 m tief ist. Die Unterkante der Brandkammer befindet sich auf Niveau der Fußboden-Oberkante. Die Wände der Brandkammer bestehen aus Bauprodukten der Klasse des Brandverhaltens mindestens A2-s1, d0 gemäß ÖNORM EN 13501-1. Die Breite der Brandkammer muss unabhängig von der Dicke des Prüfaufbaus immer 1 m betragen, d. h. die Position der Brandkammer in der Rückwand muss variabel sein. In der Rückwand der Brandkammer befindet sich mittig eine runde Öffnung mit einem Durchmesser von 0,42 m, durch die von hinten ein zusätzlicher Verbrennungsluftstrom auf die Brandlast geführt wird.“



Abb. 5.48: Eckprüfstand [eigene Darstellung]



Abb. 5.49: Prüfstand der MA 39
[Foto des Autors]

5.3.5.2 Brandlast, Zündung, Ventilation

Für die Vorversuche wurde als Brandlast eine 25 kg Holzkrippe verwendet, welche entsprechend den nachfolgend beschriebenen Vorgaben der ÖNORM B 3800-5 [N15] ausgeführt wurde:

„Zur Herstellung der Holzkrippe sind gehobelte Fichtenholzstäbe – jeweils 4 cm breit, 4 cm hoch und 50 cm lang – zu verwenden. Die Stäbe müssen so konditioniert werden, dass diese für den Zweck der Prüfung eine Holzfeuchte von maximal 10 % aufweisen. Aus 72 Stäben mit einer Gesamtmasse von $25 \text{ kg} \pm 1 \text{ kg}$ wird eine Holzkrippe hergestellt, indem die Stäbe in Lagen zu je 6 Stäben kreuzweise vernagelt werden. Dabei verbindet ein Nagel (Senkkopf blank; 2,8 mm x 65 mm) im äußersten Schnittpunkt jeweils zwei Stäbe. So entsteht eine Holzkrippe mit einer Grundfläche von 0,5 m x 0,5 m und einer Höhe von 0,48 m. Das Holz-Luft-Verhältnis beträgt durch die kreuzweise versetzte Lage der Stäbe annähernd 1 : 1.

[...] Die Brandlast wird in der Brandkammer hinter der Fassade – als außen bündig mit der Außenkante des Prüfstandes – platziert. Die Holzkrippe steht in 0,25 m Höhe auf einer allseits offenen Metallunterkonstruktion mit einer Grundfläche von 0,5 m x 0,5 m. Dieser Unterbau ist so auszuführen, dass eine ausreichende Durchlüftung der Holzkrippe sichergestellt ist. Der seitliche Abstand der Holzkrippe von den Wänden der Brandkammer beträgt jeweils 0,25 m. Die unterste Lage Stäbe liegt parallel zu den Seitenwänden der Brandkammer. Der Abstand der Oberseite der Holzkrippe von der Unterseite des Brandkammersturzes beträgt etwa 0,25 m. Die Vorderseite des Holzstapels schließt bündig mit der Vorderseite des Prüfstandes (nicht der Außenschicht des Prüfkörpers) ab.

[...] In die unterste Lage Holzstäbe, jeweils in den zweiten äußeren Zwischenraum, werden zwei Blechwannen (25 mm breit x 500 mm lang x 20 mm hoch) eingeschoben. Unmittelbar vor Beginn der Prüfung (frühestens 5 Minuten vor Prüfbeginn) werden in jede Wanne 200 ml Isopropanol gefüllt. Die Entzündung des Isopropanols erfolgt mit einer offenen Flamme.

[...] Die Anordnung des Prüfstandes in einem Raum ist so zu wählen, dass sowohl der Abbrand der Brandlast als auch der des Prüfkörpers unter natürlichen Lüftungsbedingungen erfolgen kann und dass für eine ausreichende Abführung der Rauchgase gesorgt ist.

Zur Sicherstellung eines kontinuierlichen Flammenaustritts aus der Brandkammeröffnung (Fenster) wird ein zusätzlicher Luftstrom durch eine runde Öffnung (Durchmesser 0,3 m) in der Rückwand der Brandkammer eingeblasen. Die Frischluft hat einen Volumenstrom von $400 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Zuschaltung des Lüfters erfolgt im Falle der Verwendung der Holzkrippe nach der teilweisen Entflammung nach der zweiten Minute.“

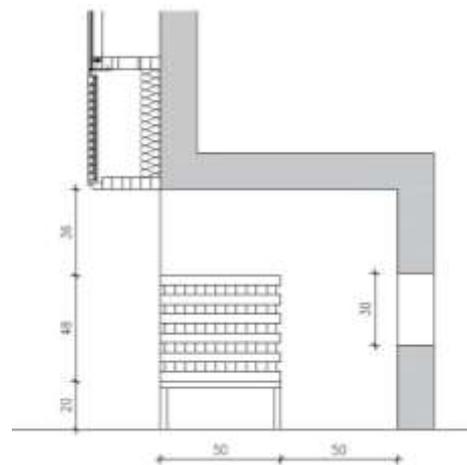


Abb. 5.50: Brandkammer mit 25 kg Holzkrippe [eigene Darstellung]



Abb. 5.51: Rückwand mit Brandkammeröffnung [Foto des Autors]

5.3.5.3 Temperaturmessung

Die Temperaturmessungen erfolgten auf Grund der reduzierten Höhe der Prüfkörper abweichend von den Vorgaben der ÖNORM B 3800-6 [N16].

Mittels am Prüfbaum befestigten Thermoelementen erfolgten die Messungen vor der Fassade an den folgenden Punkten:

- Im Sturzbereich auf der Mittelachse
- Vor den Lüftungslamellen auf der Mittelachse, ca. 100 mm vor der Fassade
- In der Mitte vor der Verglasung, ca. 100 mm vor der Fassade
- An der Fassadenoberkante auf der Mittelachse, ca. 100 mm vor der Fassade

In den Zwischenräumen der Doppelfassade erfolgten weitere Messungen an den folgenden Punkten:

- Drei Thermoelemente im Zwischenraum hinter dem Lüftungsgitter
- Drei Thermoelemente hinter der Verglasung, ca. 100 mm oberhalb des mittleren Riegels
- Drei Thermoelemente hinter der Verglasung, ca. 100 mm unterhalb des oberen Riegels

In den folgenden Abbildungen ist die Lage der Thermoelemente vor der Fassade (A.1 bis A.4, rot) und im Zwischenraum (Z.1 bis Z.9, blau) dargestellt. Für die Temperaturmessungen wurden Nickel-Chrom/Nickel Thermoelemente des Typs K verwendet.

Die Temperaturen wurden in Zeitintervallen von einer Sekunde aufgezeichnet.

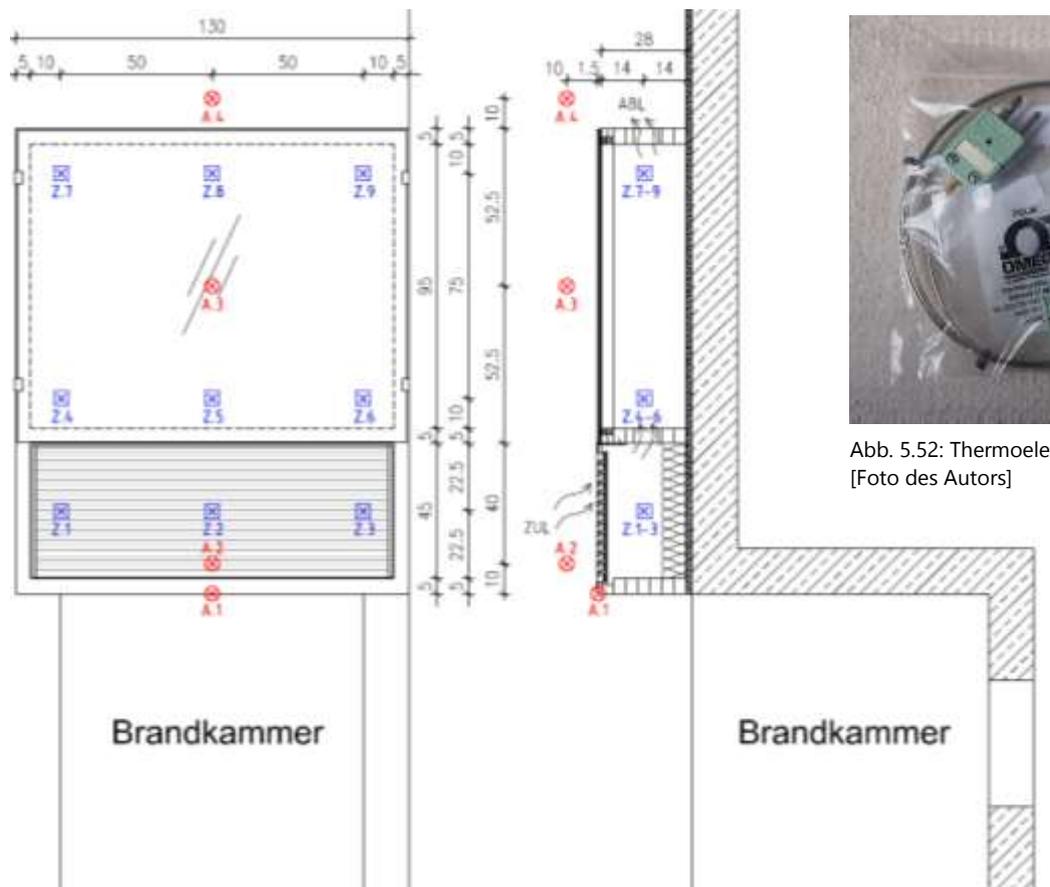


Abb. 5.52: Thermoelement Typ K
[Foto des Autors]

Abb. 5.53: Ansicht und Schnitt mit Darstellung der Thermoelemente [eigene Darstellung]

5.3.6 Durchführung der Vorversuche V1a und V1b

Die beiden Versuche V1a und V1b wurden am 30. 06. 2016 in der Prüfhalle der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien durchgeführt. Die Umgebungstemperatur betrug vor Versuchsbeginn ca. 27 °C und lag damit innerhalb des in [N16] geforderten Bereichs von 5° C und 30 °C. Unmittelbar vor der Durchführung der Versuche wurde die Holzfeuchtigkeit an drei Stellen des BSH-Rahmens gemessen. Beim Probekörper V1a lag diese zwischen 10,5 % bis 11,4 % und bei V1b zwischen 10,7 % bis 11,1 %.

Mit der Zündung des Isopropanols in den Blechwannen unterhalb der Holzkrippe wurden die Prüfungen gestartet. Nach der zweiten Prüfminute wurde der Lüfter mit einem Luftvolumenstrom von 400 m³/h zugeschaltet. Nach 30 Minuten wurden die Prüfungen beendet. Die Prüfungen wurden sowohl fotografisch als auch mittels Videokamera dokumentiert. Gemäß den Vorgaben von [N16] wurden während der Prüfung folgende Beobachtungen vorgenommen:

- Visuelle Beobachtung der Flammenausbreitung
- Visuelle Beobachtung des Herabfallens von Teilen und Elementen der Fassade

5.3.6.1 Beobachtungen beim Vorversuch V1a

Der Versuch V1a wurde um 09:47:42 gestartet. Mit dem Zuschalten des Lüfters ab der dritten Minute traten die Flammen über den Sturzbereich vor die Fassadenebene hinaus und erstreckten sich entlang des Lüftungsgitters und der Glasscheibe. Ab der vierten Minute reichten einige Flammenspitzen bereits über die Oberkante des Prüfobjekts, und die Aluminiumlamellen begannen zu schmelzen und nichtbrennend abzutropfen bzw. teilweise abzufallen. Ab der fünften Minute wurden erste Flammen im Bereich der unteren Zuluftöffnung des Fassadenzwischenraums sichtbar. Anschließend traten erste Risse in der Scheibe auf, und in weiterer Folge fielen kleinere Teile der äußeren VSG-Scheibenebene herab. Gegen Ende der sechsten Minute war der Brand im Fassadenzwischenraum so weit fortgeschritten, dass erste Flammen bei der oberen Abluftöffnung des Zwischenraums austraten. Auf Grund des "Kamineffekts" bildete hinter der Verglasung ein voll entwickelter Brand, welcher in der elften Minute zum Verlust des Raumabschlusses bei teilweisem Herabfallen der Verglasung in der rechten Hälfte führte. Durch die Öffnung in der Verglasung wurde die Brandintensität im Zwischenraum deutlich reduziert. Entlang den Bruchkanten der Verglasung brannte auch die Etylvinylacetatfolie mit. Ab der 13. Minute war der überwiegende Teil der Verglasung herabgefallen. Die Holzkrippe brach nach 23 Minuten zusammen. Nach 30 Minuten wurde der Versuch beendet und das Prüfobjekt abgelöscht.



Abb. 5.54.:Flammenausbreitung entlang der Verglasung (4. Minute)
[Foto des Autors]



Abb. 5.55.:Spannungsrisse in der äußeren Glasscheibe (6. Minute)
[Foto des Autors]



Abb. 5.56: voll entwickelter Brand im Fassadenzwischenraum (10. Minute) [Foto des Autors]



Abb. 5.57: Herabfallen der Verglasung (11. Minute) [Foto des Autors]



Abb. 5.58: verminderte Brandintensität (17. Minute) [Foto des Autors]



Abb. 5.59: Holzkippe vor dem Zusammenbruch (22. Minute) [Foto des Autors]

5.3.6.2 Beobachtungen beim Vorversuch V1b

Der Versuch V1b wurde um 13:22:49 gestartet. Mit dem Zuschalten des Lüfters ab der zweiten Minute traten die Flammen über den Sturzbereich vor die Fassadenebene hinaus. Ab der dritten Minute reichten die Flammenspitzen bis über die Oberkante des Prüfkörpers – im Unterschied zum vorhergehenden Versuch V1a breiteten sich die Flammen nicht unmittelbar entlang der Glasscheibe aus, sondern wurden durch den Luftvolumenstrom des Lüfters horizontal von der Fassadenebene abgeleitet. Weiters begannen die Aluminiumlamellen in der vierten Minute zu schmelzen und abzutrofen bzw. abzufallen. Ab der fünften Minute traten erste Risse in der Verglasung auf. Im Zwischenraum hinter den restlichen Lüftungslamellen hatte sich ein voll entwickelter Brand entwickelt, und es traten erste Flammen auch in linken Randbereich zwischen den Lamellen aus. In der sechsten Minute fielen weitere Lamellen im linken oberen Bereich ab. Bis zur 16. Minute verlief der Brand mit sehr starker Intensität, jedoch ohne besondere Ereignisse beim Prüfobjekt weiter. Danach nahm die Brandintensität kontinuierlich ab, bis die Holzkippe gegen Ende der 21. Minute zusammenbrach. Am unteren BSH-Riegel züngelten vereinzelt noch kleine Flammen bis zur 26. Minute, danach waren keine Flammen am Probekörper zu erkennen. Nach 30 Minuten wurde der Versuch beendet und das Prüfobjekt abgelöscht.

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall



Abb. 5.60: Schmelzen der Aluminiumlamellen (4. Minute)
[Foto des Autors]



Abb. 5.61: Fassadenzwischenraum und Verglasung unversehrt bei hoher Brandbelastung (10. Minute) [Foto des Autors]



Abb. 5.62: verminderte Brandintensität (20. Minute)
[Foto des Autors]



Abb. 5.63: Nach dem Zusammenbruch der Holzkrippe (23. Minute) [Foto des Autors]

5.3.7 Feststellungen nach der Prüfung

Gemäß [N16] ist eine allfällige Schädigung des Prüfkörpers ausführlich zu dokumentieren. Kriterien für die positive Beurteilung des Prüfkörpers ist die Brandweiterleitung im Zwischenraum der Kasten-Doppelfassade, das Herabfallen von großen Teilen und Elementen der Konstruktion sowie eine mögliche sonstige Gefährdung im Brandfall.

5.3.7.1 Prüfkörper V1a nach Versuchsende

Zu Versuchsende nach der 30. Minute (vor dem Ablöschen) befand sich das Prüfobjekt in folgendem Zustand:

- Verglasung zersplittert und mit Ausnahme der vertikalen Randbereiche herabgefallen
- Raumabschluss nicht mehr vorhanden
- EVA-Folie brennt an der Bruchkante in der linken unteren Ecke
- Holz-Glas-Verklebung im Bereich der vertikalen Ränder noch erhalten und tragfähig
- BSH-Rahmenkonstruktion im Brandbereich verkohlt, Glut und kleine Flammen im Bereich des mittleren und oberen Riegels
- Koppelleiste verkohlt, teilweise abgefallen
- Aluminiumlamellen teilweise geschmolzen und herabgefallen



Abb. 5.64: V1a nach Versuchsende
[Foto des Autors]

5.3.7.2 Prüfkörper V1b nach Versuchsende

Zu Versuchsende in der 30. Minute (vor dem Ablöschen) befand sich das Prüfobjekt in folgendem Zustand:

- Verglasung weist Risse bzw. kleine abgefallene Teile der äußeren Floatglasscheibe der VSG-Verglasung in der rechten unteren Ecke auf
- Raumabschluss ist gegeben
- Holz-Glas-Verklebung erhalten und tragfähig
- BSH-Rahmenkonstruktion im Brandbereich verkohlt; Glut, aber keine offenen Flammen
- Koppelleiste im unteren Bereich teilweise verkohlt
- Aluminiumlamellen teilweise geschmolzen und herabgefallen



Abb. 5.65: V1b nach Versuchsende
[Foto des Autors]

5.3.7.3 Vergleich des Abbrandes anhand der Probekörper V1a und V1b

Nach der Demontage der Probekörper wurden dem Brettschichtholzrahmen an den gekennzeichneten Stellen Teilstücke entnommen, um den Abbrand an den jeweiligen Bereichen zu untersuchen (siehe grüne und blaue Markierungen).

Je nach Lage und Ventilationsbedingungen der BSH-Elemente trat bei den vertikalen Pfosten (Pos. 4 bis 7) ein Abbrand von bis zu ca. 15 mm auf. Dies entspricht einer Abbrandrate von bis zu 0,75 mm/min, bei der Betrachtung des auf Grund der Brandintensität für den Abbrand maßgeblichen Zeitraums zwischen der 3. bis zur 23. Minute während des Versuchs. Bei den horizontalen Riegelprofilen (Pos. 1 bis 3) traten zum Teil auch deutlich höhere Abbrandraten auf. Diese wesentlich höheren Abbrandraten sind auf den drei- bis vierseitigen Abbrand bei sehr schlanken Holzquerschnitten in Verbindung mit Delaminierungserscheinungen zurückzuführen. Im Vergleich der beiden Probekörper (links: V1a, rechts: V1b) ist deutlich zu erkennen, dass im Zwischenraum hinter der Verglasung bei V1b kein Abbrand der Rahmenkonstruktion auftrat.

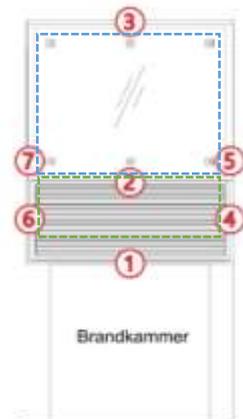


Abb. 5.66: Übersicht V1a, V1b mit Farblgende



Abb. 5.67: V1a-Pos.1 [Foto des Autors]



Abb. 5.68: V1b-Pos.1 [Foto des Autors]

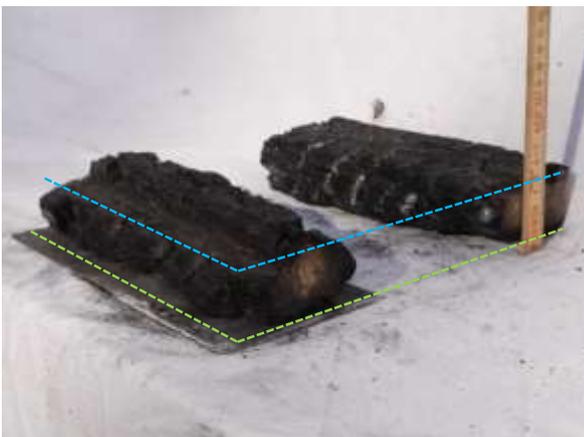


Abb. 5.69: V1a-Pos.2 [Foto des Autors]

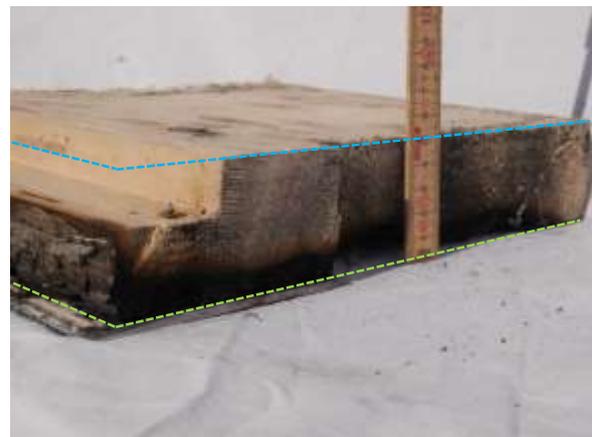


Abb. 5.70: V1b-Pos.2 [Foto des Autors]



Abb. 5.71: V1a-Pos.3 [Foto des Autors]



Abb. 5.72: V1b-Pos.3 [Foto des Autors]



Abb. 5.73: V1a-Pos.4 [Foto des Autors]



Abb. 5.74: V1b-Pos.4 [Foto des Autors]



Abb. 5.75: V1a-Pos.5 [Foto des Autors]



Abb. 5.76: V1b-Pos.5 [Foto des Autors]



Abb. 5.77: V1a-Pos.6 [Foto des Autors]



Abb. 5.78: V1b-Pos.6 [Foto des Autors]



Abb. 5.79: V1a-Pos.7 [Foto des Autors]



Abb. 5.80: V1b-Pos.7 [Foto des Autors]

5.3.8 Auswertung der Temperaturdaten

Die Temperaturdaten der Thermoelemente der beiden Vorversuche sind in den folgenden Diagrammen und Tabellen ausgewertet. Deutlich sichtbar sind die unterschiedlichen Temperaturverläufe vor der Verglasung bei den beiden Versuchen zu erkennen, welche im Zusammenhang mit dem Auftreten bzw. der Verhinderung des Kamineffekts und der dadurch verbundenen Beeinflussung der Strömung der Brandgase durch die unterschiedlichen Anordnungen der Lüftungsöffnungen des Fassadenelements stehen. Bei dem Versuch V1a trat an der Außenseite der Verglasung (bis zum Zeitpunkt des Verlusts des Raumabschlusses) eine überwiegend anliegende Flamme mit Temperaturen bis zu 336°C auf, während es beim Versuch V1b auf Grund des geschlossenen BSH-Riegels im Bereich der Verglasungsunterkante zu einer horizontalen Ablenkung der Flamme und dadurch zu geringeren Temperaturen von maximal 262 °C kam.

Im Hinblick auf den geplanten Fassadenversuch gemäß ÖNORM B 3800-8 [N17] wurde auch die Temperaturerhöhung im Fassadenzwischenraum um mehr als 250 K untersucht und als Grenzwert im Diagramm dargestellt. Die Bezeichnung der Thermoelemente erfolgt in den Diagrammen wie in Abbildung 5.19. Bei Versuch V1a wurde dieses Temperaturkriterium bereits in der dritten Minute überschritten (02:33 – 281°C in der oberen Reihe im Zwischenraum). Bis zum Verlust des Raumabschlusses der Glasscheibe traten Temperaturen bis zu 776°C im Zwischenraum hinter der Verglasung auf und waren damit deutlich höher als die Temperaturen vor der Glasscheibe (bei A.3). Bei Versuch V1b betrug die maximale Temperatur im Zwi-

schonraum hinter der Glasscheibe 84°C und somit auch deutlich unter dem erforderlichen Temperaturkriterium von 250K.

5.3.8.1 Auswertung Vorversuch V1a

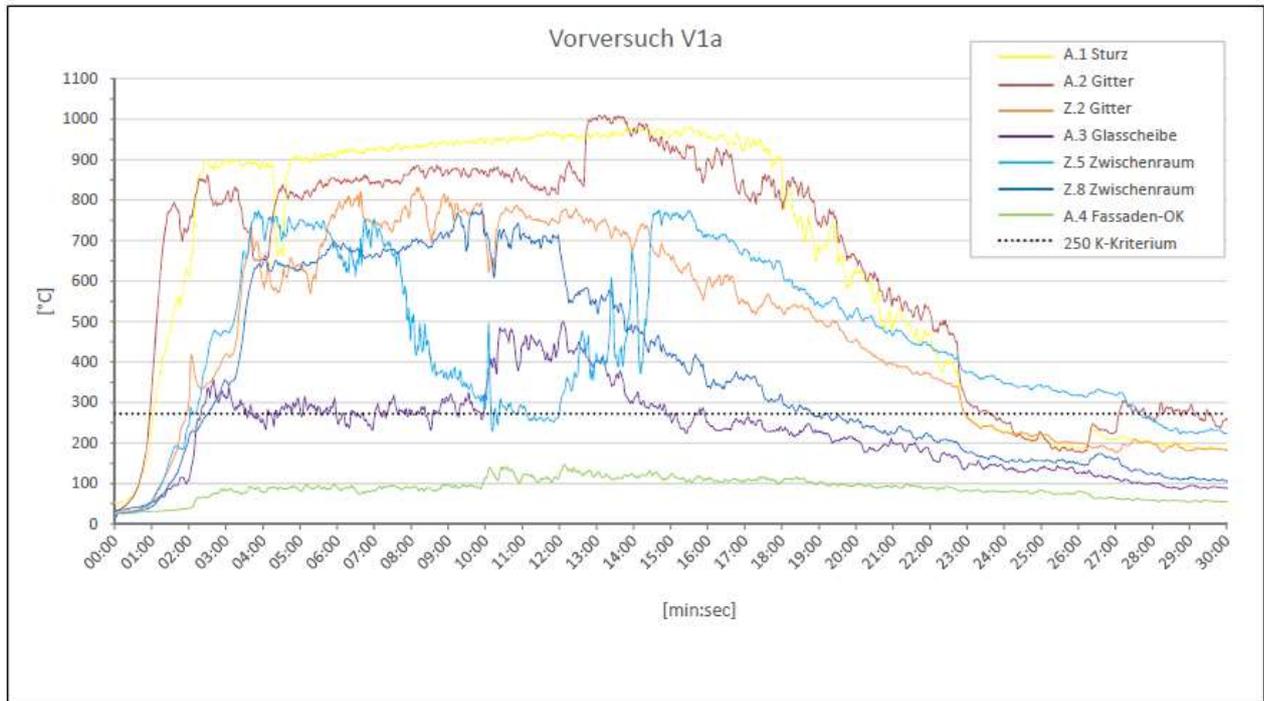


Abb. 5.81: Temperatur-Zeit Diagramm V1a [eigene Darstellung]

Vorversuch V1a									
Kriterium	Zeit	Δt	A.1 Sturz	A.2 Gitter	Z.2 Gitter	A.3 Glas	Z.5 Zw.raum	Z.8 Zw.raum	A.4 Fass.-OK
	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Versuchsbeginn	09:47:42	00:00:00	52	32	28	32	27	27	27
T max. vor der Glasscheibe	09:50:13	00:02:31	894	858	348	336	419	273	67
Temperaturerhöhung über 250 K im ZR	09:50:15	00:02:33	880	821	350	312	447	281	68
Aluminiumlamellen schmelzen	09:51:22	00:03:40	890	736	720	286	735	598	92
Risse in der Glasscheibe	09:52:12	00:04:30	673	830	593	287	700	640	88
T max. im ZR (Abfallen der Glasscheibe)	09:57:59	00:10:17	954	877	712	380	276	660	115
T max. im Sturzbereich	10:03:12	00:15:30	982	934	628	242	769	374	106
Versuchsende	10:18:13	00:30:31	180	231	180	90	217	105	57

Abb. 5.82: tabellarische Auswertung V1a [eigene Darstellung]

5.3.8.2 Auswertung Vorversuch V1b

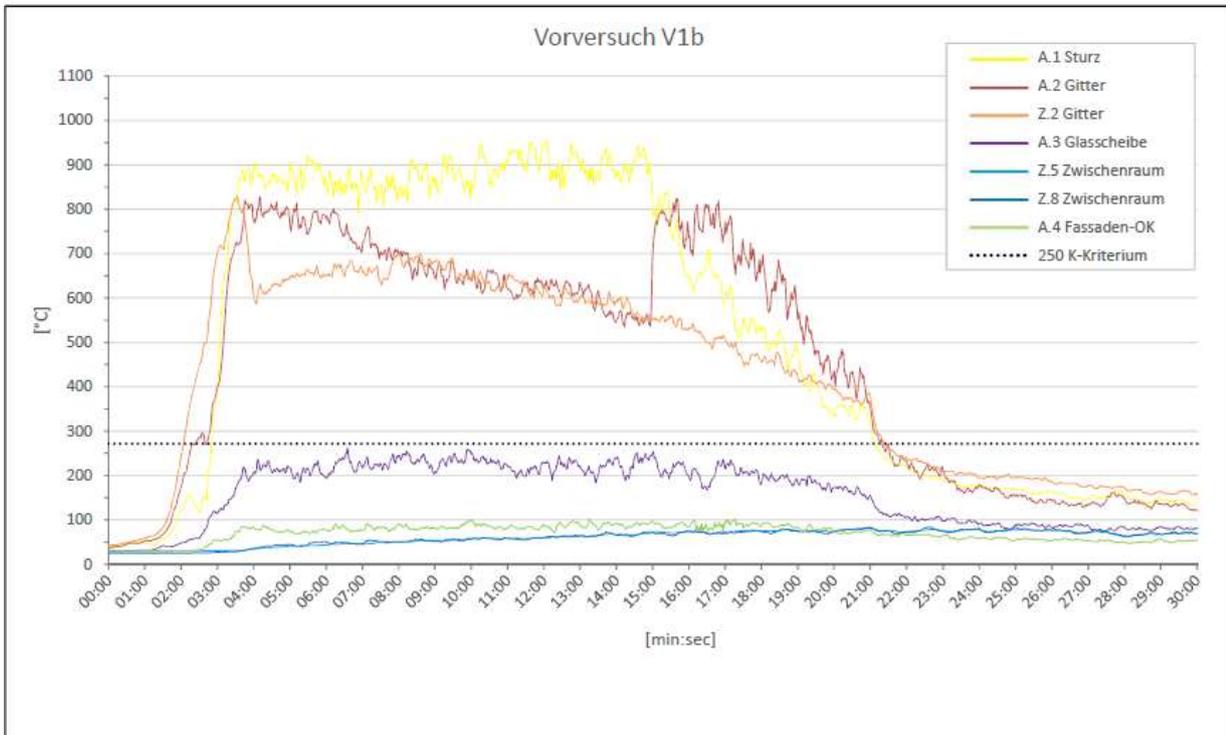


Abb. 5.83: Temperatur-Zeit Diagramm V1b [eigene Darstellung]

Vorversuch V1b										
Kriterium	Zeit	Δt	A.1 Sturz	A.2 Gitter	Z.2 Gitter	A.3 Glas	Z.5 Zw.raum	Z.8 Zw.raum	A.4 Fass.-OK	
	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Versuchsbeginn	13:22:39	00:00:00	40	37	43	29	29	25	28	
Aluminiumlamellen schmelzen	13:25:54	00:03:15	870	722	807	190	31	29	74	
Risse in der Glasscheibe	13:27:09	00:04:30	871	786	636	214	10	44	74	
T max. vor der Glasscheibe	13:28:53	00:06:14	863	757	673	262	46	49	79	
T max. im Sturzbereich	13:34:23	00:11:44	956	639	617	229	60	61	86	
T max. im ZR (Raumabschluss gegeben)	13:43:16	00:20:37	332	365	387	149	81	84	78	
Versuchsende	13:52:50	00:30:11	148	154	155	74	70	70	51	

Abb. 5.84: tabellarische Auswertung V1b [eigene Darstellung]

5.3.9 Schlussfolgerungen

Auf Grund der Beobachtungen und Ergebnisse der beiden Vorversuche V1a und V1b war evident, dass die Belüftungssituation von V1a im Hinblick auf die weiteren Versuche das Worst-Case-Szenario darstellt. Für die weiteren Versuche wurde daher folgende Festlegungen getroffen:

- Die Belüftungssituation und der damit einhergehende Kamineffekt im Fassadenzwischenraum der geprüften Doppelfassadenprototypen beeinflusst maßgeblich die Brandweiterleitung und den Temperaturverlauf im Bereich der Verglasung.
- Der Einsatz von brennbaren Baustoffen (Brettschichtholz, Furnierschichtholz, Klebstoffe) stellt bei den durchgeführten Vorversuchen im Vergleich zur Anordnung der Lüftungsöffnungen im Zwischenraum der Doppelfassade ein untergeordnetes Kriterium hinsichtlich der nachzuweisenden Schutzziele dar.
- Der gewählte Aufbau der VSG-Verglasung erscheint auf Grund der positiven Ergebnisse bei V1b auch für die folgenden Vorversuche geeignet. Varianten mit unterschiedlichen Verglasungsarten (z.B. Feuerschutzverglasung), wie zu Beginn dieses Abschnitts konzipiert, sind daher nicht erforderlich.
- Die bei der ersten Vorversuchsreihe eingesetzten Ethylenvinylacetat-Folien für die Verbund sicherheitsgläser weisen ein geeignetes Brandverhalten auf und werden daher auch für die folgenden Versuche eingesetzt.
- Bei der Verglasung war kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Bereichen mit und ohne Brandschutzversiegelung entlang der Glaskanten ersichtlich. Für die folgenden Versuche wurde daher festgelegt, die Brandschutzversiegelung entlang der Glaskante nicht auszuführen.
- Auf Grund der Funktionsfähigkeit der Holz-Glas-Verklebung wurde außerdem festgelegt, die weiteren Versuche ohne Verklotzung für den Eigengewichtsabtrag und ohne mechanische Sicherung in Form von Edelstahlwinkeln auszuführen.

5.4 Vorversuche V2 und V3

5.4.1 Zielsetzung

In dieser Vorversuchsreihe werden auf Grundlage des Worst-Case-Szenarios V1a der vorhergehenden Versuche und den daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen weitere Maßnahmen zur Verhinderung des Kamineffekts im Bereich des Fassadenzwischenraums der Kastendoppelfassade untersucht.

Bei der Vorversuchsanordnung V2 wird im Zuluftbereich über dem Sturz ein Lüftungsgitter aus Stahlblech mit Z-förmigen Lamellen mit einer Materialstärke von 1,5 mm angeordnet. Hinter der vorderen Gitterebene wird ein weiteres Lüftungsgitter mit gegenläufig geneigten Z-Lamellen vorgesehen. Auf Grund dieser Geometrie soll ein höherer Strömungswiderstand erreicht werden, wodurch positive Auswirkungen hinsichtlich der Verhinderung einer Kaminwirkung im Zwischenfassadenraum zu erwarten sind.

Bei der Vorversuchsanordnung V3 wird im Unterschied zu V2 nur ein Lüftungsgitter aus Stahlblech mit Z-förmigen Lamellen mit einer Materialstärke von 1,5 mm im Zuluftbereich über dem Sturz angeordnet. Die Zuluftöffnung im mittleren BSH-Riegel wird hinsichtlich ihrer Geometrie modifiziert und mit Brandsperren aus Stahlgittergewebe mit intumeszierenden Streifen versehen - es handelt sich dabei um ein Produkt mit einer Klassifizierung EI 30 gemäß ÖNORM EN 13501-2 [N27], welches hinsichtlich der Einbauart mit der Herstellerfirma abgestimmt wurde. Durch diese Versuchsanordnung wird eine wirksame Verhinderung einer Kaminwirkung im Fassadenzwischenraum ähnlich der Prüfanordnung V1b erwartet.

5.4.2 Probekörper

Die Ausbildung der Probekörper baut auf den Systemdetails der HGV-Kastendoppelfassade Typ DF02 und den Probekörper V1a der ersten Vorversuchsreihe auf.

Wie bei der ersten Versuchsreihe, wurden die Probekörper nur mit der äußeren Fassadenebene hergestellt.

Die Elementgröße entspricht mit (B x H x T) 1300 x 1550 x 295 mm denselben Maßen wie bei V1a und V1b.

Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zwischen V2 und V3 ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Das Lüftungsgitter von V2 ist mit zwei spiegelsymmetrischen Lüftungsgittern aus Stahlblechprofilen ausgeführt. Bei V3 ist nur ein Lüftungsgitter aus Stahlblechlamellen vorhanden, zusätzlich sind im Bereich der Öffnungen des mittleren BSH-Riegels Brandsperren aus Stahlgewebe mit intumeszierenden Streifen enthalten.

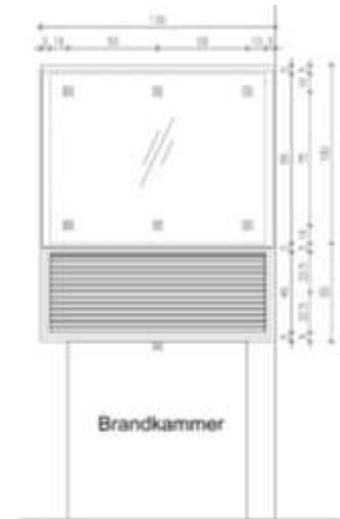


Abb. 5.85: Ansicht V2 und V3 [eigene Darstellung]

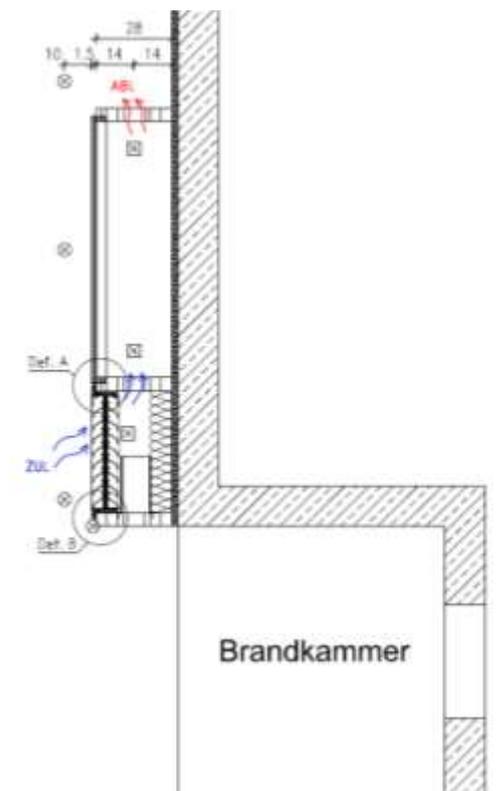


Abb. 5.86: Schnitt V2 [eigene Darstellung]

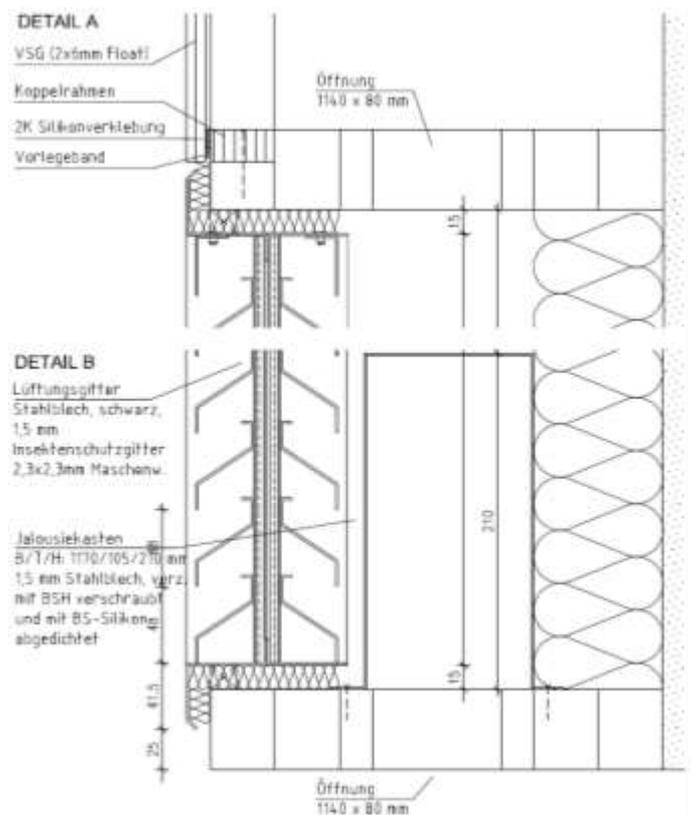


Abb. 5.87: Detailschnitte A und B [eigene Darstellung]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

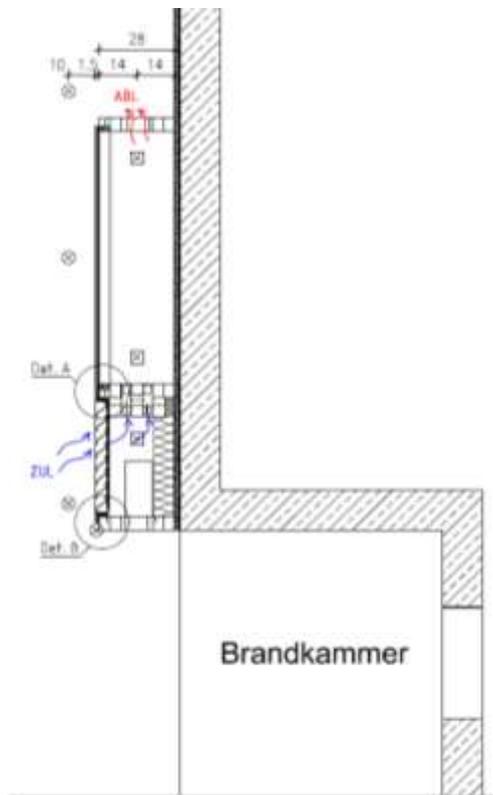


Abb. 5.88: Schnitt V3 [eigene Darstellung]

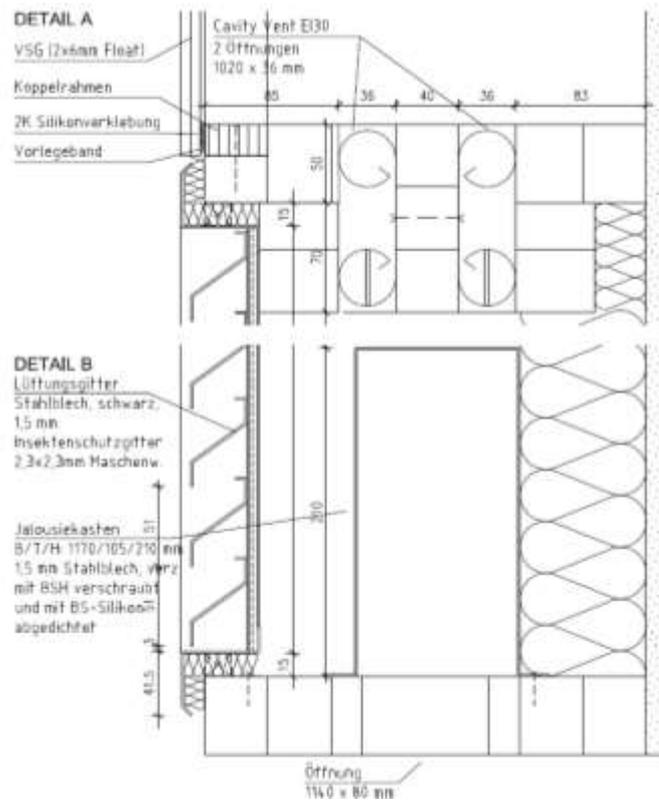


Abb. 5.89: Detailschnitte A und B [eigene Darstellung]



Abb. 5.90: V2 - Zuluftöffnung und Jalousiekasten (Ansicht von der Rückseite) [Foto des Autors]



Abb. 5.91: V3 - Brandsperren und Stahllamellengitter [Foto des Autors]

5.4.3 Materialien

Die Probekörper wurden mit folgenden Materialien hergestellt:

- Holzrahmen aus Brettschichtholz, BSH GL24h, Fichte, Querschnitt: 50 x 280 mm
- Eckverbindungen des BSH-Konstruktion mit Hartholzdübeln und versenkten Holzschrauben
- Koppelrahmen BFU Birkenfurniersperrholz, Querschnitt: 20 x 40 mm, Oberfläche geschliffen, Qualität S/BB, Verleimungsklasse EN 314-2/KL3
- Verbundsicherheitsglas gemäß ÖNORM EN ISO 12543-2 aus 2 x 6 mm Floatglas, dazwischen 0,76 mm Ethylenvinylacetat-Folie
- Holz-Glas-Verklebung mit 2K-Silikonklebstoff und Vorlegeband
- Lüftungslamellen aus Stahlblech mit Insektenschutzgitter
- Jalousiekasten aus Stahlblech
- EI 30 Brandsperren aus Stahlgewebe mit intumeszierenden Streifen bei V3
- Steinwolle-Dämmplatten gemäß ÖNORM EN 13162, D = 80 mm
- Stahlwinkel zur Verdübelung am Prüfstand

5.4.4 Herstellung und Montage

Die Fertigung durch die Firma Alco GmbH sowie die Montage der Probekörper am Prüfstand der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien (MA 39) erfolgte wie bei den Vorversuchen V1a und V1b und wird daher nicht gesondert beschrieben.

5.4.5 Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung (Prüfstand, Brandlast, Temperaturmessung etc.) erfolgte wie bei der Vorversuchsreihe V1a und V1b.

5.4.6 Durchführung der Vorversuche V2 und V3

Die beiden Versuche V2 und V3 wurden am 10.8.2016 in der Prüfhalle der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien durchgeführt. Die Umgebungstemperatur betrug vor der Versuchsdurchführung ca. 22 °C und lag damit innerhalb des gemäß ÖNORM B 3800-6 [N16] geforderten Bereichs von 5° C und 30 °C. Unmittelbar vor der Durchführung der Versuche wurde die Holzfeuchtigkeit an drei Stellen des BSH-Rahmens gemessen. Beim Probekörper V2 lag diese zwischen 10,5 % bis 10,8 % und bei V3 zwischen 10,5 % bis 11,1 %.

Mit der Zündung des Isopropanols in den Blechwannen unterhalb der Holzkrippe wurden die Prüfungen gestartet. Nach der zweiten Prüfminute wurde der Lüfter mit einem Luftvolumenstrom von 800 m³/h zugeschaltet. Nach 30 Minuten wurden die Prüfungen beendet.

Die Prüfungen wurden sowohl fotografisch als auch mittels Videokamera dokumentiert.

Gemäß den Vorgaben von [N16] wurden während der Prüfung folgende Beobachtungen vorgenommen:

- Visuelle Beobachtung der Flammenausbreitung
- Visuelle Beobachtung des Herabfallens von Teilen und Elementen der Fassade

5.4.6.1 Beobachtungen beim Vorversuch V2

Der Versuch V2 wurde um 10:29:07 gestartet. Mit dem Zuschalten des Lüfters ab der dritten Minute traten die Flammen über den Sturzbereich vor die Fassadenebene hinaus und breiteten sich weiter entlang des Lüftungsgitters und der Glasscheibe aus. Die Flammenhöhe erreichte vereinzelt bereits die Oberkante des

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

Prüfobjektes. Im Bereich der Lüftungslamellen waren Rotationswirbel an den Flammenrändern zu erkennen. Bis zur achten Minute traten keine besonderen Ereignisse bei dem Prüfkörper auf. Gegen Ende der achten Minute waren erste Flammen im Fassadenzwischenraum zu sehen, und in der zehnten Minute traten erste Flammen aus der obereren Öffnung des Zwischenraums aus. Ab der elften Minute war hinter der Verglasung ein voll entwickelter Brand entstanden, welcher in Folge nach 11 min., 58 sec. zum Herabfallen von ersten Teilen der äußeren Floatglasscheibe in der rechten unteren Ecke führte. Ab der 13. Minute war an den Bruchkanten der Verglasung das Mitbrennen der Folie zu erkennen, und weitere Teile der äußeren VSG-Scheibe fielen herab - der Raumabschluss blieb weiterhin erhalten. Ab der 18. Minute trat im Fassadenzwischenraum entlang der linken Kante eine deutliche Intensivierung des Brandes in Verbindung mit einem Kamineffekt auf. In der 21. Minute ging der Raumabschluss an der rechten unteren Ecke der Verglasung verloren. In Folge fielen einzelne Teile der Verglasung in der rechten unteren Ecke ab. Nach 30 Minuten wurde der Versuch beendet und das Prüfobjekt abgelöscht.



Abb. 5.92: V2 – Rotationswirbel im Lamellenbereich [Foto des Autors]



Abb. 5.93: V2 – Flammenaustritt bei Abluftöffnung [Foto des Autors]



Abb. 5.94: V2 – Verlust des Raumabschlusses der Verglasung in der rechten unteren Ecke [Foto des Autors]



Abb. 5.95: V2 – Ethylvinylacetatfolie brennt entlang den Bruchkanten [Foto des Autors]



Abb. 5.96: V2 – Kamineffekt im linken Bereich des Fassadenzwischenraums [Foto des Autors]



Abb. 5.97: V2 – Holzkrippe bricht zusammen [Foto des Autors]

5.4.6.2 Beobachtungen beim Vorversuch V3

Der Versuch V3 wurde um 14:08:44 gestartet. Mit dem Zuschalten des Lüfters ab der dritten Minute traten die Flammen über den Sturzbereich vor die Fassadenebene hinaus und breiteten sich weiter entlang des Lüftungsgitters und der Glasscheibe aus. Ab der vierten Minute erreichten die Flammen teilweise die Oberkante des Prüfobjektes. Im Bereich der Lüftungslamellen waren Rotationswirbel an den Flammenrändern zu erkennen. Bis zur 13. Minute entwickelte sich der Brand mit steigender Intensität, es traten jedoch keine besonderen Ereignisse bei dem Prüfkörper auf. Danach nahm die Brandintensität wieder ab, und ab der 20. Minute reichten die Flammen der Holzkrippe nicht mehr an den Sturz der Prüffassade. Aus dem Zwischenraum hinter den Stahlblechgittern traten jedoch immer wieder Flammen aus. Die Holzkrippe fiel in der 20. Minute zusammen. Nach 30 Minuten wurde der Versuch beendet und das Prüfobjekt abgelöscht.



Abb. 5.98: V3 – Flammenausbreitung zum Zeitpunkt des Zuschaltens des Lüfters [Foto des Autors]



Abb. 5.99: V3 – Flammenausbreitung vor den Fassadenbereich [Foto des Autors]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall



Abb. 5.100: V3 – Fassadenzwischenraum ohne Branderscheinungen [Foto des Autors]



Abb. 5.101: V3 – Temperaturmaximum im Sturzbereich [Foto des Autors]



Abb. 5.102: V3 – Holzkrippe bricht zusammen [Foto des Autors]



Abb. 5.103: V3 – keine sichtbaren Brandereignisse am Prüfobjekt [Foto des Autors]

5.4.7 Feststellungen nach der Prüfung

Gemäß [N16] ist eine allfällige Schädigung des Prüfkörpers ausführlich zu dokumentieren. Kriterien für die positive Beurteilung des Prüfkörpers ist die Brandweiterleitung im Zwischenraum der Kasten-Doppelfassade, das Herabfallen von großen Teilen und Elementen der Konstruktion sowie eine mögliche sonstige Gefährdung im Brandfall.

5.4.7.1 Prüfkörper V2 nach Versuchsende

Zu Versuchsende nach der 30. Minute (vor dem Ablöschen) befand sich das Prüfobjekt in folgendem Zustand:

- Verglasung zersplittert und in der rechten unteren Ecke herabgefallen
- Raumabschluss nicht mehr gegeben
- Holz-Glas-Verklebung überwiegend noch erhalten und tragfähig
- BSH-Rahmenkonstruktion im Brandbereich verkohlt, Glut und teilweise noch Flammen im Fassadenzwischenraum und am oberen Riegel
- Koppelleiste in der rechten unteren Ecke verkohlt, teilweise abgefallen
- Stahllamellen unversehrt



Abb. 5.104: V2 nach Versuchsende
[Foto des Autors]

5.4.7.2 Prüfkörper V3 nach Versuchsende

Zu Versuchsende in der 30. Minute (vor dem Ablöschen) befand sich das Prüfobjekt in folgendem Zustand:

- Verglasung unversehrt und ohne Risse
- Raumabschluss ist gegeben
- Holz-Glas-Verklebung erhalten und tragfähig
- BSH-Rahmenkonstruktion im Lamellenbereich verkohlt, Glut, aber keine Flammen
- Koppelleiste im unteren Bereich teilweise verkohlt
- Stahllamellen unversehrt



Abb. 5.105: V3 nach Versuchsende
[Foto des Autors]

5.4.7.3 Vergleich des Abbrandes anhand der Probekörper V2 und V3

Nach der Demontage der Probekörper wurden dem Brettschichtholzrahmen an den gekennzeichneten Stellen Teilstücke entnommen, um den Abbrand an den jeweiligen Bereichen zu untersuchen (siehe grüne und blaue Markierungen).

Je nach Lage und Ventilationsbedingungen der BSH-Elemente trat bei den vertikalen Pfosten (Pos. 4 bis 7) ein Abbrand von bis zu ca. 15 mm auf. Dies entspricht einer Abbrandrate von bis zu 0,75 mm/min, bei der Betrachtung des auf Grund der Brandintensität für den Abbrand maßgeblichen Zeitraums zwischen der 3. bis zur 23. Minute während des Versuchs. Bei den horizontalen Riegelprofilen (Pos. 1 bis 3) traten zum Teil auch deutlich höhere Abbrandraten auf. Diese wesentlich höheren Abbrandraten sind auf den drei- bis vierseitigen Abbrand bei sehr schlanken Holzquerschnitten in Verbindung mit Delaminierungserscheinungen zurückzuführen.

Im Vergleich der beiden Probekörper (links: V2, rechts: V3) ist deutlich zu erkennen, dass im Zwischenraum hinter der Verglasung bei V3 kein Abbrand der Rahmenkonstruktion auftrat.

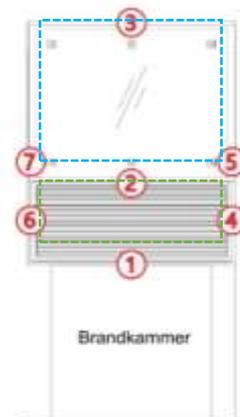


Abb. 5.106: Übersicht V2 und V3 mit Farblegende

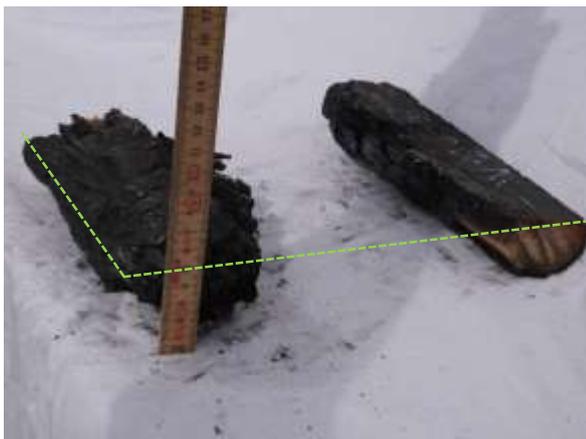


Abb. 5.107: V2 – Pos. 1 [Foto des Autors]

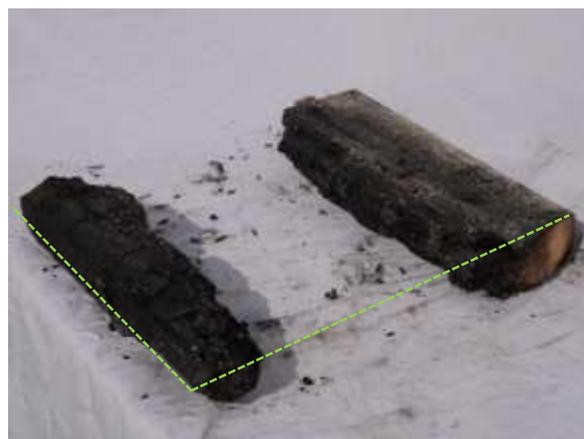


Abb. 5.108: V3 – Pos. 1 [Foto des Autors]



Abb. 5.109: V2 – Pos. 2 [Foto des Autors]



Abb. 5.110: V3 – Pos. 2 [Foto des Autors]



Abb. 5.111: V2 – Pos. 3 [Foto des Autors]



Abb. 5.112: V3 – Pos. 3 [Foto des Autors]



Abb. 5.113: V2 – Pos. 4 [Foto des Autors]



Abb. 5.114: V3 – Pos. 4 [Foto des Autors]



Abb. 5.115: V2 – Pos. 5 [Foto des Autors]



Abb. 5.116: V3 – Pos. 5 [Foto des Autors]



Abb. 5.117: V2 – Pos. 6 [Foto des Autors]



Abb. 5.118: V3 – Pos. 6 [Foto des Autors]



Abb. 5.119: V2 – Pos. 7 [Foto des Autors]



Abb. 5.120: V3 – Pos. 7 [Foto des Autors]

5.4.8 Auswertung der Temperaturdaten

Die Temperaturdaten der Thermoelemente der beiden Vorversuche sind in den folgenden Diagrammen und Tabellen ausgewertet. Wie bei der ersten Versuchsreihe V2 und V3 sind auch bei diesen Versuchen sehr unterschiedliche Temperaturverläufe zu erkennen, welche wiederum im Zusammenhang mit dem Auftreten bzw. der Verhinderung des Kamineffekts stehen. Auf Grund des Ausfalls eines Thermoelements bei Versuch V3 ist jedoch kein Vergleich zwischen den Temperaturunterschieden vor der Glasscheibe möglich.

Im Hinblick auf den geplanten Fassadenversuch gemäß ÖNORM B 3800-8 [N17] wurde wiederum die Temperaturerhöhung im Fassadenzwischenraum um mehr als 250 K untersucht und als Grenzwert im Diagramm dargestellt. Bei Versuch V2 wurde dieses Temperaturkriterium in der unteren Reihe im Zwischenraum bereits in der vierten Minute (3min, 5sec.) überschritten. Bis zum Verlust des Raumabschlusses der Glasscheibe traten Temperaturen bis zu 520°C hinter der Verglasung auf. Bei Versuch V3 betrug die maximale Temperatur im Zwischenraum hinter der Glasscheibe 112°C und lag somit deutlich unter dem Grenzwert des nachzuweisenden Temperaturkriteriums.

5.4.8.1 Auswertung Vorversuch V2

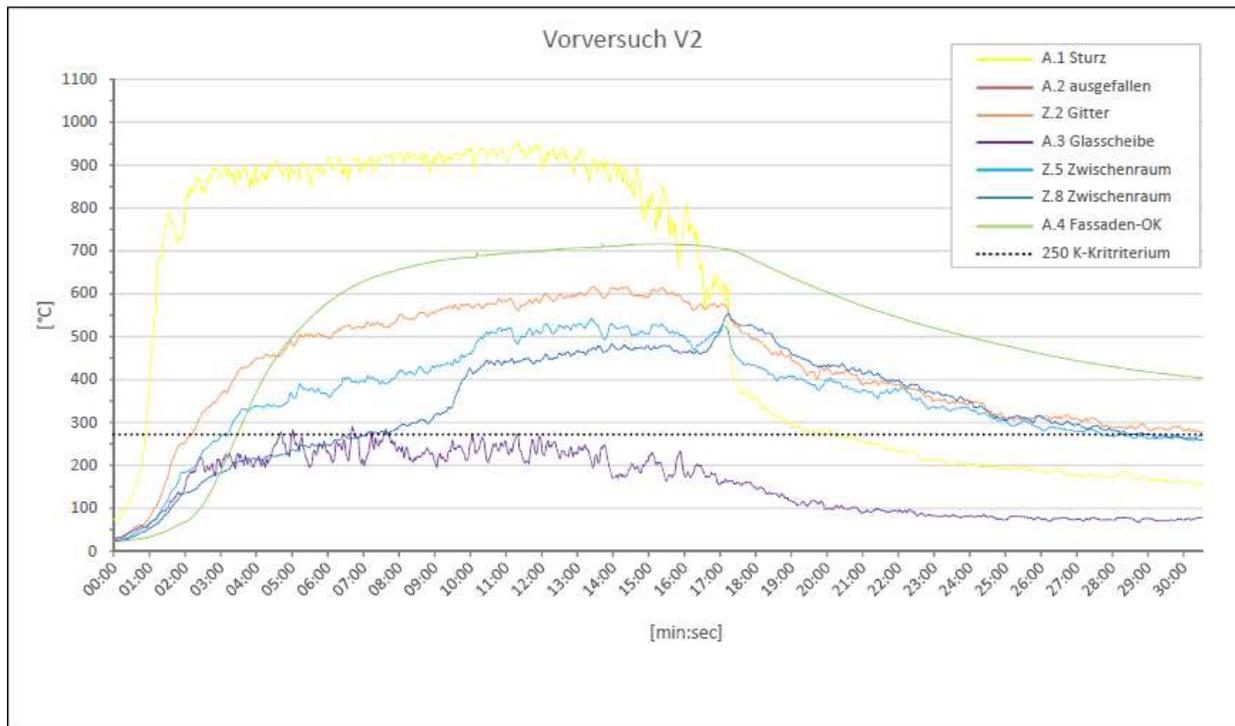


Abb. 5.121: Temperatur-Zeit Diagramm V2 [eigene Darstellung]

Vorversuch V2										
Kriterium	Zeit	Δt	A.1 Sturz	A.2 Gitter	Z.2 Gitter	A.3 Glas	Z.5 Zw.raum	Z.8 Zw.raum	A.4	
	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Versuchsbeginn	10:29:07	00:00:00	74	ausgef.	29	30	24	23	22	
Temperaturerhöhung über 250 K im ZR	10:32:12	00:03:05	896	ausgef.	374	216	273	185	202	
T max. vor der Glasscheibe	10:35:48	00:06:41	913	ausgef.	519	290	394	264	617	
T max. im ZR (bei Raumabschluss)	10:39:56	00:10:49	927	ausgef.	588	236	520	440	693	
T max. im Sturzbereich	10:40:26	00:11:19	949	ausgef.	562	258	488	443	696	
Abfallen der VSG-Aussenschicht	10:41:05	00:11:58	891	ausgef.	589	242	512	446	700	
T max. im Gitter-Zwischenraum	10:43:29	00:11:17	854	ausgef.	614	181	525	473	713	

Abb. 5.122: tabellarische Auswertung V2 [eigene Darstellung]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

5.4.8.2 Auswertung Vorversuch V3

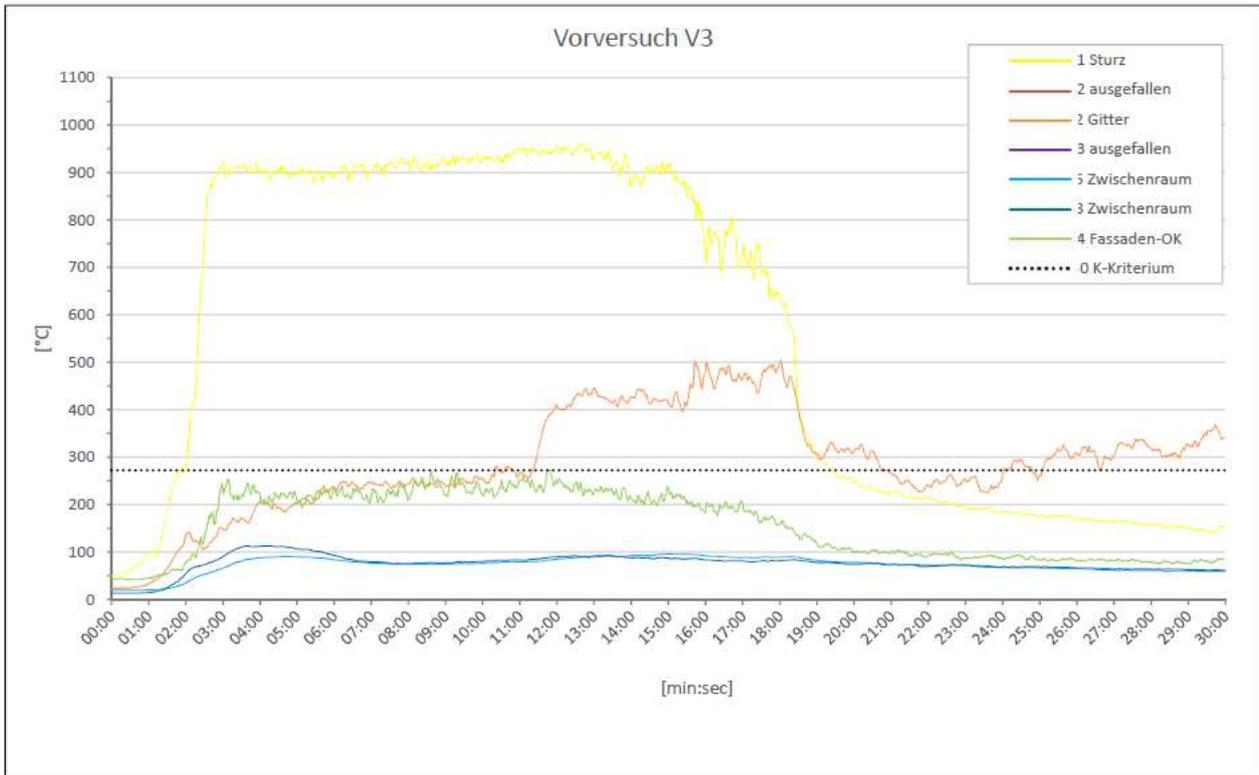


Abb. 5.123: Temperatur-Zeit Diagramm V3 [eigene Darstellung]

Vorversuch V3										
Kriterium	Zeit	Δt	A.1 Sturz	A.2 Gitter	Z.2 Gitter	A.3 Glas	Z.5 Zw.raum	Z.8 Zw.raum	A.4 Fass.-OK	
	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Versuchsbeginn	14:08:44	00:00:00	49	ausgef.	23	ausgef.	19	13	43	
T max. im Fassaden-Zwischenraum	14:12:59	00:04:15	903	ausgef.	206	ausgef.	88	112	226	
T max. im Sturzbereich	14:21:24	00:12:40	948	ausgef.	431	ausgef.	88	92	243	
T max. im Gitter-Zwischenraum	14:26:47	00:18:03	647	ausgef.	485	ausgef.	89	81	164	
Versuchsende	14:38:40	00:29:56	155	ausgef.	348	ausgef.	59	61	87	

Abb. 5.124: tabellarische Auswertung V3 [eigene Darstellung]

5.4.9 Schlussfolgerungen

Auf Grund der Beobachtungen und Ergebnisse der beiden Vorversuche V2 und V3 zeigte sich, dass durch die Ausführung eines Stahllamellengitters mit hohem Strömungswiderstand das Auftreten des Kamineffekts im Fassadenzwischenraum zwar verzögert, jedoch nicht verhindert werden konnte. Eine wirksame Verhinderung des Kamineffekts konnte nur durch den Einsatz von intumeszierenden Brandsperren im Bereich der Zuluftöffnungen erzielt werden. Für die weiteren Fassadenbrandversuche P1 und P2 wurden daher folgende Festlegungen getroffen:

- Die Belüftungssituation und der damit einhergehende Kamineffekt im Zwischenfassadenraum der geprüften Doppelfassadenprototypen beeinflusst maßgeblich die Brandausbreitung bzw. Brandweiterleitung und den Temperaturverlauf im Bereich der Verglasung.
- Der Einsatz von Stahlblech-Lüftungsgittern mit hohem Strömungswiderstand (Doppel-Z-Lamellengitter bei Vorversuch V2) verzögert das Auftreten des Kamineffekts im Zwischenfassadenraum, kann diesen jedoch nicht wirksam unterbrechen.
- Durch intumeszierende Brandsperren im Bereich der Zuluftöffnungen wird der Kamineffekt im Zwischenfassadenraum im Brandfall wirksam verhindert.
- Der gewählte Aufbau der Verbundsicherheitsgläser mit Etylvinylactatfolie wird auch für die weiteren Versuche beibehalten.
- Die Ausführung der Verglasung ohne Brandschutzversiegelung entlang der Glaskanten lieferte positive Ergebnisse und wird daher auch für die folgenden Versuche beibehalten.
- Die Ausführung der Holz-Glas-Verklebung ohne Verklotzung für den Eigengewichtsabtrag und ohne mechanische Sicherung in Form von Edelstahlwinkeln lieferte ebenfalls positive Ergebnisse und wird daher auch für die folgenden Versuche beibehalten.

5.5 Fassadenbrandversuch P1

5.5.1 Zielsetzung

Mit dem Fassadenbrandversuch P1 soll für das Fassadensystem des Typs HGV-DF02 (geklebte Holz-Glas-Kastendoppelfassade mit belüftetem Fassadenzwischenraum) folgende Schutzziele nachgewiesen werden:

- wirksame Einschränkung einer Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoß
- wirksame Einschränkung des Herabfallens großer Fassadenteile
- wirksame Einschränkung einer Brandausbreitung über die Zwischenräume im Bereich von Trenndecken bzw. brandabschnittsbildenden Decken

Die Einhaltung dieser Schutzziele entspricht dem aktuellen Stand der Technik und ist für Doppelfassaden von Gebäuden ab der Gebäudeklasse 4 gemäß OIB Richtlinie 2, Pkt. 3.5.8 [N6] erforderlich.

Die Erläuterung zu Pkt. 3.5.8 der OIB Richtlinie 2 [N7] lautet:

„Doppelfassaden wirken sich in brandschutztechnischer Sicht gegenüber konventionellen Fassaden vor allem in folgender Hinsicht nachteilig aus:

- *„Kanalisation“ von Feuer und Rauch im Zwischenraum und daher schnellere Brandausbreitung über den Zwischenraum in oberhalb gelegene Geschoße.*
- *Gefährdete Personen können sich infolge des verrauchten Zwischenraumes für die Feuerwehr nur schwer bemerkbar machen.*
- *Für die Feuerwehr ist ein Löschangriff von außen praktisch nicht durchführbar, da eine mechanische Zerstörung der Verkleidung mit Mitteln der Feuerwehr in der Regel nicht möglich ist und eine Zerstörung durch Brandeinwirkung – wenn überhaupt – erst sehr spät eintreten wird.*

[...] Für Kasten-Doppelfassaden (2-schalige Fassade) gelten die zielorientierten Anforderungen gemäß Punkt 3.5.8 jedenfalls als erfüllt, wenn ein positiver Prüfbericht gemäß ÖNORM B 3800-6, Ausgabe 2013-04-15 vorliegt.“

In Abstimmung mit der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien (MA39) wurde für den gegenständlichen Fassadentyp in der Bauart einer belüfteten Kasten-Doppelfassade die nationale Prüfnorm ÖNORM B 3800-6 [N16] als geeigneter Nachweis zur Einhaltung der zuvor angeführten Schutzziele der OIB-Richtlinie 2 [N6] festgelegt.

5.5.2 Probekörper

Die Ausbildung der Probekörper baut auf den Systemdetails der HGV-Kastendoppelfassade Typ DF02 und den Systemdetails des Probekörpers V3 der zweiten Vorversuchsreihe auf.

Wie bei den Vorversuchen bzw. gemäß [N16] wurde bei dem Probekörper P1 nur die äußere Fassadenebene hergestellt – die Rückwand des Prüfstands stellt bei der Versuchsanordnung die innere Fassadenebene der Doppelfassade dar.

Die Außenmaße des breiten Fassadenelements betragen (B x H x T) 2460 x 3345 x 295 mm und die Außenmaße des schmalen Fassadenelements betragen (B x H x T) 1100 x 3345 x 295 mm

Im Vergleich zu den Systemdetails des Vorversuchs V3 wurden folgende Modifikationen vorgenommen:

- Verglasung mit Verbundsicherheitsglas aus 2 x 8 mm (anstatt 6 mm bei den Vorversuchen)
- Vertikale Teilung der Verglasung bei dem breiten Fassadenelement
- dreiseitige Verklebung mit der BFU-Leiste bei dem breiten Fassadenelement
- Glasaufleger mit Stahlgewindestiften und Hartholzklötzen bei dem breiten Fassadenelement
- der vertikale Glasstoß (Innenecke) wurde mit Brandschutzsilikon verfugt
- Aluminiumlamellen anstatt Stahllamellen



Abb. 5.125: Prüfanordnung P1 am Fassadenprüfstand [Foto des Autors]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

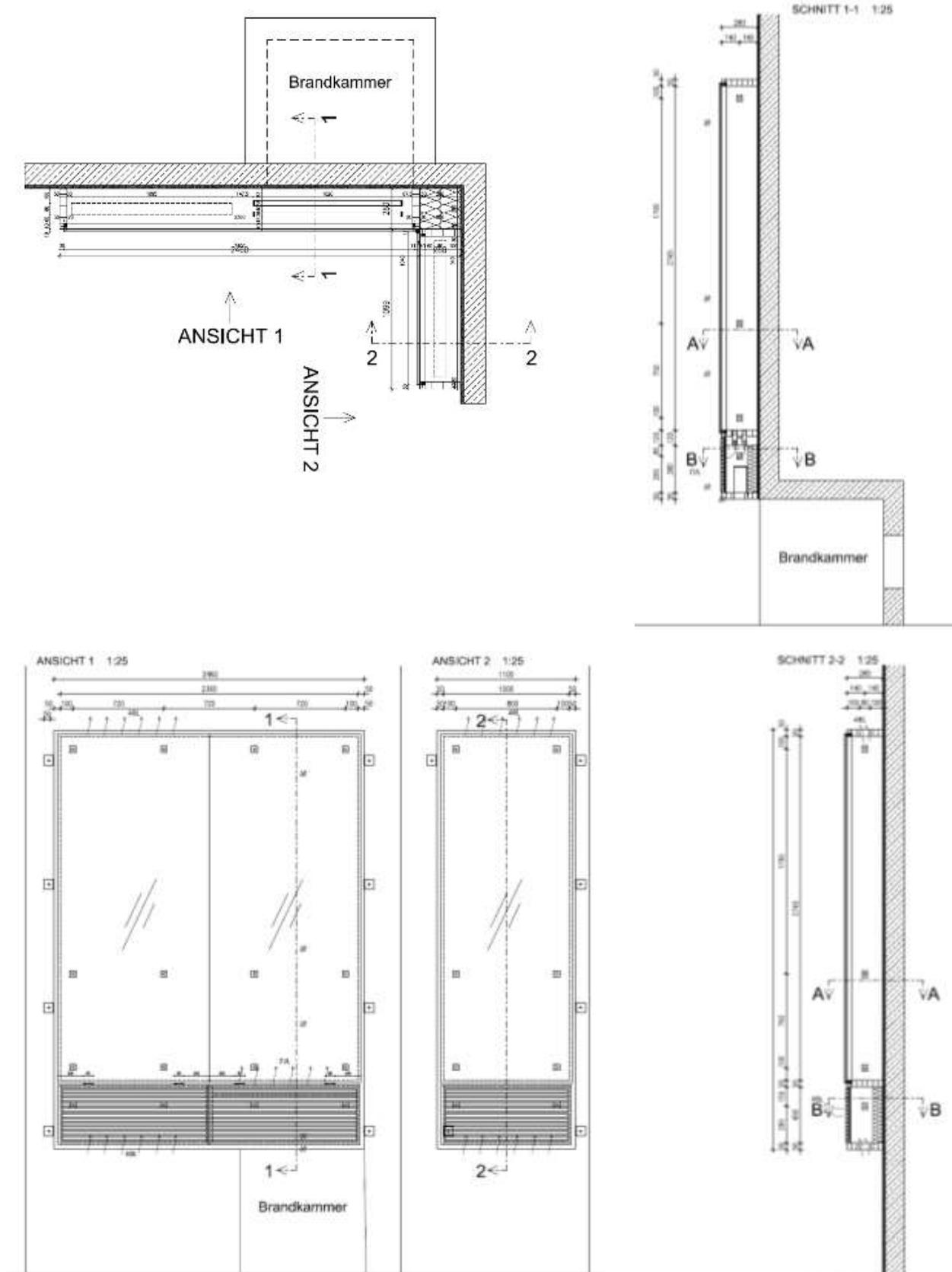


Abb. 5.126: Pläne der Prüffassade P1 [eigene Darstellung]

5.5.3 Materialien

Die Probekörper wurden mit folgenden Materialien hergestellt:

- Holzrahmen aus Brettschichtholz, BSH GL24h, Fichte, Querschnitt: 50 x 280 mm
- Eckverbindungen des BSH-Konstruktion mit Hartholzdübeln und versenkten Holzschrauben
- Koppelrahmen BFU Birkenfurniersperrholz, Querschnitt: 20 x 40 mm, Oberfläche geschliffen, Qualität S/BB, Verleimungsklasse EN 314-2/KL3
- Verbundsicherheitsglas gemäß ÖNORM EN ISO 12543-2 aus 2 x 8 mm Floatglas, dazwischen Ethylenvinylacetat-Folie
- Holz-Glas-Verklebung mit 2K-Silikonklebstoff und Vorlegeband
- Aluminium-Lüftungslamellen mit Insektenschutzgitter
- Jalousiekasten aus Stahlblech
- Brandsperren aus Stahlgewebe mit intumeszierenden Streifen
- Steinwolle-Dämmplatten gemäß ÖNORM EN 13162, D = 80 mm
- Stahlwinkel zur Verdübelung am Prüfstand
- Brandschutzsilikon zwischen dem vertikalen Glasstoß
- Glasaufleger aus Stahlgewindestiften und Hartholzklötzen

5.5.4 Herstellung und Montage

Die Fertigung der BSH-Rahmen erfolgte im Werk der Firma Alco GmbH, die Verklebung der HGV-Verglasungselemente erfolgte im Werk der Firma Petschenig. Die Montage und Komplettierung, sowie die Befestigung der Prüffassade am Prüfstand erfolgte vor Ort in der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien (MA 39).

Die folgenden Abbildungen zeigen die wesentlichen Schritte der Fassadenmontage in der Prüfstelle.



Abb. 5.127: Lieferung der vormontierten BSH-Rahmen
[Foto des Autors]



Abb. 5.128: Lieferung der HGV-Elemente
[Foto des Autors]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall



Abb. 5.129: BSH-Rahmen [Foto des Autors]



Abb. 5.130: BSH-Rahmen aufgebockt [Foto des Autors]



Abb. 5.131: HGV-Element am Saugheber [Foto des Autors]



Abb. 5.132: Einheben des HGV-Elements in den BSH-Rahmen [Foto des Autors]



Abb. 5.133: Anheben des verglasten Fassadenelements mit dem Kran [Foto des Autors]



Abb. 5.134: Transport des Fassadenelements zum Prüfstand [Foto des Autors]



Abb. 5.135: Einrichten des Fassadenelements vor dem Prüfstand [Foto des Autors]



Abb. 5.136: Fassadenelemente vor der Komplettierung [Foto des Autors]

5.5.5 Versuchsanordnung

Der Fassadenprüfversuch P1 wurde gemäß den Vorgaben der nationalen Prüfnorm ÖNORM B 3800-6 [N16] durchgeführt. Die Anordnung der Prüfkörper am Prüfstand über der Brandkammer entspricht einer Eckanordnung, wobei abweichend von den normativen Vorgaben in Abstimmung mit der Prüfstelle, die unteren Fassadenelemente neben der Brandkammer nicht abgebildet wurden.

Das Prüfverfahren dient der Beurteilung der Schadenswirkung auf die anschließende Baugruppe im Falle des Ausbrandes aus einer Baugruppe.

5.5.5.1 Prüfstand

Die Versuchsanordnung erfolgte wie bei den zuvor durchgeführten Vorversuchen in dem gemäß [N17] vorgegebenen Fassadenprüfstand.

5.5.5.2 Brandlast, Zündung, Ventilation

Die normativen Festlegungen gemäß [N16] lauten:

„Als Brandlast muss eine Holzkrippe verwendet werden. Zur Herstellung der Holzkrippe sind gehobelte Fichtenholzstäbe – jeweils 4 cm breit, 4 cm hoch und 60 cm lang – zu verwenden. Die Stäbe müssen so konditioniert werden, dass diese für den Zweck der Prüfung eine Holzfeuchte von maximal 10 % aufweisen. Aus 120 Stäben mit einer Gesamtmasse von 50 kg \pm 1 kg wird eine Holzkrippe hergestellt, indem die Stäbe in 15 Lagen zu je 8 Stäben kreuzweise vernagelt werden. Dabei verbindet ein Nagel (Senkkopf blank; 2,8 mm x 65 mm) im äußersten Schnittpunkt jeweils zwei Stäbe. So entsteht eine Holzkrippe mit einer Grundfläche von 0,60 m x 0,60 m und einer Höhe von 0,60 m. Das Holz-Luft-Verhältnis beträgt durch die kreuzweise versetzte Lage der Stäbe annähernd 1 : 1.

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

Die Brandlast wird in der Brandkammer hinter der Fassade – als außen bündig mit der Außenkante des Prüfstandes – platziert.

Die Holzkrippe steht in 0,20 m Höhe auf einer allseits offenen Metallunterkonstruktion mit einer Grundfläche von 0,60 m x 0,60 m. Dieser Unterbau ist so auszuführen, dass eine ausreichende Durchlüftung der Holzkrippe sichergestellt ist. Der seitliche Abstand der Holzkrippe von den Wänden der Brandkammer beträgt jeweils 0,20 m. Die unterste Lage Stäbe liegt parallel zu den Seitenwänden der Brandkammer. Der Abstand der Oberseite der Holzkrippe von der Unterseite des Brandkammersturzes beträgt etwa 0,25 m. Die Vorderseite des Holzstapels schließt bündig mit der Vorderseite des Prüfstandes (nicht der Fassade) ab.

In die unterste Lage Holzstäbe, jeweils in den zweiten äußeren Zwischenraum, werden zwei Blechwannen (25 mm breit x 600 mm lang x 20 mm hoch) eingeschoben. Unmittelbar vor Beginn der Prüfung (frühestens 5 Minuten vor Prüfbeginn) werden in jede Wanne 200 ml Isopropanol gefüllt. Die Entzündung des Isopropanols erfolgt mit einer offenen Flamme.

Die Anordnung des Prüfstandes in einem Raum ist so zu wählen, dass sowohl der Abbrand der Brandlast als auch der des Prüfkörpers unter natürlichen Lüftungsbedingungen erfolgen kann und dass für eine ausreichende Abführung der Rauchgase gesorgt ist.

Zur Sicherstellung eines kontinuierlichen Flammenaustritts aus der Brandkammeröffnung (Fenster) wird ein zusätzlicher Luftstrom durch eine runde Öffnung (Durchmesser 0,42 m) in der Rückwand der Brandkammer eingeblasen. Die Frischluft hat einen Volumenstrom von 800 m³/h. Die Zuschaltung des Lüfters erfolgt im Falle der Verwendung der Holzkrippe nach der teilweisen Entflammung nach der zweiten Minute.“

5.5.5.3 Temperaturmessung

Die Temperaturmessungen erfolgten gemäß den Vorgaben von [N16]. Zusätzliche Thermoelemente wurden im Zwischenraum hinter dem Lüftungsgitter und hinter der Verglasung ausgeführt.

Mittels am Prüfbaum befestigten Thermoelementen erfolgten die Messungen laut Norm an den folgenden Punkten:

- Im Sturzbereich
- 250 mm oberhalb der Sturzkante, 100 mm vor der Fassade
- 1000 mm oberhalb der Sturzkante, 100 mm vor der Fassade
- 2000 mm oberhalb der Sturzkante, 100 mm vor der Fassade
- An der Oberkante der Prüffassade, 100 mm vor der Fassade
- An der Prüfstandoberkante

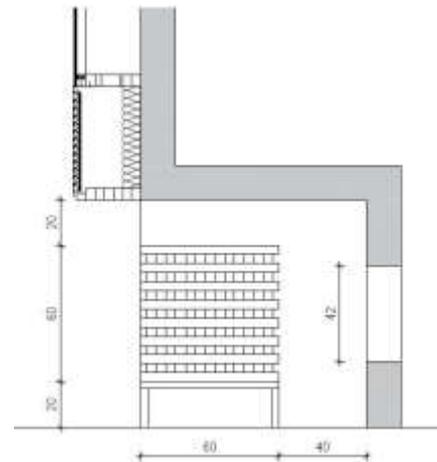


Abb. 5.137: Brandkammer mit Holzkrippe [eigene Darstellung]



Abb. 5.138: Holzkrippe [Foto des Autors]

In den Zwischenräumen der Doppelfassade erfolgten weitere Messungen an den folgenden Punkten:

- 4 Thermoelemente im Zwischenraum hinter dem Lüftungsgitter
- 4 Thermoelemente hinter der Verglasung, ca. 100 mm oberhalb des mittleren Riegels
- 4 Thermoelemente hinter der Verglasung, ca. 1000 mm oberhalb des mittleren Riegels
- 4 Thermoelemente hinter der Verglasung, ca. 100 mm unterhalb des oberen Riegels

In den folgenden Abbildungen ist die Lage der Thermoelemente vor der Fassade (A.1 bis A.6, rot) und im Zwischenraum (Z.1 bis Z.24, blau) dargestellt.

Für die Temperaturmessungen wurden Nickel-Chrom/Nickel Thermoelemente des Typs K verwendet. Die Temperaturen wurden in Zeitintervallen von einer Sekunde registriert.

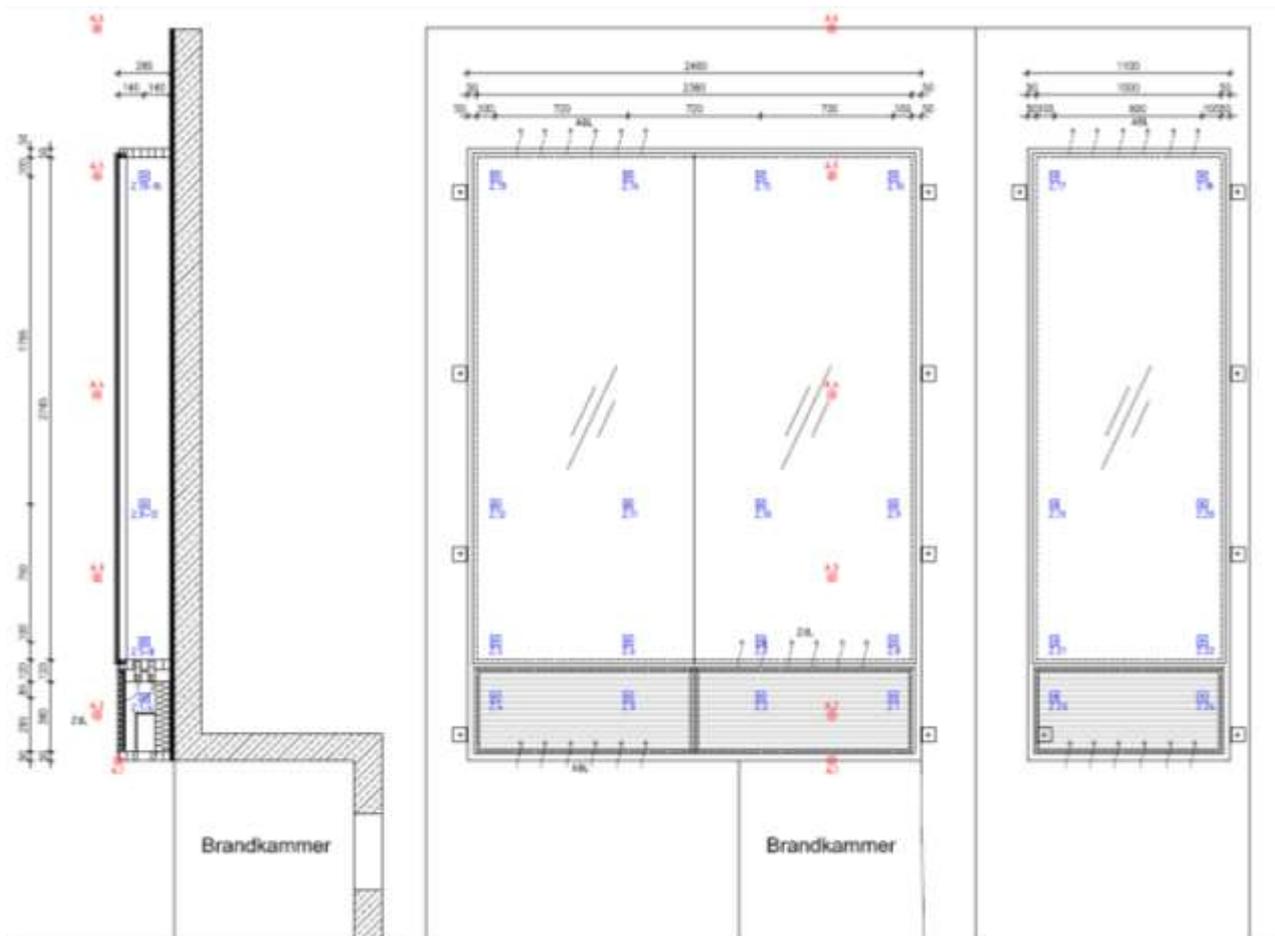


Abb. 5.139: Schnitt und Ansicht mit Darstellung der Thermoelemente [eigene Darstellung]

5.5.6 Durchführung des Prüfversuchs

Der Fassadenprüfversuch wurde am 06.10.2016 in der Prüfhalle der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien durchgeführt. Die Umgebungstemperatur betrug ca. 15 °C und lag damit innerhalb des laut [N16] geforderten Bereichs von 5° C und 30 °C. Unmittelbar vor der Durchführung der Versuche wurde die Holzfeuchtigkeit an drei Stellen des BSH-Rahmens gemessen und lag zwischen 8,3 % bis 10,5 %.

Mit der Zündung des Isopropanols in den Blechwannen unterhalb der Holzkrippe wurden die Prüfungen gestartet. Nach der zweiten Prüfminute wurde der Lüfter mit einem Luftvolumenstrom von 800 m³/h zugeschaltet. Nach 30 Minuten wurde die Prüfung beendet.

Die Prüfung wurde sowohl fotografisch als auch mittels Videokamera dokumentiert.

Gemäß den Vorgaben von [N16] wurden während der Prüfung folgende Beobachtungen vorgenommen:

- Visuelle Beobachtung der Flammenausbreitung
- Visuelle Beobachtung des Herabfallens von Teilen und Elementen der Fassade

5.5.6.1 Beobachtungen beim Versuchsdurchführung

Der Versuch P1 wurde um 10:29:03 Uhr gestartet. Ab der zweiten Minute traten Flammen über den Sturzbereich bis auf Höhe der Lüftungslamellen hinaus. Mit dem Zuschalten des Lüfters ab der dritten Minute reichten die Flammen im Eckbereich der Fassadenelemente bis auf ca. 2 m, einzelne Flammenspitzen auch bis ca. 3 m über Sturzoberkante. Gegen Ende der vierten Minute begannen die Aluminiumlamellen im unmittelbaren Brandbereich zu schmelzen, und in weiterer Folge traten bei den Lüftungslamellen des schmalen Fassadenelements vereinzelt Flammen hervor. Ab der sechsten Minute reichten einzelne Flammenspitzen bis zur oberen Hälfte des Prüfobjekts. Nach 5 min., 30 sec. kam es zu ersten Rissen in der Verglasung des breiten Fassadenelements und nach 6 min., 15 sec. zu ersten Rissen in der Verglasung des schmalen Fassadenelements. In weiterer Folge fielen in der zehnten Minute erste Teile in der linken unteren Ecke der Verglasung herab. Die Folie der Verglasung brannte bei diesen Stücken nach dem Herabfallen kurzzeitig weiter. Die Glasscheiben des zweiachsigen Fassadenelements waren zu diesem Zeitpunkt bis auf einzelne Risse unbeschädigt. Der Fassadenzwischenraum dieses Elements war verraucht, es waren jedoch keine Flammen sichtbar. Ab der 12. Minute war im Zwischenraum des einachsigen Fassadenelements ein voll entwickelter Brand entstanden, welcher in Folge zum Abfallen weiterer Glasstücke führte – der Raumabschluss der Glasscheibe war zu diesem Zeitpunkt nicht mehr gegeben. Ab der 13. Minute traten erste Flammen aus der Abluftöffnung am oberen Riegel des schmalen Elements aus. Anschließend kam es sukzessive zum Herabfallen weiterer Glasstücke und Lüftungslamellen. Die Öffnung der Glasscheibe hatte sich bereits deutlich vergrößert, und an den Bruchkanten der Verglasung brannte die Folie mit. Durch die Vergrößerung der Zuluftöffnung war eine sichtbare Reduktion des Kamineffekts im Fassadenzwischenraum festzustellen. Der Raumabschluss an der rechten unteren Ecke des großen Fassadenelements war nach 12 min., 50 sec. nicht mehr gegeben. Mit Beginn der 16. Minute begann die Brandintensität kontinuierlich nachzulassen, es fielen jedoch nach wie vor kleinere Glasstücke und Lüftungslamellen herab. Bis zur 21. Minute hatte sich der Brand soweit abgeschwächt, dass nur noch einzelne Flammenspitzen den Bereich der Lüftungslamellen überschritten. Nach 21 Minuten brach die Holzkrippe zusammen. Ab der 26. Minute brannte auch der obere Riegel des schmalen Elements. Danach kam es zu keinen besonderen Vorkommnissen, mit Ausnahme des Herabfallens des Jalousienkastens des zweiachsigen Fassadenelements über der Brandkammer (28 min., 25 sec.). Nach 30 Minuten wurde der Versuch beendet und die Prüffassade abgelöscht.



Abb. 5.140: Flammenausbreitung vor der Verglasung [Foto des Autors]



Abb. 5.141: Verlust des Raumabschlusses beim schmalen Fassadenelement [Foto des Autors]



Abb. 5.142: Flammenaustritt an der Abluftöffnung des schmalen Fassadenelements [Foto des Autors]



Abb. 5.143: Verminderung des Kamineffekts durch Vergrößerung der Öffnung in der Verglasung [Foto des Autors]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall



Abb. 5.144: Holzkrippe vor dem Zusammenfallen
[Foto des Autors]



Abb. 5.145: Branderscheinungen zu Versuchsende
[Foto des Autors]

5.5.7 Feststellungen nach der Prüfung

Gemäß ÖNORM B 3800-6 ist eine allfällige Schädigung des Prüfköpers ausführlich zu dokumentieren. Die Prüfung gilt gemäß ÖNORM B 3800-6, Pkt. 6.1 [N16] als positiv, wenn in dem durch den Prüfstand und die Prüfverordnung gebildeten Bereich keine wesentlichen Teile oder Elemente der Fassade herabfallen.

5.5.7.1 Feststellungen nach Versuchsende

Zu Versuchsende (vor dem Ablöschen) befand sich das Prüfobjekt in folgendem Zustand:

- Verglasung des schmalen Fassadenelements im unteren Bereich herabgefallen (Innenkante links bis ca. 1670 mm, Außenkante rechts bis ca. 370 mm)
- rechte Glasscheibe des breiten Fassadenelements in der rechten unteren Ecke herabgefallen (dreieckige Öffnung mit Seitenlänge ca. 500 mm)
- linke Glasscheibe des breiten Fassadenelements rechts unversehrt
- Raumabschluss bei beiden Fassadenzwischenräumen nicht mehr gegeben
- BSH-Rahmenkonstruktion im Brandbereich verkohlt, Glut und teilweise noch Flammen im Fassadenzwischenraum und am oberen Riegel
- Holz-Glas-Verklebung an den seitlichen und der oberen Kante erhalten und funktionsfähig
- Aluminiumlamellen geschmolzen bzw. teilweise herabgefallen
- Jalousiekasten herabgefallen



Abb. 5.146: Prüffassade vor dem Ablöschen
[Foto des Autors]

5.5.7.2 Feststellungen am Probekörper nach dem Ablöschen

Nach dem Ablöschen und während der Demontage und Entsorgung wurden am Prüfobjekt folgende Feststellungen gemacht:

- Der vordere Teil des unteren BSH-Riegels (direkt über der Brandkammer) war bei dem breiten Fassadenelement stark verkohlt bzw. zum Teil nicht mehr vorhanden. Beim schmalen Fassadenelement war der untere und mittlere BSH-Riegel bis auf Reststücke nicht mehr vorhanden.
- Entlang der unteren Glaskante war die BFU-Koppelleiste in den Nahbereichen zur Brandkammer sehr stark verkohlt bzw. teilweise nicht mehr vorhanden.
- Die Silikonverklebung zwischen den Verbundsicherheitsgläsern und den BFU-Leisten war entlang der vertikalen und oberen Glaskante erhalten und funktionsfähig (mit Ausnahme der Innenkante des schmalen Fassadenelements)
- Im Fassadenzwischenraum des breiten Fassadenelements war am BSH-Rahmen keine Verfärbungen bzw. Verkohlungen der Holzoberfläche zu sehen.
- Im Bereich der Zuluftöffnungen mit den Brandsperren war an der Holzoberfläche im Zwischenraum keine Verfärbung bzw. Verkohlungen festzustellen

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall



Abb. 5.147: Fassade nach dem Ablöschen [Foto des Autors]



Abb. 5.148: Ecke über der Brandkammer [Foto des Autors]



Abb. 5.149: Fassadenzwischenraum des breiten Elements



Abb. 5.150: Fassadenzwischenraum des schmalen Elements



Abb. 5.151: mittlerer Riegel mit Brandsperren (breites Element) [Foto des Autors]



Abb. 5.152: mittlerer Riegel des schmalen Elements [Foto des Autors]

5.5.8 Auswertung der Temperaturdaten

Die Temperaturdaten der Thermoelemente des Fassadenprüfversuchs P1 zeigen wesentliche Unterschiede der Brandverläufe in Anhängigkeit von der Lage der beiden Fassadenelemente. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich das schmale Fassadenelement bei der gewählten Versuchsanordnung wesentlich kritischer verhält als das breite, direkt über der Brandkammer positionierte Fassadenelement. Signifikante Temperaturunterschiede sind insbesondere zwischen dem breiten und schmalen Fassadenelement im Bereich des Fassadenzwischenraums zu erkennen.

In der rechten unteren Ecke des Fassadenzwischenraums (Thermoelement Z.8) des breiten Elements kam es nach 13 min., 11 sec. zur Überschreitung des 250 K-Kriteriums – dies ist auf den unmittelbar davor aufgetretenen Verlust des Raumabschlusses der Verglasung zurückzuführen. In den übrigen Bereichen des Zwischenraums lagen die Temperaturen überwiegend unter dem 250 K-Bereich. Die maximale Temperatur im Fassadenzwischenraum betrug in der 27. Minute 474 °C (Z.8).

Im Gegensatz dazu wurde bei dem schmalen Fassadenelement das 250 K-Kriterium bereits bei 9 min., 54 sec. mit 457°C deutlich überschritten. Durch den Verlust des Raumabschlusses der Verglasung kam es in weiterer Folge durch die Kanalisierung im Fassadenzwischenraum zu einem unmittelbaren Temperaturanstieg auf bis zu 995°C im Bereich des linken unteren Thermoelements Z.21. In weiterer Folge nahm die Brandintensität auf Grund der immer größer werdenden Zuluftöffnung im unteren Bereich der Verglasung jedoch kontinuierlich wieder ab. Zu Versuchsende lag die Temperatur im Bereich von Z.21 bei ca. 500 °C.

Versuch P1 - breites Element										
Kriterium	Zeit	Δt	A.1 Sturz	A.2 Gitter	Z.1 Gitter	A.4 Glas	Z.8 Zw.raum	Z.10 Zw.raum	Z.14 Zw.raum	A.5 Fass.OK
	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Versuchsbeginn	10:29:03	00:00:00	65	54	23	23	18	16	17	18
T max. im Gitter-Zwischenraum	10:39:45	00:10:42	1037	865	839	337	82	51	51	133
T max. im Sturzbereich	10:42:13	00:13:10	1084	942	740	299	262	83	120	144
Überschreitung 250 K-Kriterium	10:42:14	00:13:11	1083	943	737	294	269	83	120	144
T max. im Fassaden-Zwischenraum	10:55:34	00:26:31	305	252	392	113	474	178	263	78
Versuchsende	10:59:03	00:30:00	257	222	468	103	279	205	273	70

Versuch P1 - schmales Element										
Kriterium	Zeit	Δt	A.1 Sturz	A.2 Gitter	Z.23 Gitter	A.4 Glas	Z.21 Zw.raum	Z.19 Zw.raum	Z.17 Zw.raum	A.5 Fass.OK
	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Versuchsbeginn	10:29:03	00:00:00	65	54	29	23	17	17	17	18
Überschreitung 250 K-Kriterium	10:38:57	00:09:54	982	709	792	413	457	285	194	155
T max. im Fassaden-Zwischenraum	10:40:03	00:11:00	1032	804	838	391	995	789	704	151
T max. im Gitter-Zwischenraum	10:40:53	00:11:50	1059	963	890	350	948	951	707	151
T max. im Sturzbereich	10:52:07	00:13:10	1084	942	858	299	918	851	819	144
Versuchsende	10:59:03	00:30:00	257	222	341	103	498	205	263	70

Abb. 5.53 (o.) u. 5.153 (u.): tabellarische Auswertung P1 – schmales und breites Element [eigene Darstellung]

Die Temperaturverläufe bei beiden Fassadenelementen sind in den beiden nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

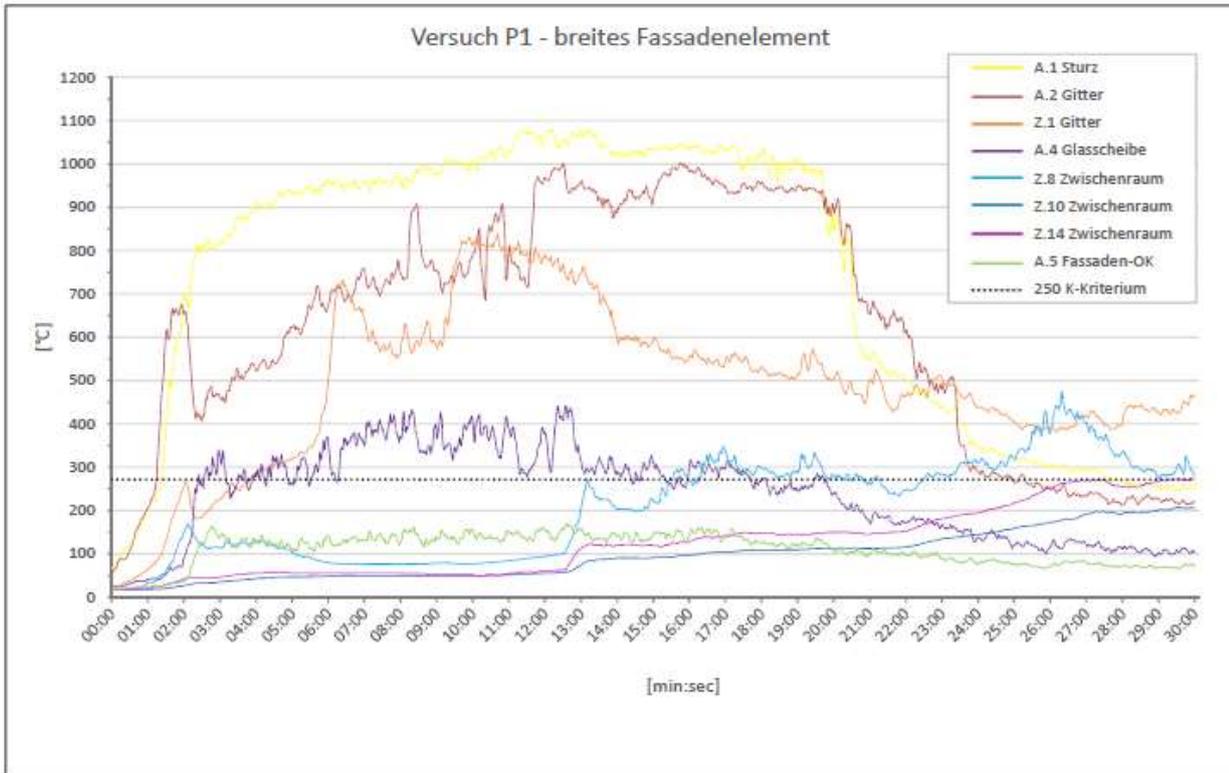


Abb. 5.154: Temperatur-Zeit Diagramm, breites Element P1 [eigene Darstellung]

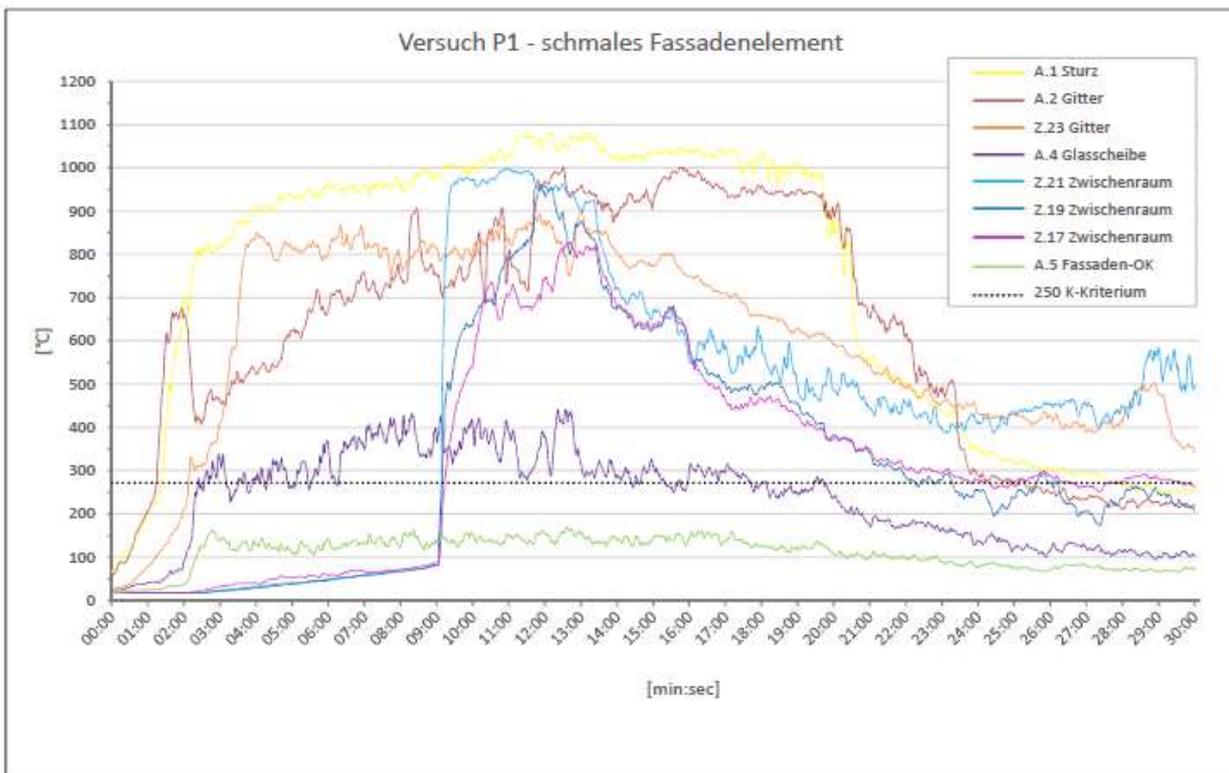


Abb. 5.155: Temperatur-Zeit Diagramm, schmales Element P1 [eigene Darstellung]

5.5.9 Zusammenfassende Beurteilung

Zielsetzung des Fassadenbrandversuch P1 war der Nachweis der nachfolgend angeführten Schutzziele für eine geklebte Holz-Glas-Kastendoppelfassade des Typs HGV-DF02 mit belüftetem Fassadenzwischenraum:

- wirksame Einschränkung einer Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoß
- wirksame Einschränkung des Herabfallens großer Fassadenteile
- wirksame Einschränkung einer Brandausbreitung über die Zwischenräume im Bereich von Trenndecken bzw. brandabschnittsbildenden Decken

Für den Nachweis dieser Schutzziele wurde die Prüfverordnung gemäß folgender nationaler Prüfnorm durchgeführt:

- ÖNORM B 3800-6:2013-04-15 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 6: Brandverhalten von Kasten-Doppelfassaden (2-schalige Fassade) - Anforderungen, Prüfungen, Beurteilungen [N16]

Bei dem gegenständlichen Prüfversuch P1 sind kleinteilig die Alu-Lamellen des Lüftungsgitters nichtbrennend sowie ebenfalls kleinteilig Verglasungselemente herabgefallen. Es liegt somit für die HGV-Kasten-Doppelfassade in der geprüften Bauart ein positives Prüfergebnis vor, da entsprechend den Kriterien gemäß [N16] während der Prüfung keine wesentlichen Teile oder Elemente der Fassade herabgefallen sind.

Der positive Prüfbericht der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien zu diesem Prüfversuch findet sich im Anhang dieser Arbeit.

5.6 Fassadenbrandversuch P2

5.6.1 Zielsetzung

Mit dem in diesem Kapitel dokumentierten Fassadenbrandversuch P2 soll für das Fassadensystem des Typs HGV-DF02 (geklebte Holz-Glas-Kastendoppelfassade mit belüftetem Fassadenzwischenraum) das Schutzziel der Begrenzung der vertikalen Brandausbreitung mittels deckenübergreifendem Außenwandstreifen mit einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten nachgewiesen werden.

Die dem Stand der Technik entsprechende Maßnahme muss gemäß OIB Richtlinie 2, Pkt. 3.3 [N6] für Gebäude (ausgenommen Wohngebäude) der Gebäudeklasse 5 mit mehr als sechs oberirdischen Geschoßen in jedem Geschoß mit einem deckenübergreifenden Außenwandstreifen von mindestens 1,20 m Höhe in EI 30-ef und A2 bzw. EW 30-ef und A2 erfolgen, sofern das erforderliche Schutzziel nicht mit anderen Maßnahmen erfüllt wird.

Die Erläuterung zu Pkt. 3.3 der OIB Richtlinie 2 [N7] lautet wie folgt: *„Um die vertikale Brandausbreitung über die Fassade zu begrenzen, wurde erst für Gebäude ab der Gebäudeklasse 5 mit mehr als sechs oberirdischen Geschoßen – ausgenommen Wohngebäude – ein deckenübergreifender Außenwandstreifen mit einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten aus Baustoffen der Klasse A2 gefordert. Anstelle des deckenübergreifenden Außenwandstreifens werden auch bauliche bzw. anlagentechnische Alternativen ermöglicht.“*

In Abstimmung mit der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien (MA39) wurde für den gegenständlichen Fassadentyp mit einer äußeren Fassadenebene in Form eines vorgesetzten raumhohen Brandschutzschildes die nationale Prüfnorm ÖNORM B 3800-8 [N17] als geeigneter Nachweis zur Einhaltung des zuvor angeführten Schutzzieles der OIB-Richtlinie 2 [N6] ausgewählt.

5.6.2 Probekörper

Die Ausbildung der Probekörper baut auf den Systemdetails der HGV-Kastendoppelfassade Typ DF02 und den Systemdetails des Probekörpers V3 der zweiten Vorversuchsreihe auf.

Die Prüffassade P2 ist ident mit der Ausführung des zweiachsigen Fassadenelements von P1. Da auf Grund der Anordnung auf dem Prüfofen bei dieser Versuchsanordnung keine Rückwand in Form des Eckprüfstands vorhanden ist, wurde diese mittels Holzwerkstoffplatten (3-Schicht-Platten) zweilagig beplankt.

Seitlich wurde am Rahmen jeweils eine aussteifende Holzkonstruktion verschraubt, um das Fassadenelement gegen Kippen zu sichern.



Abb. 5.156: Prüffassade P2 auf dem Deckenofen [Foto des Autors]

5.6.3 Materialien

Die Probekörper wurden mit folgenden Materialien hergestellt:

- Holzrahmen aus Brettschichtholz, BSH GL24h, Fichte, Querschnitt: 50 x 280 mm
- Eckverbindungen der BSH-Konstruktion mit Hartholzdübeln und versenkten Holzschrauben
- Koppelrahmen BFU Birkenfurniersperrholz, Querschnitt: 20 x 40 mm, Oberfläche geschliffen, Qualität S/BB, Verleimungsklasse EN 314-2/KL3
- Verbundsicherheitsglas gemäß ÖNORM EN ISO 12543-2 aus 2 x 8 mm Floatglas, dazwischen Ethylenvinylacetat-Folie
- Holz-Glas-Verklebung mit 2K-Silikonklebstoff und Vorlegeband
- Aluminium-Lüftungslamellen mit Insektenschutzgitter
- Jalousiekasten aus Stahlblech
- Brandsperrn aus Stahlgewebe mit intumeszierenden Streifen
- Steinwolle-Dämmplatten gemäß ÖNORM EN 13162, D = 80 mm
- Brandschutzsilikon zwischen dem vertikalen Glasstoß
- Glasauflager aus Stahlgewindestiften und Hartholzklötzen

5.6.4 Herstellung und Montage

Die Fertigung der BSH-Rahmen erfolgte im Werk der Firma Alco GmbH, die Verklebung der HGV-Verglasungselemente erfolgte im Werk der Firma Petschenig. Die Montage und Komplettierung, sowie die Befestigung der Prüffassade am Prüfstand erfolgten in der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien (MA 39) und entsprachen dem Montageablauf des Prüfversuchs P1.

5.6.5 Versuchsanordnung

Der Fassadenprüfversuch P2 wurde gemäß den Vorgaben der nationalen Prüfnorm ÖNORM B 3800-8 [N17] durchgeführt.

Das Prüfverfahren dient als Nachweis des gemäß OIB Richtlinie 2, Pkt. 3.3. [N6] erforderlichen deckenübergreifenden Außenwandstreifens mit einer Mindesthöhe von 1,2 m und einer Mindest-Feuerwiderstandsklasse von EI-30-ef bzw. EW 30-ef.

Gemäß OIB Richtlinie 2, Pkt. 3.3 [N6] ist außerdem ein Mindest-Brandverhalten der Euroklasse A2 gemäß ÖNORM EN 13501-1 [N26] für die zuvor beschriebenen Bauteile erforderlich. Der Anwendungsbereich der ÖNORM B 3800-8 [N17] erstreckt sich auf Brandschutzschilde, deren Befestigungselemente mindestens A2 und deren flächige Elemente aus Bauprodukten mindestens B, jeweils gemäß ÖNORM EN 13501-1 [N26], bestehen.

Von dieser Anforderung an das Brandverhalten der Euroklasse A2 wird bei der gegenständlichen Fassadenprüfung abgewichen, da auch Holz und Holzwerkstoffe des Brandverhaltens der Euroklasse D verwendet werden.

5.6.5.1 Prüfstand

Die ÖNORM B 3800-8 [N17] gibt einen Prüfstand vor, welcher aus dem Prüfofen, der Prallwand und dem Wandbildner besteht.

Der Prüfofen für die Prüfung vertikaler Bauteile hat der ÖNORM EN 1363-1 [N20] mit den Mindestabmessungen 3 m x 3 m x 1,5 m zu entsprechen und muss die Fähigkeit aufweisen, an einer Ausströmöffnung einen Überdruck von 20 Pa und vor dieser Öffnung die Außenbrandkurve (ef-Kurve) entsprechend ÖNORM EN 1363-2 [N21] zu leisten.

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

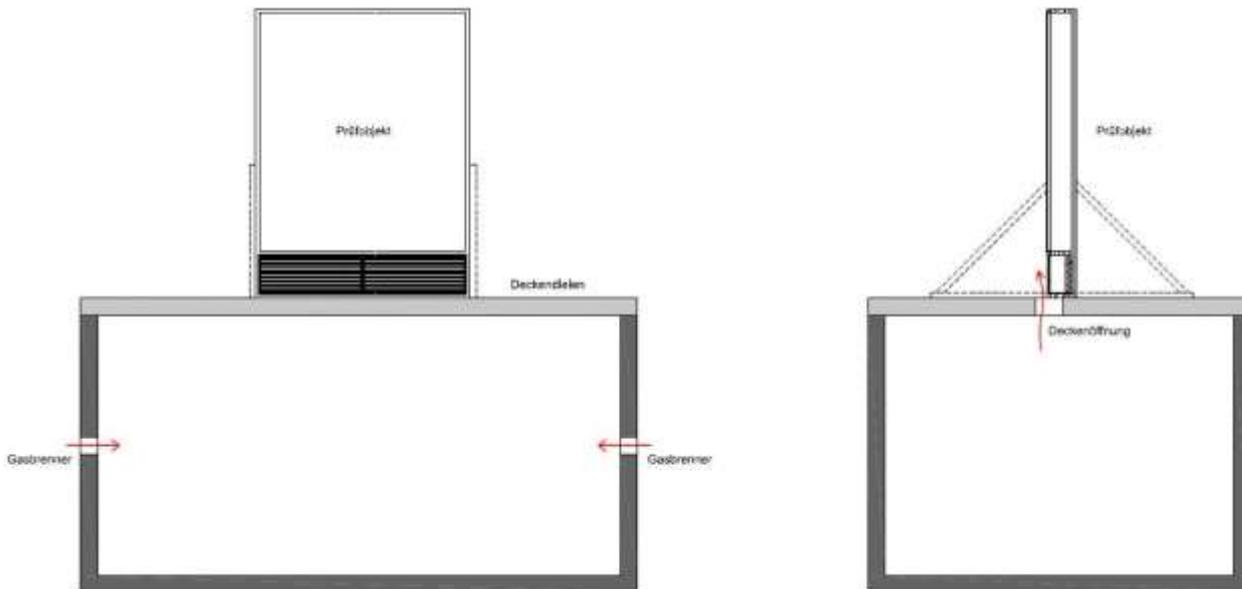


Abb. 5.158: Prüfaufbau mit schematischem Längs- und Querschnitt des Deckenofens [eigene Darstellung]

In Abstimmung mit der Prüfstelle erfolgte die Aufstellung der Prüffassade P2 abweichend von den Vorgaben laut [N17] auf einem Deckenofen mit einer für die Versuchsanordnung entsprechend dimensionierten Deckenöffnung laut Abbildung 5.158. Diese Versuchsanordnung wird i.a. von den Prüfstellen in Österreich verwendet und kann daher als Stand der Technik angesehen werden.



Abb. 5.159: Prüfofen mit Deckendielen und Öffnung [Foto des Autors]



Abb. 5.160: Prüffassade über der Deckenöffnung [Foto des Autors]

5.6.5.2 Thermische Einwirkung

Der Prüfversuch wurde unter Einwirkung der Außenbrandkurve nach ÖNORM EN 1363-2 [N21] über eine Mindestdauer von 30 Minuten durchgeführt. Der Temperaturverlauf der Außenbrandkurve (ef-Kurve) wurde direkt im Sturzbereich gemessen. Vor der Durchführung des Prüfversuch wurde ein Kalibrierversuch durchgeführt.

Die Außenbrandkurve wird durch folgende Gleichung bzw. folgendes Diagramm dargestellt:

$$\Theta_g = 660 (1 - 0,687 e^{-0,32 t} - 0,313 e^{-3,8 t}) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Dabei ist

Θ_g ... die Gastemperatur in Bauteilnähe [°C];

t ... die Zeit [min]

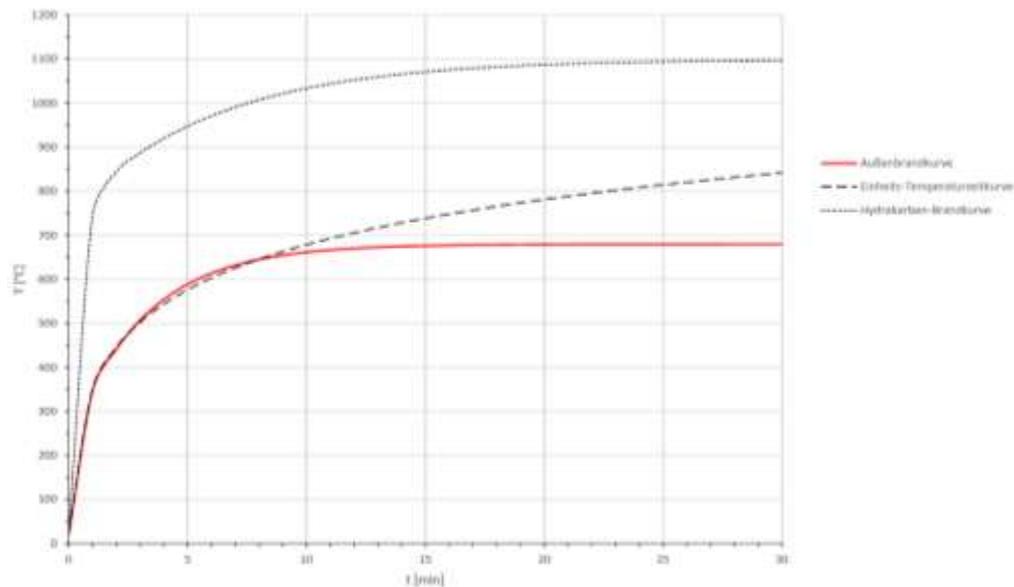


Abb. 5.161: Temperatur-Zeit-Diagramm der Außenbrandkurve [eigene Darstellung]

5.6.5.3 Temperaturmessung

Die Temperaturmessungen erfolgte gemäß [N17] im Fassadenzwischenraum in folgender Anordnung:

- An der Sturzunterkante (A.1 bis A.6)
- 4 Thermoelemente (Z.9 bis Z.12) hinter der Verglasung, ca. 1000 mm oberhalb des mittleren Riegels

Anmerkung:

Für das Prüfergebnis ist die gemessene Temperaturerhöhung dieser Thermoelemente maßgeblich.

Zusätzliche Thermoelemente wurden im Zwischenraum hinter dem Lüftungsgitter und an weiteren Bereichen des Fassadenzwischenraums angeordnet:

- 4 Thermoelemente im Zwischenraum hinter dem Lüftungsgitter
- 4 Thermoelemente hinter der Verglasung, ca. 100 mm oberhalb des mittleren Riegels
- 4 Thermoelemente hinter der Verglasung, ca. 100 mm unterhalb des oberen Riegels

Für die Temperaturmessungen im Zwischenraum wurden Nickel-Chrom/Nickel Thermoelemente des Typs K verwendet. Die Temperaturen wurden in Zeitintervallen von einer Sekunde registriert.

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

Die Thermoelemente (rot: gemäß [N17], blau: zusätzliche Thermoelemente) wurden in den folgenden Positionen vorgesehen:

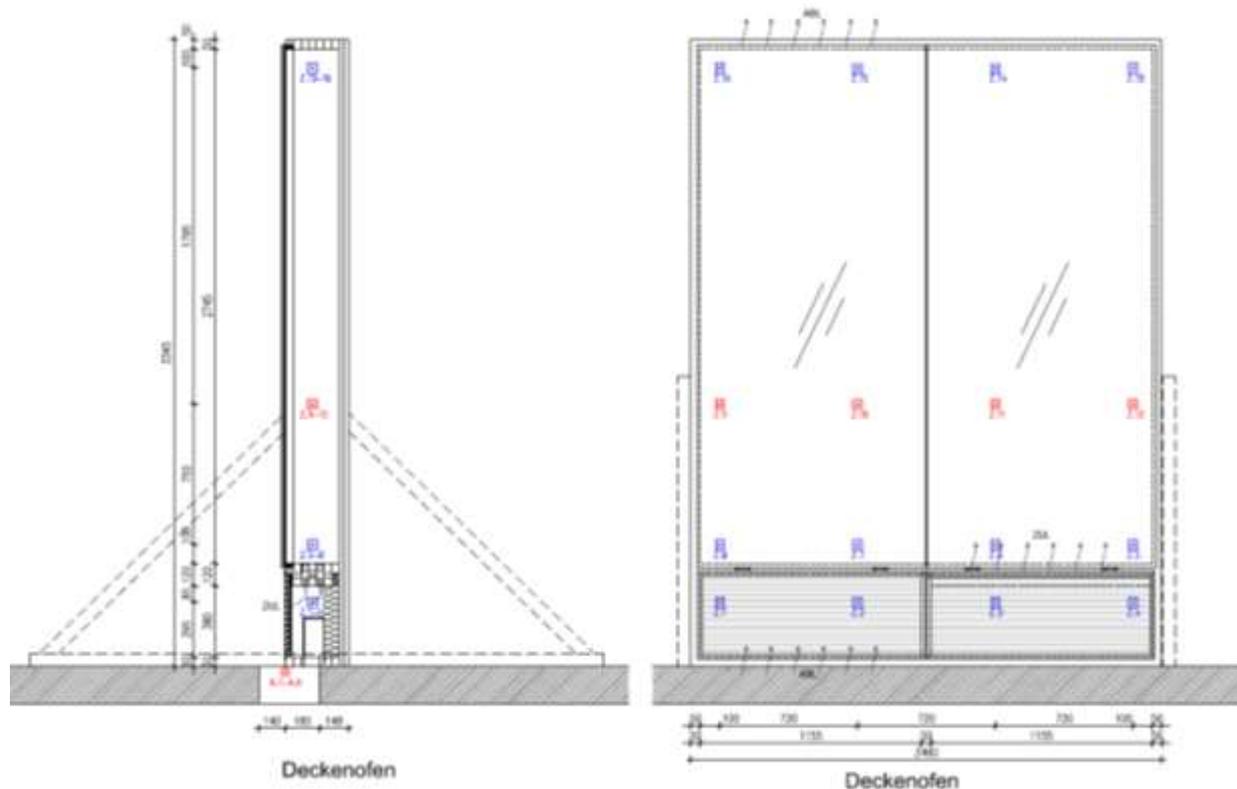


Abb. 5.162: Schnitt und Ansicht mit Lage der Thermoelemente [eigene Darstellung]

5.6.6 Durchführung des Prüfversuchs

Der Fassadenprüfversuch wurde am 06.10.2016 in der Prüfhalle der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien durchgeführt. Die Umgebungstemperatur betrug ca. 16 °C. Unmittelbar vor der Durchführung der Versuche wurde die Holzfeuchtigkeit an drei Stellen des BSH-Rahmens gemessen und lag zwischen 9,3 % bis 9,5 %.

Mit der Zündung der Gasbrenner des Prüfofens wurde der Versuch begonnen, und nach 30 Minuten wurde die Prüfung beendet.

Die Prüfung wurde sowohl fotografisch als auch mittels Videokamera dokumentiert.

Gemäß den Vorgaben nach [N17] wurden während der Prüfung folgende Beobachtungen vorgenommen:

- Visuelle Beobachtung der Flammenausbreitung
- Visuelle Beobachtung des Herabfallens von Teilen des Prüfkörpers
- Visuelle Beobachtung des Prüfkörpers hinsichtlich Brandverhalten und Brandnebenerscheinungen (insbesondere Schmelzen, Tropfen)

5.6.6.1 Beobachtungen bei der Versuchsdurchführung

Der Versuch P2 wurde um 14:17:10 gestartet. Ab der ersten Minute wurde die Verformung der Aluminiumlamellen in Folge der Wärmedehnung sichtbar, und in weiterer Folge begannen die Lamellen im linken Bereich zu schmelzen – dadurch wurden Flammen im Zwischenraum hinter den Lamellen sichtbar. Im Zwischenraum hinter der Verglasung trat eine geringe Qualmbildung auf. Ab der fünften Minute fielen einzelne Lamellen herab, bis in Folge das gesamte Lüftungsgitter geschmolzen und herabgefallen war. Das dahinterliegende Insektenschutzgitter aus Stahlgewebe blieb weiterhin erhalten. In dem offenen Zwischenraum war ein voll entwickelter Brand sichtbar, und einzelne Flammenspitzen reichten auch über den mittleren BSH-Riegel bis zu dem unteren Bereich der Verglasung. In der siebten Minute wurden mittels Infrarot-Temperaturmessgerät an der Glasoberfläche Temperaturen von ca. 350 °C (unterer Rand) bis ca. 80°C (oberer Bereich) gemessen. In der 14. Minute züngelten an der linken unteren Aussenseite des BSH-Rahmens kurzzeitig kleine Flammen. An der Rückwand des Probekörpers war Rauch sichtbar, welcher aus der Fuge zwischen dem unteren Riegel des BSH-Rahmens und den Deckendielen des Prüfofens austrat. Nach 22 Minuten traten Spannungsrisse an der linken Kante der Verglasung auf, dabei wurden an der Scheibenoberfläche Temperaturen von ca. 370°C im unteren Randbereich und von ca. 270°C in Scheibenmitte gemessen. In der 24. Minute kam es zu einer ähnlichen Rissbildung an der rechten Kante der Verglasung. Nach 24 Minuten und 30 Sekunden fiel in der linken unteren Ecke ein Teilstück der äußeren Floatglasscheibe im Ausmaß von ca. 20 x 20 cm herab. Der Raumabschluss blieb aber nach wie vor auf Grund der inneren Glasscheibe erhalten. In diesem Eckbereich wurde an der Oberfläche der nun freiliegenden inneren Floatglasscheibe eine Temperatur von ca. 100°C gemessen. An den Bruchkanten des abgefallenen Glasstücks war ein kurzzeitiges Brennen der Folie sichtbar. Gegen Ende der 30. Minute konnte man im Bereich der unteren BFU-Leiste zwischen Verglasung und mittlerem BSH-Riegel kleinere Flammen im Fassadenzwischenraum erkennen. Nach 30 Minuten wurde der Versuch beendet und das Prüfobjekt abgelöscht.



Abb. 5.163: Verformung der Aluminiumlamellen (1. Minute)
[Foto des Autors]



Abb. 5.164: Schmelzen der Aluminiumlamellen (2. Minute)
[Foto des Autors]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall



Abb. 5.165: Herabfallen der Aluminiumlamellen (5. Minute)
[Foto des Autors]



Abb. 5.166: Risse am linken Rand der Verglasung (22. Minute)
[Foto des Autors]



Abb. 5.167: Abfallen eines Glasstücks (24 Min. und 30 Sek.)
[Foto des Autors]



Abb. 5.168: Ende des Prüfversuchs (30. Minute)
[Foto des Autors]

5.6.7 Feststellungen nach der Prüfung

Gemäß ÖNORM B 3800-8, Pkt. 6.1 [N17] gilt das Prüfergebnis als positiv, wenn über eine Mindestprüfdauer von 30 Minuten

- die gemessene Temperaturerhöhung 250 K nicht überschreitet,
- keine Teile des Brandschutzschildes herabfallen und
- keine sonstigen visuellen Beobachtungen erfolgen, die eine wesentliche Beeinträchtigung des Schutzzieles zur wirksamen Einschränkung der vertikalen Flammenausbreitung bedeuten.

5.6.7.1 Feststellungen nach Versuchsende

Zu Versuchsende nach der 30. Minute (vor dem Ablöschen) befand sich das Prüfobjekt in folgendem Zustand:

- Risse in der Verglasung an den vertikalen Aussenkanten
- Ein Teilstück der äußeren Floatglasscheibe herabgefallen
- Raumabschluss gegeben
- Holz-Glas-Verklebung an den seitlichen und der oberen Kante erhalten und funktionsfähig
- BSH-Rahmenkonstruktion im Brandbereich stark verkohlt, Glut und teilweise noch Flammen im Zuluftbereich
- Branderscheinungen im Bereich des mittleren Riegels
- Koppelleiste im unteren Bereich stark verkohlt
- Aluminiumlamellen geschmolzen bzw. herabgefallen



Abb. 5.169: Prüffassade nach Versuchsende
[Foto des Autors]

5.6.7.2 Feststellungen am Probekörper nach dem Ablöschen

Nach dem Ablöschen und während der Demontage und Entsorgung wurden am Prüfobjekt folgende Feststellungen gemacht:

- Der vordere Teil des unteren BSH-Riegels (direkt über der Deckenöffnung des Prüfofens) ist nicht mehr vorhanden
- Im Bereich der Zuluftöffnungen/Brandsperrn ist eine leichte Verfärbung, aber keine Verkohlung der Holzoberfläche zu sehen
- Entlang der unteren Glaskante ist die BFU-Koppelleiste sehr stark verkohlt, und die Brandstellen im Fassadenzwischenraum (in der 30. Minute) sind an der Vorderkante des BSH-Riegels zu erkennen.
- Bei den Glasauflagern sind an der Oberfläche des mittleren BSH-Riegels verkohlte Bereiche sichtbar
- Die Ethylenvinylacetatfolie der Verbundsicherheitsgläser weist an den Bruchstellen Verfärbungen auf, ist jedoch überwiegend nicht geschmolzen und tragfähig
- Die Silikonverklebung zwischen den Verbundsicherheitsgläsern und den BFU-Leisten ist entlang der vertikalen und oberen Glaskante erhalten und funktionsfähig (Im Zuge des Abtransports ist auch beim Kippen des Fassadenelements die Tragfähigkeit der Verglasung und der Verklebung weiterhin gegeben.)

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall



Abb. 5.170: Untersicht des Fassadenelements
[Foto des Autors]



Abb. 5.171: Draufsicht mittlerer Riegel mit Brandsperren
[Foto des Autors]



Abb. 5.172: Ansicht des unteren Fassadenbereichs
[Foto des Autors]



Abb. 5.173: Detailansicht Glasbruch beim Auflager
[Foto des Autors]

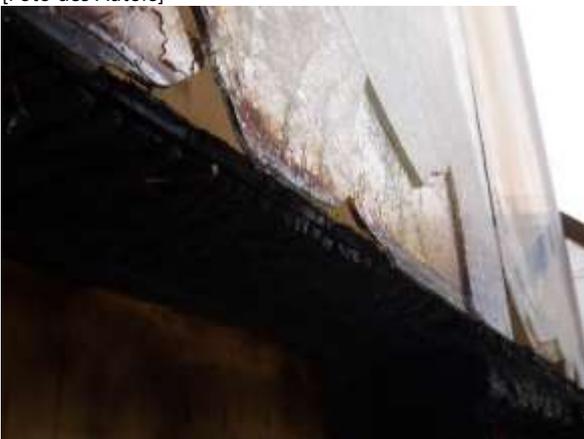


Abb. 5.174: Glasunterkante [Foto des Autors]

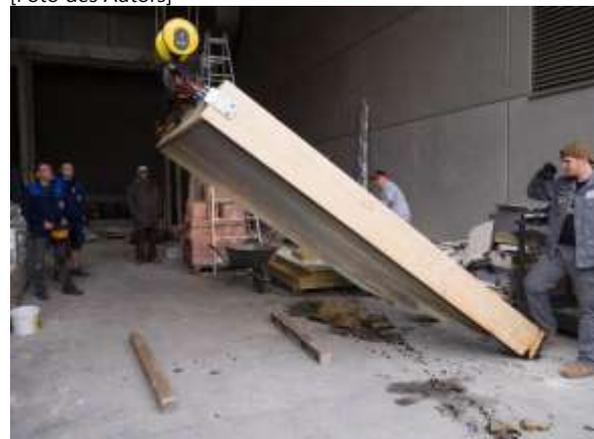


Abb. 5.175: Kippen des Fassadenelements [Foto des Autors]

5.6.8 Auswertung der Temperaturdaten

Die Auswertung der Temperaturdaten der Thermoelemente des Fassadenprüfversuchs P2 zeigt, dass sämtliche Thermoelemente im Fassadenzwischenraum (Z.5 bis Z.16) das Kriterium der Temperaturerhöhung um mehr als 250 K deutlich unterschreiten. Nur in der ersten Minute des Versuchs kommt es zu einem raschen Temperaturanstieg bei dem Thermoelement Z.6, welches unmittelbar über den Zuluftöffnungen des Fassadenzwischenraumes liegt. Durch den wirksamen Verschluss dieser Öffnungen durch die bei ca. 180 °C aufschäumenden Brandsperren erfolgt jedoch eine Abkühlung in der zweiten Minute. In weiterer Folge zeigen alle Thermoelemente ein stetig steigendes Temperaturverhalten, welches zu Versuchsende bei ca. 160 °C liegt.

Die Thermoelemente im Zwischenraum hinter dem Lüftungsgitter (Z.1 bis Z.4) weisen ab der ersten Minute des Prüfversuchs Temperaturen über 700 °C auf – die maximalen Werte erreichen im Verlauf des Versuchs bis zu 873 °C. Generell liegen diese Werte deutlich über den Temperaturen im Sturzbereich (A.1 bis A.6) – dies ist auf den Abbrand des Holzrahmens in Verbindung mit den Ventilationsbedingungen in diesem Bereich zurückzuführen. Das kurzzeitigen Abkühlen des Thermoelements Z.1 gegen Versuchsende kann auf das Ablöschen von Branderscheinungen im Bereich des linken aussteifenden Holzstehers zurückgeführt werden.

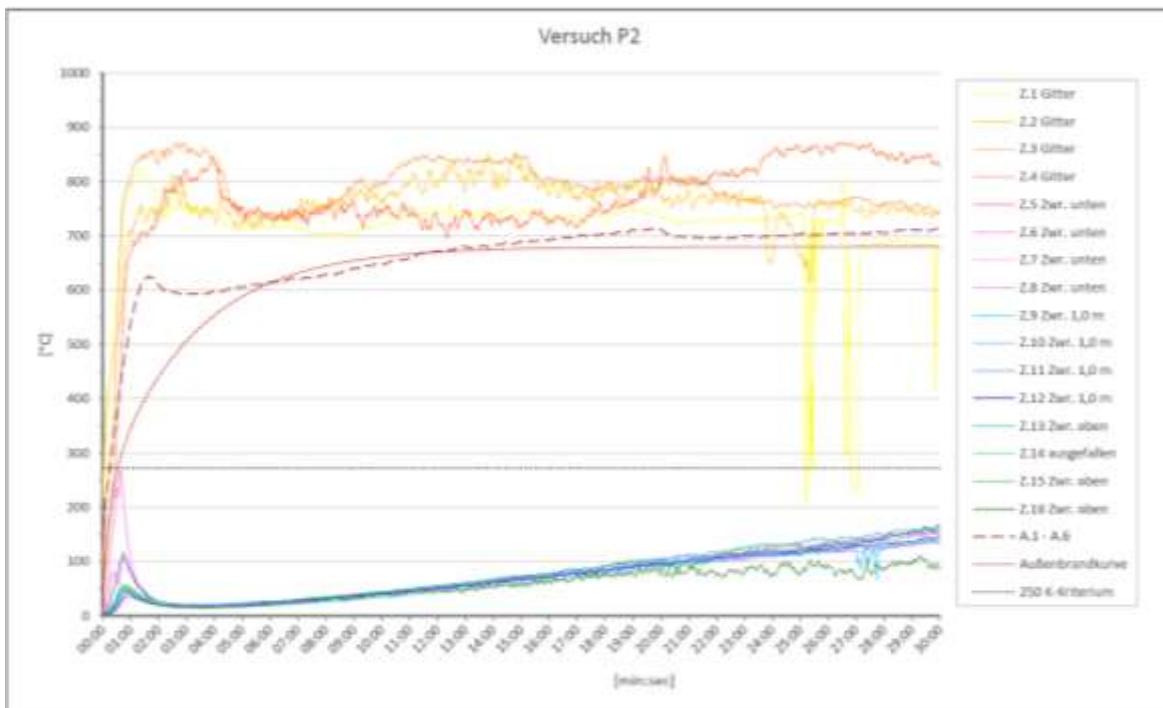


Abb. 5.176: Temperatur-Zeit-Diagramm P2 [eigene Darstellung]

Versuch P2								
Kriterium	Zeit	Δt	Z.3 Gitter	Z.6 unten	Z.11 1,0 m	Z.15 oben	A. 1-6 (arith. M.)	Außen- brandk.
	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Versuchsbeginn	14:17:10	00:00:00	87	4	3	4	129	20
T max. im Fassaden-Zwischenraum unten	14:17:48	00:00:38	667	269	28	52	428	291
T max. im Gitter-Zwischenraum	14:19:46	00:02:36	873	16	17	19	596	483
T max. im Fassaden-Zwischenraum oben	14:46:41	00:29:31	752	152	162	160	712	680
T max. im Fassaden-Zwischenraum 1,0 m	14:47:05	00:29:55	743	157	167	156	713	680
Versuchsende	14:47:10	00:30:00	745	157	164	158	714	680

Abb. 5.177: Temperatur-Zeit-Diagramm P2 [eigene Darstellung]

5.6.9 Zusammenfassende Beurteilung

Zielsetzung des Fassadenbrandversuch P2 war der Nachweis des nachfolgend angeführten Schutzziels für eine geklebte Holz-Glas-Kastendoppelfassade des Typs HGV-DF02 mit belüftetem Fassadenzwischenraum:

- Begrenzung der vertikalen Brandausbreitung mittels deckenübergreifendem Außenwandstreifen mit einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten

Für den Nachweis dieser Schutzziele wurde die Prüfanordnung gemäß folgender nationaler Prüfnorm durchgeführt:

- ÖNORM B 3800-8:2013-10-01 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 8: Brandverhalten über die Dauerhaftigkeit von deckenübergreifenden Außenwandstreifen (Brandschutzschilde gegen Feuerüberschläge im Parapetbereich) - Anforderungen, Prüfungen, Beurteilungen [N17]

Anmerkung: In Abstimmung mit der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien erfolgte die Aufstellung der Prüffassade P2 abweichend von den Vorgaben der ÖNORM B 3800-8 auf einem Deckenofen mit einer für die Versuchsanordnung entsprechend dimensionierten Deckenöffnung. Diese Versuchsanordnung wird üblicherweise von den Prüfstellen in Österreich verwendet und kann daher als Stand der Technik angesehen werden.

Auf Grund des Herabfallens eines Glasstücks in der Größe von ca. 20 x 20 cm nach 24 Minuten konnte bei dem gegenständlichen Prüfversuch kein positives Ergebnis entsprechend den Kriterien gemäß Pkt. 6.1 der ÖNORM B 3800-8 [N17] erzielt werden.

Das Herabfallen dieses Glasstücks hat jedoch keinen Einfluss auf die Wirksamkeit des gegenständlichen Bauteils als deckenübergreifender Außenwandstreifen im Sinne der OIB-Richtlinie 2 [N6], da sowohl der Raumabschluß der Verglasung erhalten blieb als auch eine Temperaturerhöhung von 250 K im Zwischenraum nicht überschritten wurde.

Das eigentliche Schutzziel des Brandschutzschildes, nämlich die Begrenzung einer vertikalen Brandübertragung durch die Verhinderung einer direkten Flammenübertragung im Bereich des Brandschutzschildes über einen Zeitraum von 30 Minuten, konnte mit dem gegenständlichen Prüfversuch nachgewiesen werden.

Der Laborbericht von der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien sowie eine ergänzende Stellungnahme hinsichtlich der Einhaltung des zuvor beschriebenen Schutzziels zu diesem Prüfversuch findet sich im Anhang dieser Arbeit.

6 Vergleichende Beurteilung der durchgeführten Fassadenbrandversuche mit anderen Realbrandversuchen

Die in dieser Forschungsarbeit durchgeführten Fassadenbrandversuche wurden in der Prüfhalle der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien gemäß den Vorgaben der entsprechenden Normen und unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt. Im Unterschied dazu können bei Realbrandversuchen zusätzliche Faktoren wie z.B. Windverhältnisse oder die Gebäudegeometrie die Prüfergebnisse unter Umständen maßgeblich beeinflussen. Da im Zuge dieser Forschungsarbeit keine Validierung der durchgeführten Fassadenbrandversuche durch Realbrandversuche möglich war, werden die Prüfergebnisse der Fassadenprüfungen in diesem Abschnitt mit bereits durchgeführten Brandversuchen an realen Gebäuden verglichen, um die erzielten Ergebnisse auf Plausibilität zu überprüfen.

Ein umfangreicher Forschungsbericht liegt zu den Brandversuchen in Lehrte vor, welche vom Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt wurden. Die Versuche wurden an einem zum Abbruch bestimmten Wohnhaus mit vier Obergeschoßen im Jahr 1974 durchgeführt. Die wesentlichen Forschungsthemen stellen dabei die Untersuchung der Brandentwicklung und Brandausbreitung in einem mehrgeschoßigen Gebäude sowie die Überprüfung des Brandverhaltens von Bauteilen in praxisgerechtem Einbauzustand dar. Insgesamt wurden zwei Vorversuche und zwölf Versuche in verschiedenen Raumkonfigurationen und Brandlasten sowie bei unterschiedlichen Wind- und Ventilationsverhältnissen durchgeführt. Die gewählten Messverfahren für die Versuche lieferten Daten betreffend Temperatur, Gaszusammensetzung, Wärmestromdichte und den Druckverhältnissen. Außerdem wurden Verformungen von Bauteilen und Auflagerdrücke von Stahlbetondecken gemessen. Die Auswertung der Versuche wurde im Dezember 1976 abgeschlossen und 1978 in einem Ergebnisbericht veröffentlicht. Dieser besteht aus dem ersten Teil, der die neuen wesentlichen Erkenntnisse darstellt und eingehend kommentiert, und einem zweiten Teil, der die Einzelmessergebnisse der Versuche in Form eines Anhangs darstellt. [12]

Ein weiteres Forschungsprogramm mit Naturbrandversuchen wurde von der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfanstalt für das Bauwesen (MFPA Leipzig) unter Beteiligung zusätzlicher Organisationen aus der Schweiz, Österreich, Deutschland und Finnland durchgeführt. Die gesamte Versuchsreihe gliederte sich in 112 Laborbrandversuche (Kleinbrennertest nach DIN 4102), 33 Originalbrandversuche in der Prüfhalle der MFPA Leipzig und sechs Naturbrandversuche. Diese wurden in einem zum Abriss bestimmten Wohnhaus in Beton-Plattenbauweise in Merkers (Thüringen) durchgeführt. Die Versuche hatten das Ziel, die Ergebnisse der großmaßstäblichen Brandversuche in der MFPA Leipzig bei Anwendung praxisüblicher Brandlasten und Brandszenarien unter natürlichen Witterungsbedingungen an einem realen Gebäude zu validieren. Untersucht wurde das Brandverhalten mehrgeschoßiger, vollflächig applizierter Holzschalungen bei einer Brandbeanspruchung von außen am Fassadensockel und einer Brandbeanspruchung von innen durch einen Raumbrand in einem an die Fassade grenzenden Raum mit geöffneten Fenstern. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass vorgehängte Holzfassaden bei Anwendung üblicher konstruktiver Brandschutzmaßnahmen ein Brandverhalten aufweisen, das den allgemeinen Brandschutzzielen an der Fassade bis zur Hochhausgrenze genügt. Weiters waren die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts Grundlage der Lignum-Dokumentation Brandschutz 7.1 – Aussenwände [4], welche in der Schweiz den Status eines „Stand der Technik Papiers“ hat, sowie für die österreichische Norm „Brandschutztechnische Ausführung von Fassaden aus Holz und Holzwerkstoffen in den Gebäudeklassen 4 und 5“ [N11], welche unter Berücksichtigung konstruktiver und brandschutztechnischer Details nachweisfreie Holzfassaden bis zur Hochhausgrenze festlegt. [4], [29]

6.1 Brandversuche in Lehrte

6.1.1 Temperaturentwicklung und Temperaturverteilung

Bei den Brandversuchen in Lehrte erfolgten die Temperaturmessungen vor der Süd-Fassade mit einem Mess- und Beobachtungsturm, welcher über eine Stahlkonstruktion mit rasterförmig angeordneten Thermoelementen verfügte. Der Abstand zwischen den Thermoelementen betrug 50 cm, und es konnte dadurch in vertikaler Richtung ein ca. dreigeschoßiger Fassadenbereich ausgewertet werden. Als Brandlast wurden Holzkippen, Mobiliar und Heizöl verwendet. Die folgenden Abbildungen zeigen die Originalmesswerte und Isothermen zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur bzw. den Temperaturverlauf längs der Achse des Heißgasstroms bei dem Versuch 1, der mit einer gleichmäßig im Brandraum verteilten Brandlast in Form von Holzkippen mit 30 kg/m² durchgeführt wurde. [12]

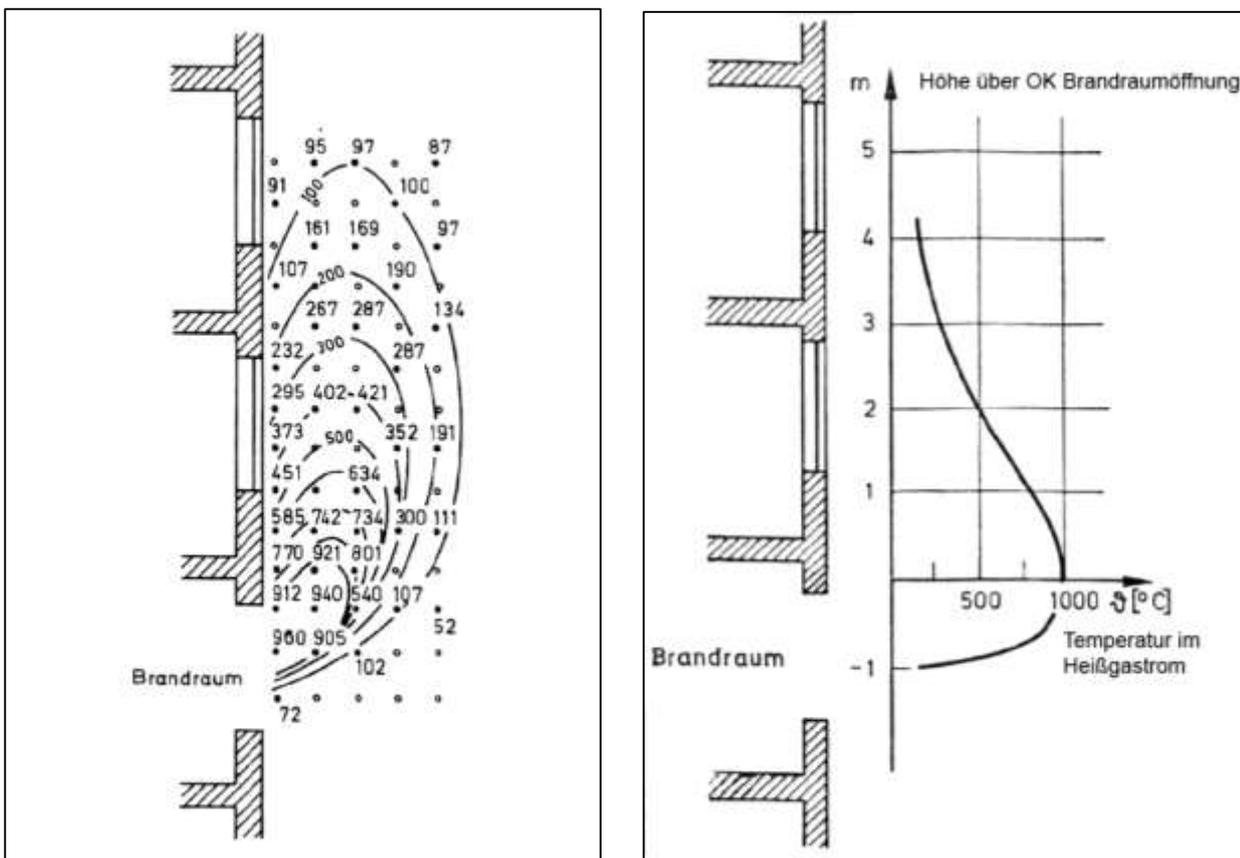


Abb. 6.1 (li.): Originalmesswerte und Isothermen zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur [12]

Abb. 6.2 (re.): Temperaturverlauf längs der Achse des Heißgasstroms zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur [12]

Bei den im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführten Vorversuche und dem Fassadenprüfversuch P1 erfolgten die Temperaturmessungen vor der Fassade durch einen Prüfbaum mit Thermoelementen. Die Lage der Thermoelemente (siehe Abb. 6.4) deckt sich mit einigen Lagen der bei den Lehrter Brandversuchen eingesetzten Thermoelemente, wodurch unmittelbar vor der Fassade ein Vergleich der Messwerte einzelner Punkte möglich ist. Die deckungsgleichen Thermoelementlagen sind in der Abbildung der Überlagerung rot gekennzeichnet.

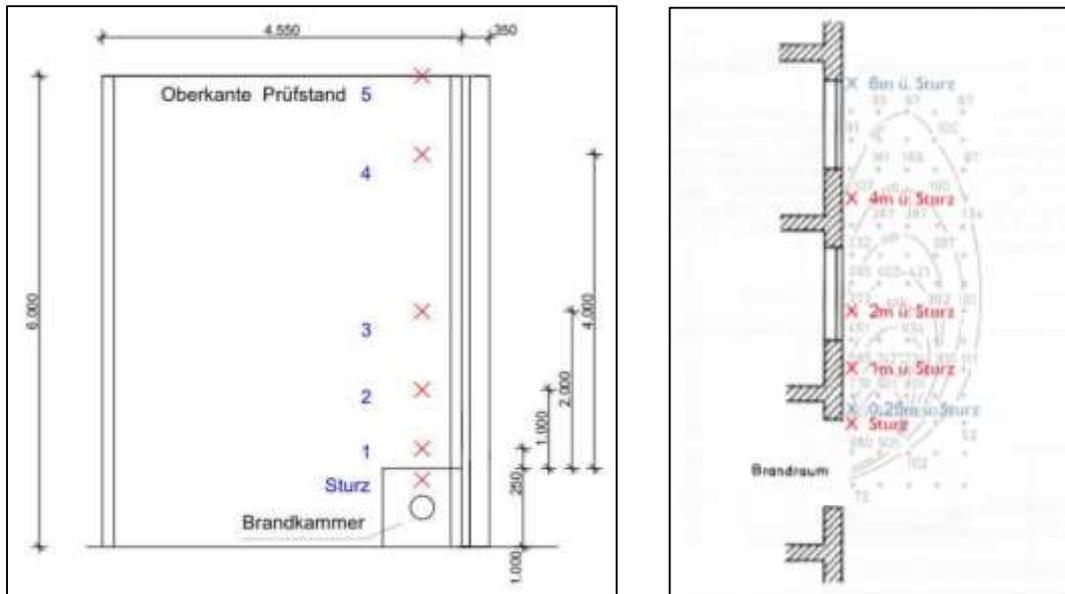


Abb. 6.3 (li.): Thermoelementlagen beim Fassadenprüfversuch P1 (siehe Prüfbericht MA 39 laut Anhang)
 Abb. 6.4 (re.): Originalmesswerte und Isothermen zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur ([12] überarbeitet vom Autor)

Die unterschiedlichen Messwerte bei dem Naturbrandversuch 1 in Lehrte und den im Zuge der Forschungsarbeit durchgeführten Vorversuchen (V1 bis V3) sowie beim Fassadenbrandversuch P1 zeigen, dass im Fassadenbereich ein plausibles Szenario durch die Laborversuche abgebildet wurde, obwohl keine exakte Übereinstimmung der Heißgastemperaturen gegeben ist. Die Temperaturdifferenzen lassen sich einerseits auf die unterschiedlichen Brandlasten, andererseits auf Unterschiede im Versuchsablauf (z.B. Ventilationsbedingungen, Detailausbildung der Fassadenkonstruktion, Kamineffekt im Fassadenzwischenraum) zurückführen. Man kann weiters feststellen, dass bei dem Fassadenprüfversuch P1 die maximalen Heißgastemperaturen deutlich über jenen des Lehrter Naturbrandversuchs liegen und daher in dieser Hinsicht ein konservatives Prüfscenario gewählt wurde.

Versuchsort	Lehrte	Prüfstand MA 39				
Bezeichnung	Versuch 1	HGV-V1a	HGV-V1b	HGV-V2	HGV-V3	HGV-P1
Art der Brandlast	Holzkrippe	Holzkrippe	Holzkrippe	Holzkrippe	Holzkrippe	Holzkrippe
Brandlast/m ²	30 kg	25 kg	25 kg	25 kg	25 kg	50 kg
Heißgastemperatur	ϑ_{max} [°C]					
Sturz	912	973	945	933	952	1084
1 m ü. Sturz	585	-	-	253	318	-
2 m ü. Sturz	373	466*	248	714*	244	403
4 m ü. Sturz	107	119	101	85	101	156
Anmerkung 1: Mit - gekennzeichnete Thermoelemente sind ausgefallen						
Anmerkung 2: * Messwerte in Verbindung mit Kamineffekt im Zwischenfassadenbereich						

Abb. 6.5: Tabellarische Darstellung der maximalen Heißgastemperaturen [eigene Darstellung]

6.1.2 Temperaturzeitverlauf

Die zuvor angeführten maximalen Heißgastemperaturen des Lehrter Versuchs 1 traten in der 23 Minute auf. Der Temperaturzeitverlauf ist anhand einiger Messpunkte im Fassadenbereich abgebildet. Nach ungefähr 60 Minuten zeigten alle Thermoelemente Heißgastemperaturen unter 200 °C und der Brand war nahezu abgeklungen. [12]

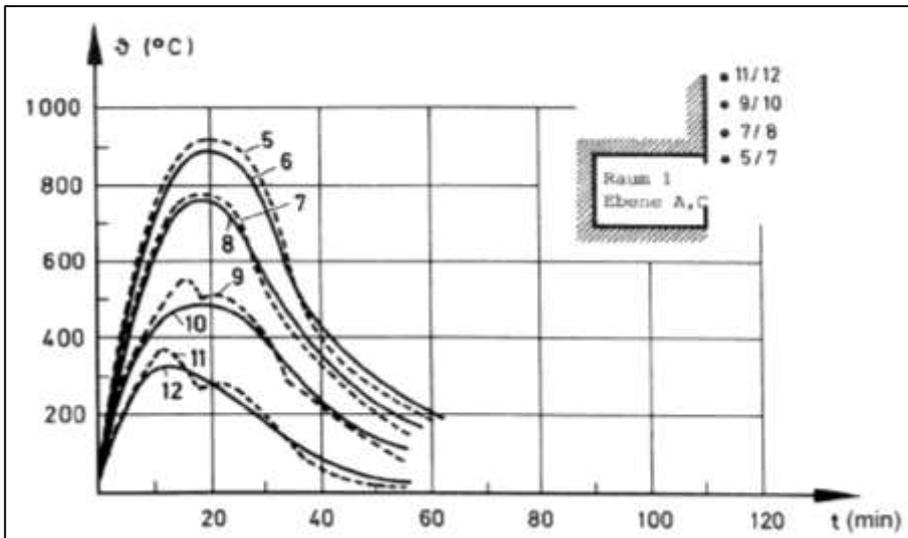


Abb. 6.6: Temperaturzeitverlauf an verschiedenen Messstellen beim Lehrter Versuch 1 [12]

Bei vergleichender Betrachtung der Temperaturzeitverläufe des Fassadenprüfversuchs P1 dieses Forschungsprojektes wird deutlich, dass die maximalen Heißgastemperaturen bereits in der 13. Minute erreicht wurden und der Brand nach dem Zusammenbrechen der Holzkrippe nach der 24. Minute auch wesentlich schneller abgeklungen ist.

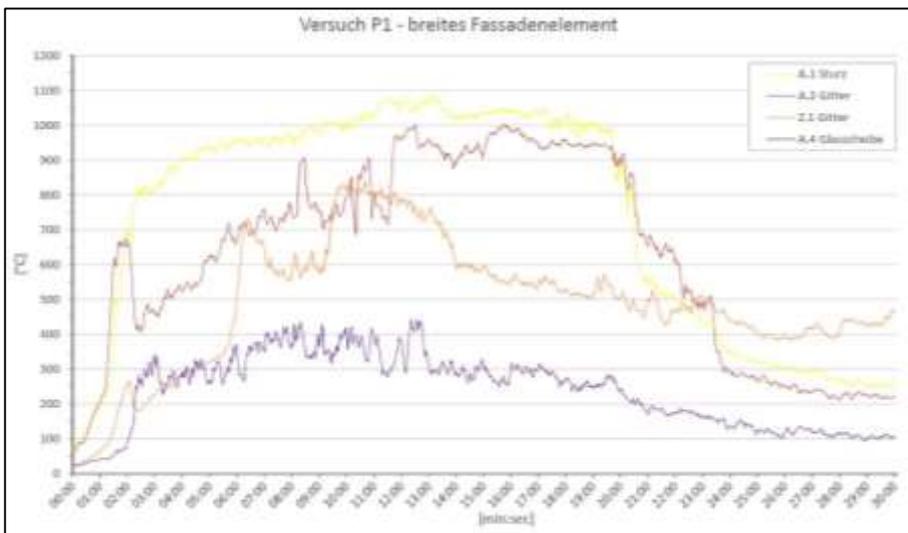


Abb. 6.7: Temperaturzeitverlauf an den Messstellen des Prüfversuchs P1 [eigene Darstellung]

Dieser deutlich kürzere Brandverlauf lässt sich einerseits auf die unterschiedliche Raumkonfiguration (Lehrte: Brandraum ca. 18 m² / Brandkammer beim MA 39-Prüfstand ca. 1 m²) und die damit zusammenhängenden Brandlasten, andererseits auf die unterschiedlichen Ventilationsbedingungen (Lehrte: kein Windeinfluss / MA 39-Prüfstand: Ventilation mit 400 m³/h bzw. 800 m³/h) zurückführen.

6.1.3 Flammenhöhen und -längen

Im Zusammenhang mit dem Temperaturfeld vor der Fassade ist die Ermittlung der maximalen Höhe der Flammenspitzen von besonderem Interesse. Aus den Messergebnissen der Lehrter Brandversuche konnte festgestellt werden, dass der Umriss der Flammen in etwa der 500 °C-Isotherme entspricht. Zum Zeitpunkt der Maximaltemperatur im Brandraum erreichten die Flammenspitzen eine Höhe von $h_k = 4,0$ m bis 4,3 m

über dem Brandraumboden. Die Höhe der Flammenspitzen über dem Fenstersturz betrug ca. $h_{\text{FST}} = 1,5$ m bis 1,8 m. Die Gesamtlänge der Flammen, welche durch den Abstand zwischen der Flammenspitze und der Mitte des Brandraumbodens definiert wurde, betrug bei den Lehrter Versuchen ca. 5,3 m. [12]

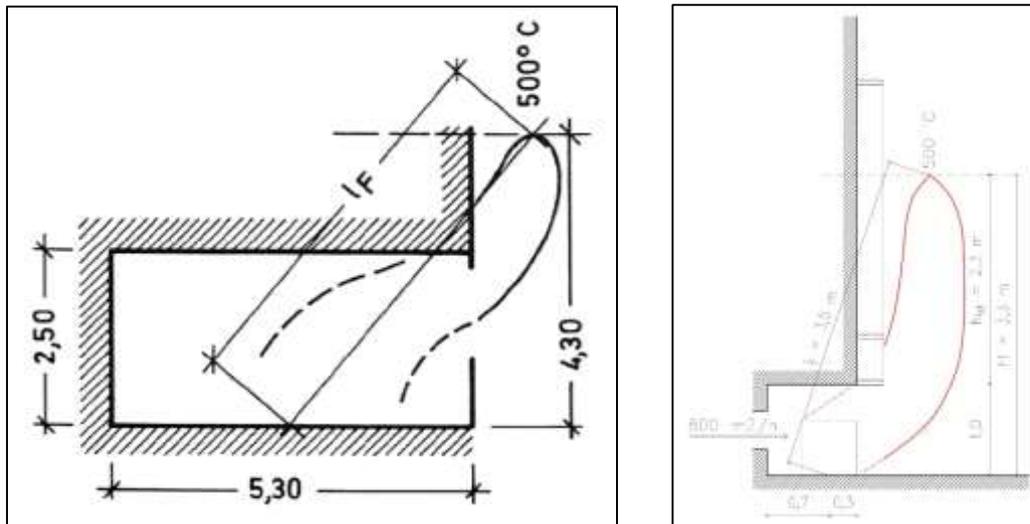


Abb.6.8 (li.): Flammenhöhen bei den Lehrter Versuchen [12]

Abb. 6.9 (re.): Flammenhöhen bei dem Prüfversuch P1 [eigene Darstellung]

Die Flammenhöhen und –längen bei dem Prüfversuch P1 sind in Abbildung 6.9 dargestellt, wobei die maximale Höhe der Flammenspitze durch Beobachtung während des Versuchs ermittelt wurde. Im Unterschied zur Flammenhöhe der Lehrter Versuche ist bei dem Prüfversuch P1 die Flammenhöhe h_k um einen Meter niedriger und beträgt ca. 3,3 m. Die Flammenlänge l_F ist ebenfalls mit 3,5 m deutlich kürzer als bei den Lehrter Versuchen. Auffallend ist jedoch, dass die Höhe der Flammenspitzen bzw. die Lage der 500 °C Isotherme bei dem Prüfversuch P1 um ca. 0,5 m bis 0,8 m weiter über dem Fenstersturz liegen als bei den Lehrter Versuchen. Demzufolge liegt in Bezug auf das Temperaturfeld vor der Fassade ein konservatives Prüfzenario vor. Die Differenzen in Bezug auf die Gesamtflammenhöhe und Flammenlänge können auf die unterschiedliche geometrische Lage des Mittelpunkts der Brandlast bzw. auf die unterschiedlichen Ventilationsbedingungen zurückgeführt werden.

6.1.4 Isothermenverlauf unter Windeinfluss

Im Rahmen der Brandversuche von Lehrte wurde anhand verschiedener Prüfanordnungen mit unterschiedlichen Strömungsverhältnissen der Einfluss von Wind auf den Brandverlauf und das Temperaturfeld vor der Fassade untersucht. Im Detail kann an dieser Stelle nicht auf die vielfältigen Aspekte dieser Untersuchungen eingegangen werden. Es besteht jedoch ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen den Ventilationsbedingungen des Prüfversuchs P1 und den Lehrter Versuchen 1 und 3 hinsichtlich der Vergrößerung der Flammenlänge infolge von Querlufteinflüssen im Brandraum. In der Erläuterung wird angeführt, dass sich die Flammenhöhe h_k in Folge des Windeinflusses mit einer luvseitigen Einströmgeschwindigkeit von 2 m/s auf ca. 5,2 m und mit einer Einströmgeschwindigkeit von 4 m/s auf ca. 6,7 m veränderte. In der Abbildung 6.10 ist diese Veränderung des Temperaturfeldes vor der Fassade deutlich zu erkennen. [12]

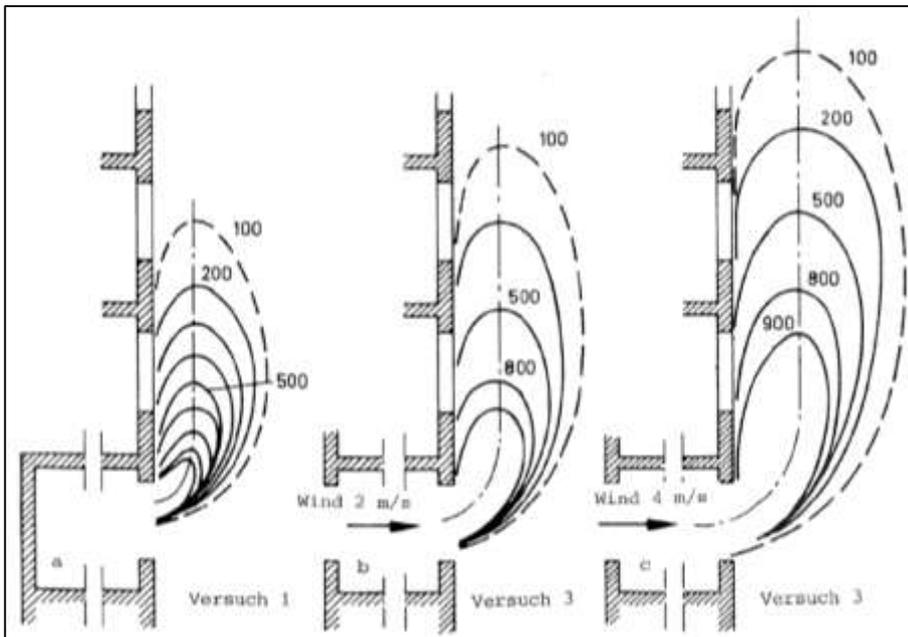


Abb. 6.10: Isothermenbilder des Temperaturfeldes mit und ohne Windeinfluß [12]

Bei dem Fassadenbrandversuch P1 wurde ab der zweiten Minute ein Volumenstrom von $800 \text{ m}^3/\text{h}$ von einem hinter der Brandkammer situierten Ventilator generiert und durch eine runde Öffnung in der rückwärtigen Wand mit einem Durchmesser von $0,42 \text{ m}$ eingeblasen. Die Strömungsgeschwindigkeit des Luftstroms durch diese Öffnung beträgt nach überschlagsmäßiger Berechnung ca. $1,6 \text{ m/s}$. Dieser Strömungseinfluß im Bereich der Brandkammer, der wie eine Querlüftung des Brandraums beim Lehrter Versuch 3 betrachtet werden kann, beeinflusst daher auch die Flammenhöhe bei dem Prüfversuch P1. Wie unter Pkt. 8.1.3 bereits gezeigt wurde, lag die Flammenhöhe h_{FST} bei P1 um ca. $0,5 \text{ m}$ bis $0,8 \text{ m}$ über der Flammenhöhe des Versuchs 1 von Lehrte. Nachdem der Versuch 3 mit einer Einströmgeschwindigkeit von 2 m/s zu einer Flammenverlängerung von ca. $0,9 \text{ m}$ führte, ist damit die Plausibilität der gewählten Prüfanordnung von P1 nachvollziehbar.

6.1.5 Geschwindigkeit und Richtung der Heißgase

Anhand des Versuchs 1 von Lehrte wurde die Heißgasgeschwindigkeit der aus der Brandraumöffnung entlang der Fassade aufsteigenden Volumenströme experimentell und anschließend numerisch ermittelt. Die Heißgeschwindigkeit ist neben der Temperatur von wesentlicher Bedeutung, da diese beiden Kennwerte zur Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangs und zur Aufstellung einer Wärmebilanz benötigt werden. Die horizontale Strömungsrichtung der Heißgase im oberen Bereich des Brandraums wird nach dem Austritt aus der Brandraumöffnung abgelenkt und geht danach in eine vertikale Aufwärtsströmung über (siehe Abb. 6.11). Dabei verändern sich die Geschwindigkeiten im Randbereich des Temperaturfeldes wesentlich schneller als im Zentrum des Heißgasstroms. Die Ursache dafür ist, dass jedes Heißgasteilchen, das wärmer als seine Umgebung ist, Auftrieb erleidet. Die Größe der Auftriebskraft ist eine Funktion der Temperaturdifferenz zu den nebenliegenden Teilchen. Demzufolge wirken auch auf die bereits absolut gesehen stark abgekühlten Gase in den höheren Zonen noch Auftriebskräfte, da auch dort immer noch Temperaturdifferenzen in der Größenordnung von $\vartheta = 100^\circ\text{C}$ vorhanden sind. [12]

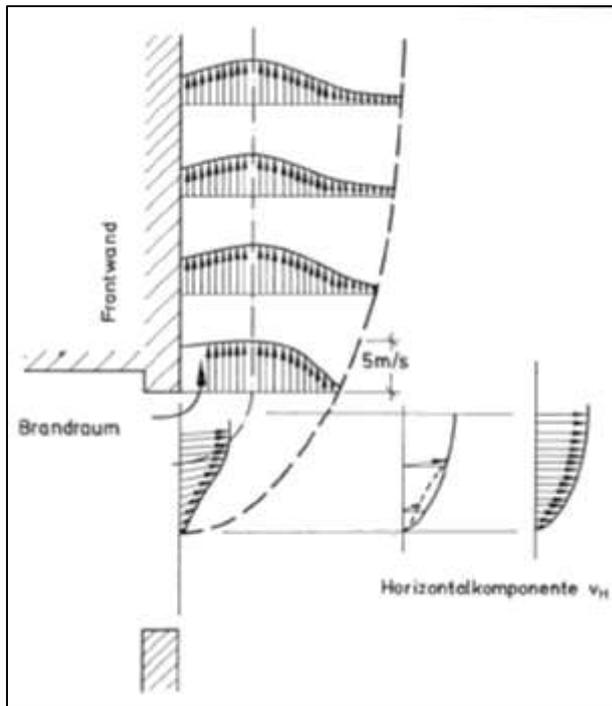


Abb. 6.11: Verteilung der Heißgasgeschwindigkeit vor der Fassade [12]

Der Verlauf der Aufwärtsgeschwindigkeit der Heißgase in Abhängigkeit von der Höhe und der Ausströmtemperatur lässt sich nach [12] näherungsweise wie folgt darstellen:

$$W_H = \sqrt{\frac{\vartheta_G + \vartheta_{Go}}{120}} \quad [12]$$

ϑ_G ... Heißgastemperatur im betrachteten Höhenschnitt [°C]

ϑ_{Go} ... Heißgastemperatur im Bereich der Brandraumöffnung [°C]

Diese Näherungsgleichung gilt für den Bereich $600 \text{ °C} < \vartheta < 1200 \text{ °C}$.

Durch Anwendung dieser Näherungsgleichung auf die Messwerte über dem Sturzbereich des Fassadenbrandversuch P1 lassen sich die Heißgasgeschwindigkeiten vor der Fassade ermitteln. Da jedoch das Thermoelement in 1 m über Sturz ausfiel und bei den darüber liegenden Thermoelementen Messwerte von $\vartheta_G < 600 \text{ °C}$ auftraten, wurde die Heißgasgeschwindigkeit lediglich für die Höhenlage von 0,25 m über Sturz mit der zuvor angeführten Formel wie folgt ermittelt:

$$W_H = \sqrt{\frac{942 + 1084}{120}} = 4,1 \text{ m/s}$$

6.1.6 Geometrie des Temperatur- und Strömungsfelds

Das Strömungs- und Temperaturfeld vor der Fassade weist ein klar erkennbares Zentrum auf. Der Übergang des Heißgastroms zur kalten Umgebung und damit auch die Begrenzung des Strömungsfelds lässt sich jedoch nur schwer festlegen, da das Ansaugen von Kaltluft und das turbulente Mischen mit den

Rauchgasen ein pulsierender Vorgang ist. Durch eine Vielzahl von Messungen konnte im Zuge der Brandversuche von Lehrte eine Feldbegrenzungskurve als Verlauf der Mittelwerte der Begrenzungslinie des Heißgasstroms dargestellt werden. [12]

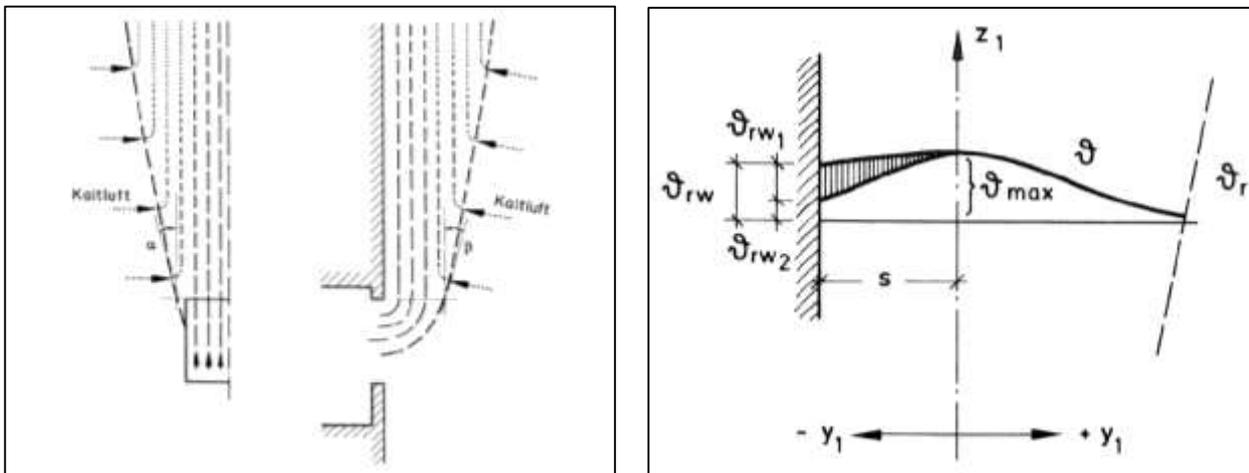


Abb. 6.12 (li.): Strömungsfeld des Heißgasstroms rechtwinkelig und parallel zur Fassade [12]

Abb. 6.13 (re.): Graphische Darstellung des Temperaturverlaufs [12]

Weiters konnte aus den Versuchsergebnissen auch die Ausbreitwinkel des Heißgasstroms α rechtwinkelig und β parallel zur Frontwand ermittelt werden. Es handelt sich dabei um Funktionen aus der Geometrie des Brandraumfensters und der Heißgastemperatur, für die folgenden Näherungsgleichungen gelten:

$$\alpha = k_1 \frac{2200 + \vartheta_{Go}}{\vartheta_{Go}} \quad [12]$$

$$\beta = k_2 \frac{2200 + \vartheta_{Go}}{\vartheta_{Go}} \quad [12]$$

Für etwa quadratische Fensteröffnungen gilt:

$$k_1 = 3,0$$

$$k_2 = 3,0$$

Der Abstand der Achse des Heißgasstroms ist entsprechend den Versuchsergebnissen näherungsweise proportional zur mittleren Ausströmgeschwindigkeit v_m . Es gilt:

$$s = 1,5 \frac{v_m}{g} \quad [12]$$

v_m ... Ausströmgeschwindigkeit [m/s]

g ... Erdbeschleunigung [m/s²]

Die Gültigkeit dieser Gleichung setzt Heißgastemperaturen $\vartheta_G > 600$ °C voraus.

Für das Temperatur- und Strömungsfeld des Prüfversuchs P1 ergibt sich durch Einsetzen in die zuvor angeführten Gleichungen folgende Geometrie des Heißgasstroms:

$$\alpha = 3,0 \frac{2200 + 1084}{1084} = 9,1^\circ$$

$$\beta = 3,0 \frac{2200 + 1084}{1084} = 9,1^\circ$$

$$s = 1,5 \frac{1,6}{9,81} = 0,25 \text{ m}$$

Anmerkung: Anstelle der Ermittlung der mittleren horizontalen Ausströmgeschwindigkeit nach Bernoulli wurde für v_M die Strömungsgeschwindigkeit, welche sich auf Grund des laut Norm vorgegebenen Luftvolumenstroms in der Brandkammer ergibt, herangezogen.

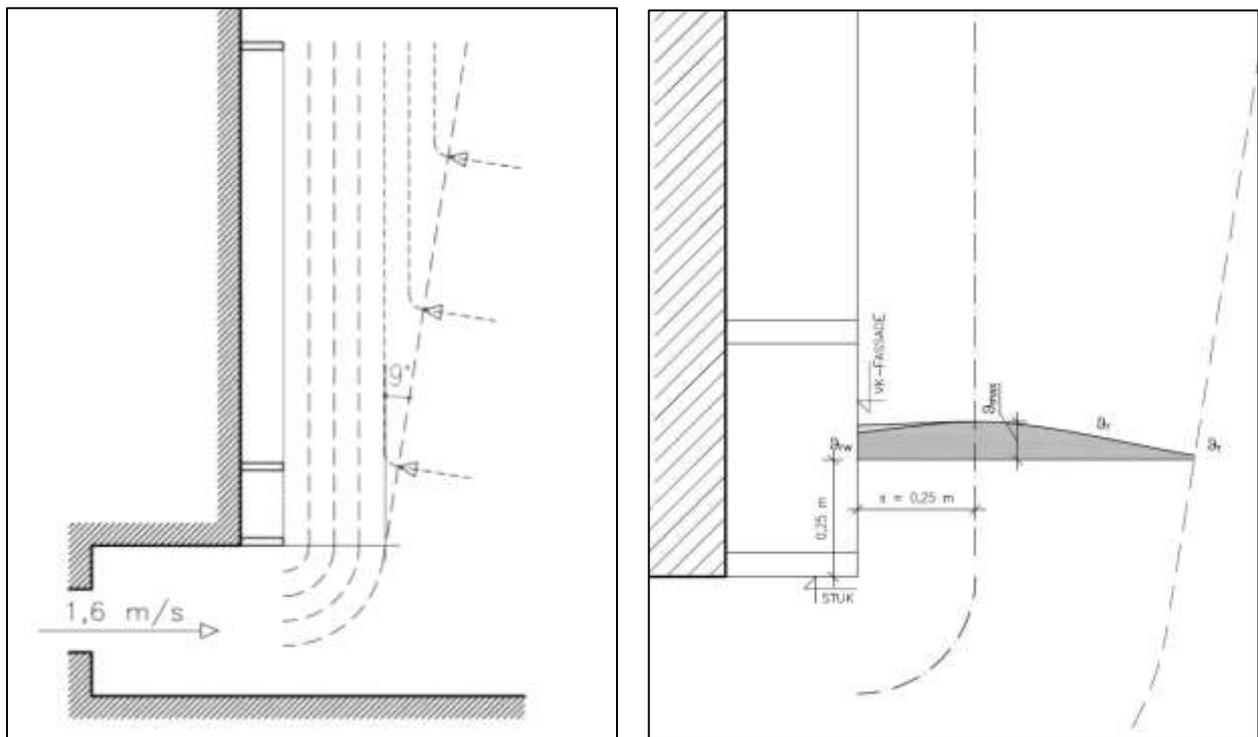


Abb. 6.14 (li.): Graphische Darstellung des Strömungsfelds des Heißgasstroms rechtwinklig zur Fassade P1 [eigene Darstellung]

Abb. 6.15 (re.): Graphische Darstellung der Achse des Heißgasstroms bei P1 [eigene Darstellung]

6.1.7 Beeinflussung des Temperatur- und Strömungsfelds durch Fensteröffnungen

Hinsichtlich der Beeinflussung des Temperatur- und Strömungsfelds durch Windeinflüsse wurde im Zuge der Lehrter Brandversuche vielfältige Situationen analysiert, auf die an dieser Stelle im Detail jedoch nicht weiter eingegangen wird. Die Situation eines über dem Brandraum liegenden Zimmers mit geöffneten Fenster erscheint jedoch im Zusammenhang mit den in dieser Forschungsarbeit durchgeführten Prüfversuchen von wesentlicher Bedeutung.

Es wurden zwei unterschiedliche Szenarien untersucht und ausgewertet. Bei dem ersten Fall befand sich über dem Brandraum ein offenes Fenster, und der daran anschließende Raum wies keine weiteren Öffnungen auf. Im zweiten Fall war die Fensteröffnung ebenfalls geöffnet, der anschließende Raum verfügte jedoch über zusätzliche Öffnungen (z.B. geöffnete Türen).

Im ersten Fall wurde das Temperatur- und Strömungsfeld über dem Brandraum nur leicht verändert. Die Achse des Heißgasstroms rückt im Bereich der Fensteröffnung näher an die Hauswand heran, da auf Grund der Saugwirkung der strömenden Heißgase im Zimmer über dem Brandraum ein Unterdruck entsteht. Mit zunehmender Höhe entfernt sich das Temperaturfeld jedoch wieder von der Aussenwand.

Im zweiten Fall entsteht im Fall von Windstille auf Grund der geöffneten Türen kein Unterdruck sondern eine Luftströmung in Richtung der Heißgase. Theoretisch müsste sich dann die Achse des Temperaturfeldes geringfügig vom Gebäude entfernen. Bei den Lehrter Versuchen war bei dieser Versuchsanordnung jedoch die Hauptkomponente des Windes rechtwinkelig auf die Frontwand gerichtet, wodurch eine Querlüftung entstand und Heißgase durch das geöffnete Fenster in den Raum strömten.

Die beiden unterschiedlichen Fälle sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

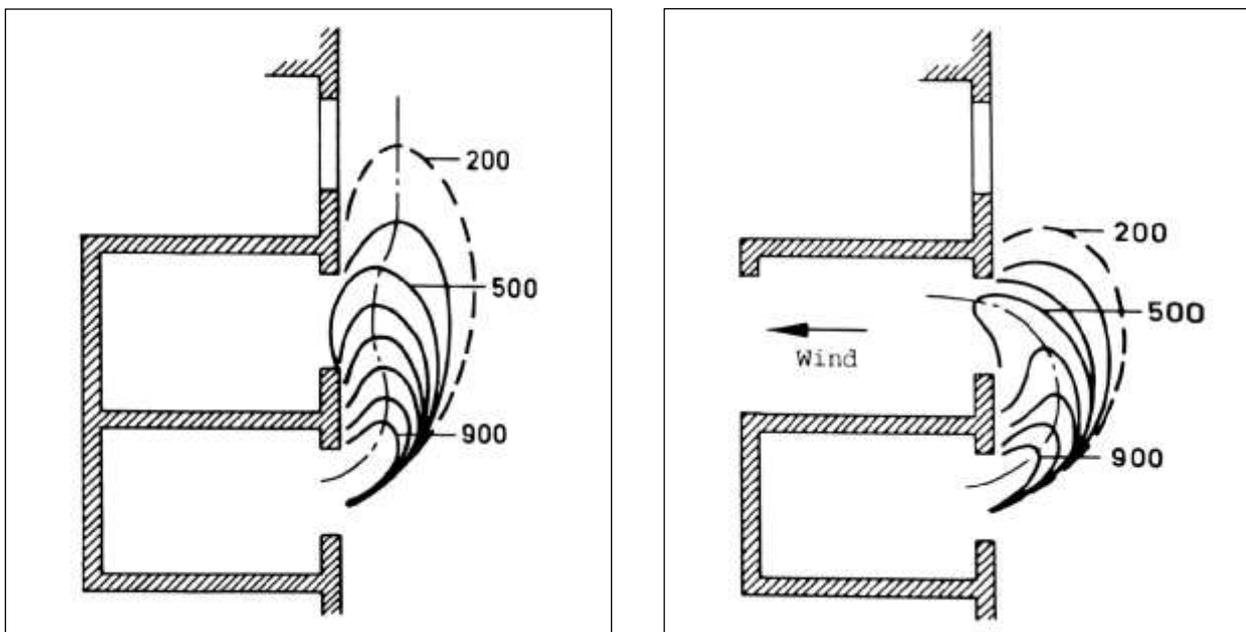


Abb. 6.16 (li.): Veränderung des Isothermenverlaufs durch einen geschlossenen Raum mit offenen Fenster [12]

Abb. 6.17 (re.): Veränderung des Isothermenverlaufs durch einen Raum mit offenen Fenster und Querlüfteinfluss [12]

6.1.8 Analogieschlüsse zur Beeinflussung des Temperatur- und Strömungsfelds durch Doppelfassaden

Wie zuvor angeführt, kommt es durch eine über dem Brandraum gelegenen Fensteröffnung eines anschließenden Raumes mit weiteren Öffnungen zu einer theoretischen Ablenkung des Heißgastrom von der Fassade auf Grund der Nachströmung und Einmischung von kälterer Luft aus dem Rauminnen (siehe Abb. 6.18).

Der Zwischenfassadenbereich von Doppelfassaden kann, sofern dieser über Zu- und Abluftöffnungen verfügt, analog zu der zuvor beschriebenen Situation als ein Raum mit Öffnungen über dem Brandraum betrachtet werden. Im Unterschied zu dem in den Lehrter Versuchen beschriebenen Fall verläuft die Strömung jedoch nicht parallel zur Geschoßdecke sondern in vertikaler Richtung.

Durch die Ausbreitung des Heißgasstroms im Fassadenbereich gelangen Heißgase auch durch die untere Öffnung in den Zwischenfassadenbereich (ZFR). Im Unterschied zu dem in den Lehrter Versuchen Fall eines Raums mit Querdurchströmung kommt es jedoch auf Grund des Auftriebs der Heißgasstroms zu einer vertikalen Durchströmung ohne Nachströmung durch die obere Öffnung des ZFR. (siehe Abb. 6.19).

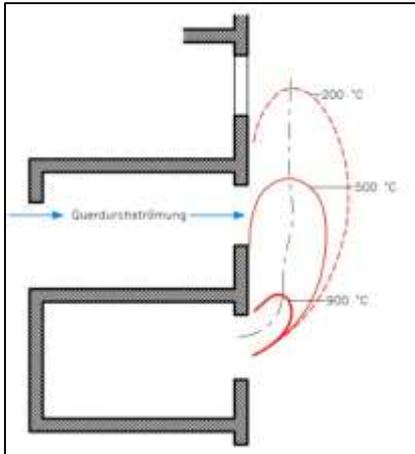


Abb. 6.18: Veränderung des Isothermenverlaufs durch einen Raum mit Querdurchströmung [eigene Darstellung nach [12]]

Solange die beiden Fassadenebenen der Doppelfassade noch nicht durch die Brandeinwirkung zerstört sind und der vertikale Raumabschluß des ZFR noch erhalten ist, kann es zu keiner Kaltlufteinmischung in diesem Bereich kommen. Diese Kanalisierung führt zu einem Anstieg der Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit im ZFR, der auch als „Kamineffekt“ bezeichnet wird. Die Achse des Heißgasstroms wird dadurch näher zur Gebäudefront abgelenkt und liegt bei fortgeschrittenem Brand im ZFR.

Diese Verschiebung des Heißgasstroms führt je nach Ausführungsart der beiden Fassadenebenen der Doppelfassade nach einer gewissen Zeit entweder zum Versagen bzw. Abfallen der äußeren Fassadenebene oder zum Raumverlust der inneren Ebene. In beiden Fällen kommt es zur Einmischung von kälterer Luft und dadurch zu einer Verringerung der Temperatur und der Strömungsgeschwindigkeit in dem darüber liegenden, noch intakten Bereich des ZFR.

Mit fortschreitender Zerstörung einer der beiden Fassadenebenen nimmt die Kanalisierung der Heißgasströme im Bereich der ZFR wieder ab, bis sich ein Temperatur- und Strömungsverlauf wie bei einem Brand vor einer einschaligen Fassade eingestellt hat. (siehe Abb. 6.19).

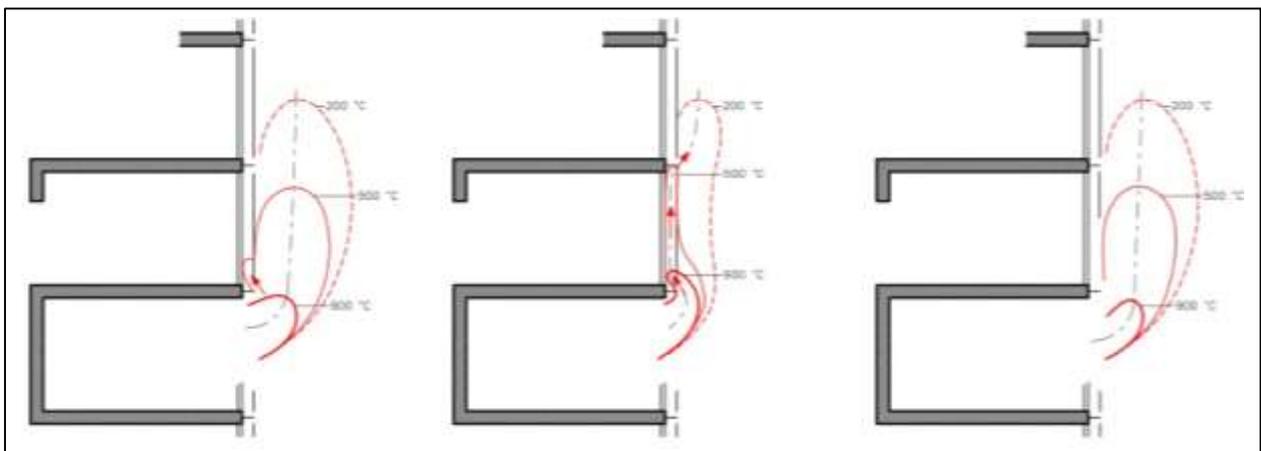


Abb. 6.19: Veränderung des Isothermenverlaufs durch den Zwischenfassadenbereich einer Doppelfassade [eigene Darstellung nach [12]]

6.2 Brandversuche in Merkers

6.2.1 Originalbrandversuche in der Prüfhalle

Vor Durchführung der Naturbrandversuche an einem Gebäude in Merkers wurden in der Prüfhalle der MFPA Leipzig originalmaßstäbliche Brandversuche an einem mehrgeschoßigen Prüfstand mit unterschiedlichen vorgehängten Fassaden in Holzbauweise durchgeführt, um einen Nachweis hinsichtlich der in Abschnitt 4 beschriebenen Schutzziele für Deutschland und die Schweiz zu erhalten.

Der Versuchsaufbau dieser Originalbrandversuche stellt den Flammenaustritt bei einer Fensteröffnung eines dahinterliegenden Raums mit Vollbrand dar. Als Brandlast diente eine 50 kg Holzkippe in der Brandkammer, welche durch einen Luftvolumenstrom so kalibriert wurde, dass ein für einen Raumbrand typischer Flammenaustritt abgebildet wurde. [4], [29]

Der Nachweis der Schutzziele erfolgte anhand folgender Kriterien:

- kein selbstständiges Brennen der Holzfassade im dritten Geschoß über der Brandausbruchsstelle
- nach einer Zeit von 15 Minuten werden Brandlast und brennende Fassadenbereiche gelöscht
- größere Teile der Fassade (Außenwandbekleidung) dürfen nicht herabfallen

Die schematische Versuchsanordnung der Versuchsanordnung ist in der folgenden Abbildung ersichtlich.

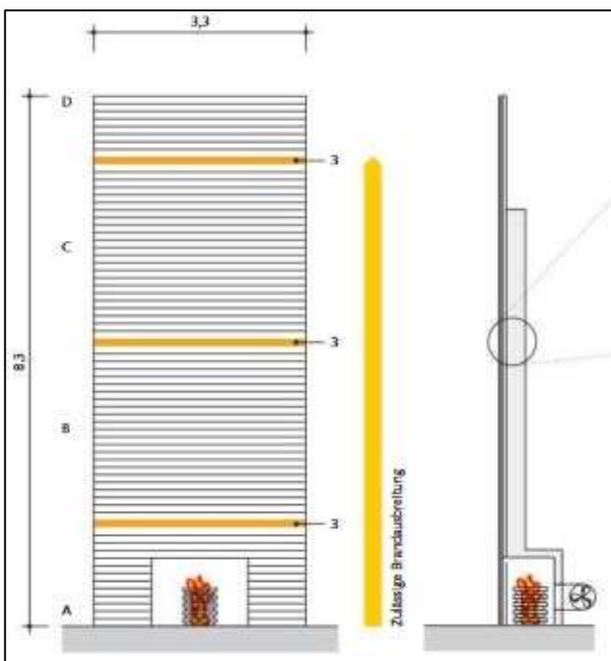


Abb. 6.20: schematische Ansicht und Schnitt des Prüfaufbaus [4]

6.2.2 Naturbrandversuche

Zur Validierung der Ergebnisse aus den in der Prüfhalle durchgeführten Brandversuchen wurden in weiterer Folge sechs Naturbrandversuche durchgeführt. Die Versuche erfolgten zum Teil auch mit einer höheren Brandbeanspruchung in Form von zwei zeitgleichen Raumbränden mit nebeneinander liegenden Fensteröffnungen und der Simulation einer Querlüftung durch im Gebäude situierte Ventilatoren. Als Brandlast wurden wiederum Holzkippen verwendet – die Brandlastdichte betrug $800 - 850 \text{ MJ/m}^2$ in den Brandräumen (siehe Abb. 6.22).

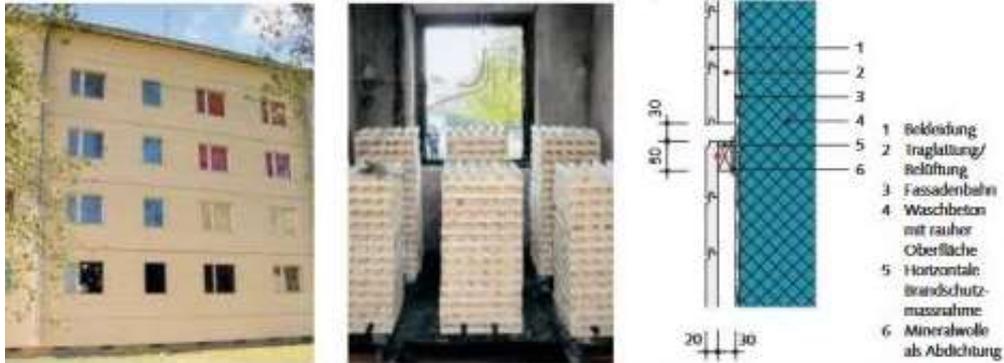


Abb. 6.21 (li.): Fassade vor dem Brandversuch [4]

Abb. 6.22 (mi): Brandraum mit Holzrippen [4]

Abb. 6.23 (re.): Detail der Fassadenkonstruktion [4]

Die folgenden Abbildungen zeigen einige Sequenzen des Ablaufs eines Naturbrandversuchs:

1. 7. Prüfminute: Durchzündung
2. 11. Prüfminute: Entflammung der Fassade, Oberflächenflash, Schocklüftung
3. 12. Prüfminute: nur lokales Brennen
4. 26. Prüfminute: lokales Brennen
5. 32. Prüfminute
6. 60. Prüfminute: Schädigung ohne Löschen

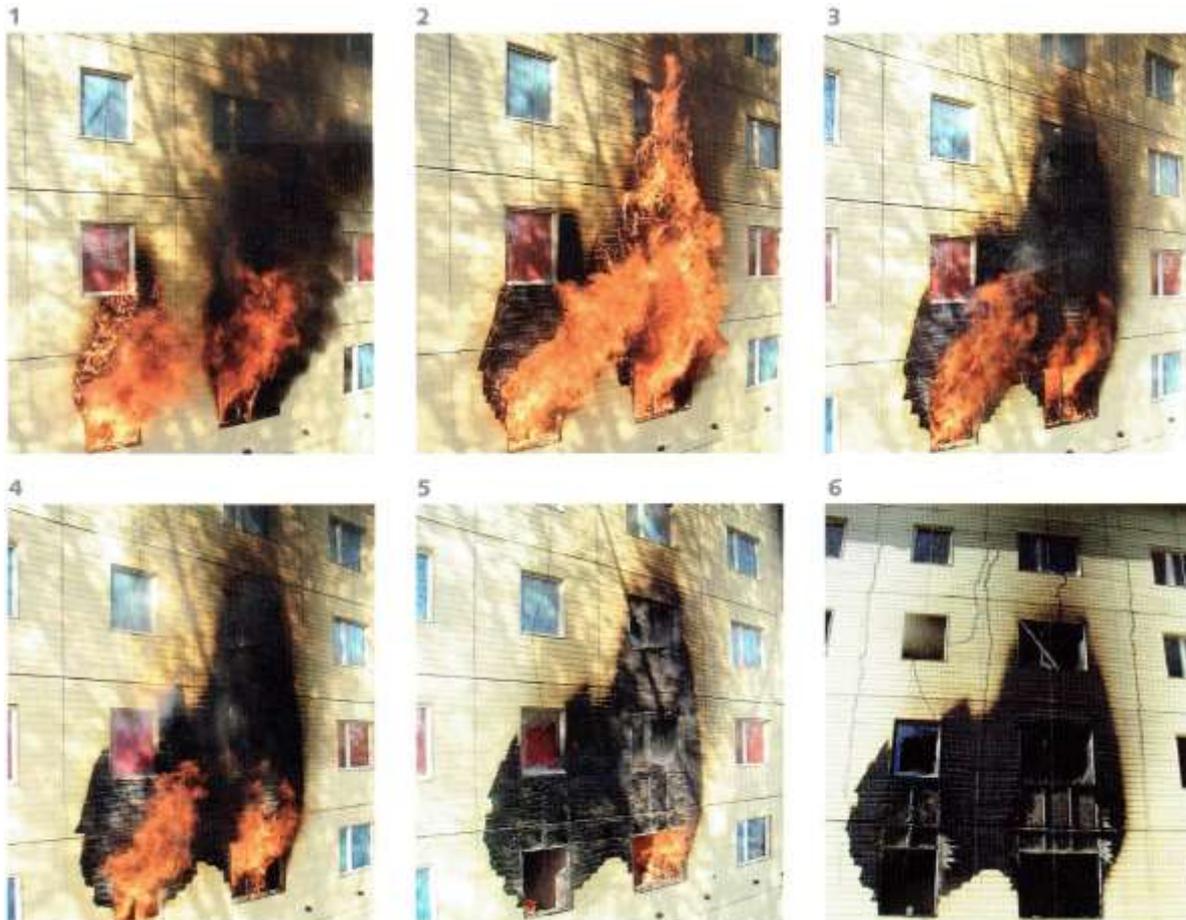


Abb. 6.24 bis 6.29.: Verlauf eines Brandversuchs mit zwei benachbarten Räumen in Vollbrand [4]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall

Durch die Naturbrandversuche konnte nachgewiesen werden, dass die Prüfanordnung der zuvor durchgeführten Originalbrandversuche auf reale Gegebenheiten übertragbar sind. Außerdem konnte die Funktionstüchtigkeit der für die vorgehängten Holzfassaden festgelegten Brandschutzmaßnahmen bestätigt werden.

6.2.3 Analogieschlüsse zu den Prüfversuchen mit Holz-Glas-Fassaden

Eine direkte Vergleichbarkeit der Naturbrandversuche von Merkers mit den im Zuge dieser Forschungsarbeit durchgeführten Fassadenbrandversuchen ist auf Grund der unterschiedlichen Fassadenkonstruktionen (vorgehängte Holzfassaden bzw. Holz-Glas-Kastendoppelfassaden) schwer möglich.

Bei der Analyse der Versuchsparameter des Prüfaufbaus in der Prüfhalle der MFPA Leipzig und der Prüfanordnung des Prüfversuch P1 in der Prüfhalle der MA 39 können folgende Übereinstimmungen bzw. Abweichungen festgestellt werden:

Merkmale	Prüfanordnung Merkers	Prüfanordnung P1
Brandlast: 50 kg Holzkrippe	●	●
Brandkammer mit rückwärtiger Ventilation	●	●
Fassadentyp: vorgehängte Holzfassade	●	
Fassadentyp: Holz-Glas-Doppelfassade		●
Prüffassade in Flächenanordnung	●	
Prüffassade in Eckanordnung		●
Höhe der Prüffassade	2,5 Geschoße	1 Geschoß
Schutzziel: Verhinderung der Brandweiterleitung	auf das 3. Geschoß	im Zwischenraum
Schutzziel: keine Herabfallen von großen Teilen	●	●
Prüfdauer	15 bis 20 min	30 min

Abb. 6.30: Tabellarische Darstellung der Prüfanordnung in Merkers mit dem Prüfversuch P1 [eigene Darstellung]

Anhand dieser Gegenüberstellung kann zusammenfassend Folgendes festgestellt werden: Da in Merkers durch die Naturbrandversuche eine Validierung der Prüfanordnung der Originalbrandversuche erfolgte und die Prüfanordnung von der Fassadenprüfversuch P1 trotz einiger Abweichungen mit dem Prüfanordnung der Originalbrandversuche von Merkers einige übereinstimmende Merkmale aufweist, kann daher bei der Prüfanordnung P1 mit Holz-Glas-Doppelfassaden von einer Übertragbarkeit der Prüfergebnisse auf reale Gegebenheiten und somit von einer Plausibilität der Laborversuche ausgegangen werden.

7 Prototypische Fassadenanwendungen für mehrgeschoßige Gebäude

An dieser Stelle soll anhand einiger prototypischer Beispiele die Anwendbarkeit von Holz-Glas-Fassaden bei mehrgeschoßigen Gebäuden aufgezeigt werden. Folgende grundlegende Überlegungen liegen den in diesem Abschnitt dargestellten Lösungsansätzen zugrunde:

Transparente Architektur im modernen Bürobau

Die Nutzung eines Gebäudes ist zumeist an der Art der Fassadengestaltung ablesbar. Im mehrgeschoßigen Wohnbau überwiegen Bauwerke mit Lochfassaden (Außenwände mit WDVS oder vorgehängten Fassaden), die einerseits das überwiegende Bedürfnis der Bewohner nach Privatheit widerspiegeln und sich andererseits in dem engen Kostenrahmen des geförderten Wohnbaus zumeist kostengünstiger realisieren lassen. Außerdem können Niedrigenergie- und Passivhausstandards mit hochwärmedämmten Außenwänden mit einem geringen Verglasungsanteil zumeist ökonomischer umgesetzt werden.

Die Ausbildung transparenter Fassaden mit raumhohen Verglasungen erfolgt überwiegend bei Büro- und Verwaltungsgebäuden. Sichtbeziehungen und natürlicher Lichteinfall stellen Grundanforderungen eines zeitgemäßen Arbeitsplatzes dar, und eine lichtdurchlässige Gebäudehülle wird zumeist auch als Symbol einer modernen und transparenten Unternehmenskultur verstanden. Je nach Gebäudestruktur und Klimakonzept des Bauwerks kommen häufig Curtain-Wall- oder Doppelfassaden zum Einsatz. Dem Anspruch an eine möglichst große Flexibilität der Arbeitsräume wird dabei im Fassadenbereich üblicherweise durch einen modularen Fassadenraster entsprochen. Dadurch ist die Ausbildung unterschiedlicher Wandanschlüsse an die Fassade und damit auch die Herstellung variabler Raumkonfigurationen möglich.



Abb. 7.1 (li.): Passivwohnhaus Samer Mösl, Salzburg, Architektur: Sps-Architekten [<http://www.sps-architekten.com>, 170812]



Abb. 7.2 (re.): Erste Campus, Wien, Architektur: Henke Schreieck [W13]

Transparente Fassaden erfordern jedoch auf Grund hoher Lichttransmission zwingend die Ausführung eines wirksamen Sonnenschutzes, um Überhitzung und Blendung im Arbeitsplatzbereich zu verhindern. Eine dafür geeignete Art der Fassadenausbildung stellen Doppelfassaden dar, bei denen ein kombinierter Sonnen- und Blendschutz im Zwischenfassadenbereich integriert wird und dadurch auch bei mehrgeschoßigen Gebäuden unabhängig von den Windverhältnissen an der Außenfassade ständig wirksam ist.

Der überwiegende Anwendungsbereich von geklebten Holz-Glas-Doppelfassaden liegt aus Sicht des Autors daher vorrangig bei Büro- und Verwaltungsgebäuden. Weiters können auch bei Schulgebäuden und Produktionsstätten unter Umständen geeignete Anwendungsbereiche des entwickelten Fassadensystems bestehen. Bei den folgenden prototypischen Anwendungen werden daher insbesondere diese Gebäudenutzungen untersucht.

Gebäudesanierung mit modularen Fassadenelementen

Bestehende Bauten aus der Zeit zwischen 1950 bis 1975 weisen insbesondere hinsichtlich des Schall- und Wärmeschutzes im Vergleich zu aktuellen Standards sehr schlechte Kennzahlen auf. Vor dem Hintergrund notwendiger Ressourceneinsparung und Energieeffizienz – insbesondere auch bei Bestandsgebäuden – kann eine thermische Sanierung solcher Objekte zu einer wesentlichen Verbesserung der Energiekennzahl und damit zu einer deutlichen Reduktion des Heiz- und Kühlbedarfs führen. Auch die Verlängerung der Nutzungsdauer von bestehenden Gebäudestrukturen kann bei einer vergleichenden Lebenszyklusanalyse gegenüber einem Abriss und Neubau positiv bilanziert werden.

Mehrgeschoßige Gebäude aus der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden überwiegend als Stahlbetonskelettbauten errichtet. Die Gebäudestruktur folgt zumeist einer funktionalen Logik, welche sowohl am Raster des Tragwerks als auch am Fassadenraster ablesbar ist. Fassaden von Bürogebäuden aus dieser Zeit wurden vorwiegend als Brüstungsfassaden mit Fensterbändern oder als Curtain-Wall-Fassaden ausgeführt.



Abb. 7.3 (li.): Universität für angewandte Kunst, Wien [Fotografie des Autors]

Abb. 7.4 (re.): Fassade der australischen und neuseeländischen Botschaft, Wien [Fotografie des Autors]

Bei einer thermischen Sanierung solcher Gebäude sind geklebte Holz-Glas-Fassaden, insbesondere in der Bauart von Holz-Glas-Doppelfassaden, aus den folgenden Gründen besonders gut geeignet:

- Die Fassadenelemente verfügen auf Grund des Holzrahmens und der Bauweise in Verbindung mit einer Dreischeiben-Isolierverglasung über sehr niedrige Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von ungefähr $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Die Modularität der Fassadenelemente ermöglicht die Anpassung an unterschiedliche Konstruktionsraster bestehender Tragstrukturen bei gleichzeitiger Flexibilität der inneren Raumkonfiguration
- Durch den hohen Vorfertigungsgrad und die effiziente Montage der Fassadenelemente ist auch bei innerstädtischen Objekten eine Sanierung großer Fassadenflächen in sehr kurzer Bauzeit möglich
- Bestehende Gebäude können durch den Einsatz von geklebten Holz-Glas-Doppelfassaden in brandschutztechnischer Hinsicht verbessert werden, da diese Fassadenelemente das Schutzziel der Begrenzung einer vertikalen Brandausbreitung in Brüstungsbereich für einen Zeitraum von 30 Minuten sowie des Schutzziels der Verhinderung des Herabfallens großer Teile nachweislich erfüllen.

Wiederentdeckung des Holzbaus im urbanen Raum

Die technische Weiterentwicklung im Holzbau durch neue Konstruktionswerkstoffe, Verbindungsmittel und Verleimungstechniken führten in Verbindung mit Kombinationen mit anderen Werkstoffen seit Beginn des 21. Jahrhunderts zu einer stetigen Verschiebung der maximal möglichen Gebäudehöhe von Hochbauten in Holz- und Holzmischbauweise. [15]



Abb. 7.5: Weiterentwicklung Holzhochhäuser seit 2008 [15]

Die wachsende Akzeptanz des mehrgeschoßigen Holzbaus im städtischen Bereich ist auch mit einer sukzessiven Novellierung der baurechtlichen und brandschutztechnischen Bestimmungen, welche im vorhergehenden Jahrhundert in den meisten europäischen Ländern noch von einer allgemeinen Grundangst vor unkontrollierbaren Großbränden bei Holzbauten geprägt waren, verbunden. Erste Musterprojekte von Hochhäusern in Holzbauweise stehen aber auch in direktem Zusammenhang mit modernen Entwicklungen im Bereich des baulichen, anlagentechnischen und des abwehrenden Brandschutzes. Aktuelle Projekte von Holzhochhäusern mit bis zu 84 m Höhe sind nur in Verbindung mit speziell darauf ausgelegten automatischen Löschanlagen mit einem für Hochhäuser erforderlichen Schutzniveau möglich.

Bei der Gestaltung dieser Holzhochhäuser besteht oftmals auch das Bestreben, den Werkstoff Holz an der Fassade ablesbar zu machen und damit ein Zeichen für eine zeitgemäße und nachhaltige Bauweise in der Öffentlichkeit zu setzen (z.B. „Leuchtturmprojekt Hoho“ in der Seestad Aspern, Wien). In vielen europäischen Ländern sind im Fassadenbereich jedoch ausschließlich nichtbrennbare Baustoffe für Gebäude über der Hochhausgrenze zugelassen, da im Bereich der Gebäudeaußenwand das Schutzziel der Verhinderung einer Brandweiterleitung auf Grund der Gebäudehöhe von wesentlicher Bedeutung ist. Fassadenanwendungen in Holz sind nur im Einzelfall in Verbindung mit objektspezifischen Kompensationsmaßnahmen und einem Brandschutzkonzept möglich.



Abb. 7.6 (li.): Visualisierung Holzhochhaus „Hoho“, Wien, Architektur: Rüdiger Lainer [www.minc.az, 170813]

Abb. 7.7 (re.): Montage der Fassadenelemente, Brock Commons, Vancouver, Architektur: Acton Ostry [www.actonostry.ca_170813]

Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen werden nun drei prototypische Anwendungen von Holz-Glas-Doppelfassaden bei mehrgeschoßigen Gebäuden vorgestellt.

7.1 Typ A: Modularer Holzbau mit aussteifender Fassade

7.1.1 Projektbeschreibung

Das Gebäude ist ein freistehender Solitär mit einem quaderförmigen Baukörper und einem annähernd quadratischen Grundriss. Das Objekt ist für die Nutzung als Büro- bzw. Verwaltungsgebäude konzipiert. Es weist vier oberirdische Geschoße auf und verfügt über kein Untergeschoß. Die Gebäudeabmessungen betragen ca. 16,5 m x 16,1 m, die Gebäudehöhe beträgt ca. +13,15 m. Die Fußbodenoberkante im 3. Obergeschoß liegt auf ca. +9,75, daher wird das Objekt in die Gebäudeklasse 4 gemäß OIB Richtlinie 2 eingestuft. Das Objekt verfügt über keinen innenliegenden Aufzugs- und Treppenhauskern – die Erschließung bzw. Entfluchtung erfolgt über eine Außentreppe.



Abb. 7.8: Fotomontage Typ A [eigene Darstellung auf Grundlage des Bürogebäude Fellbach aus [33]]

7.1.2 Übersichtspläne Regelgeschoß und Schnitt

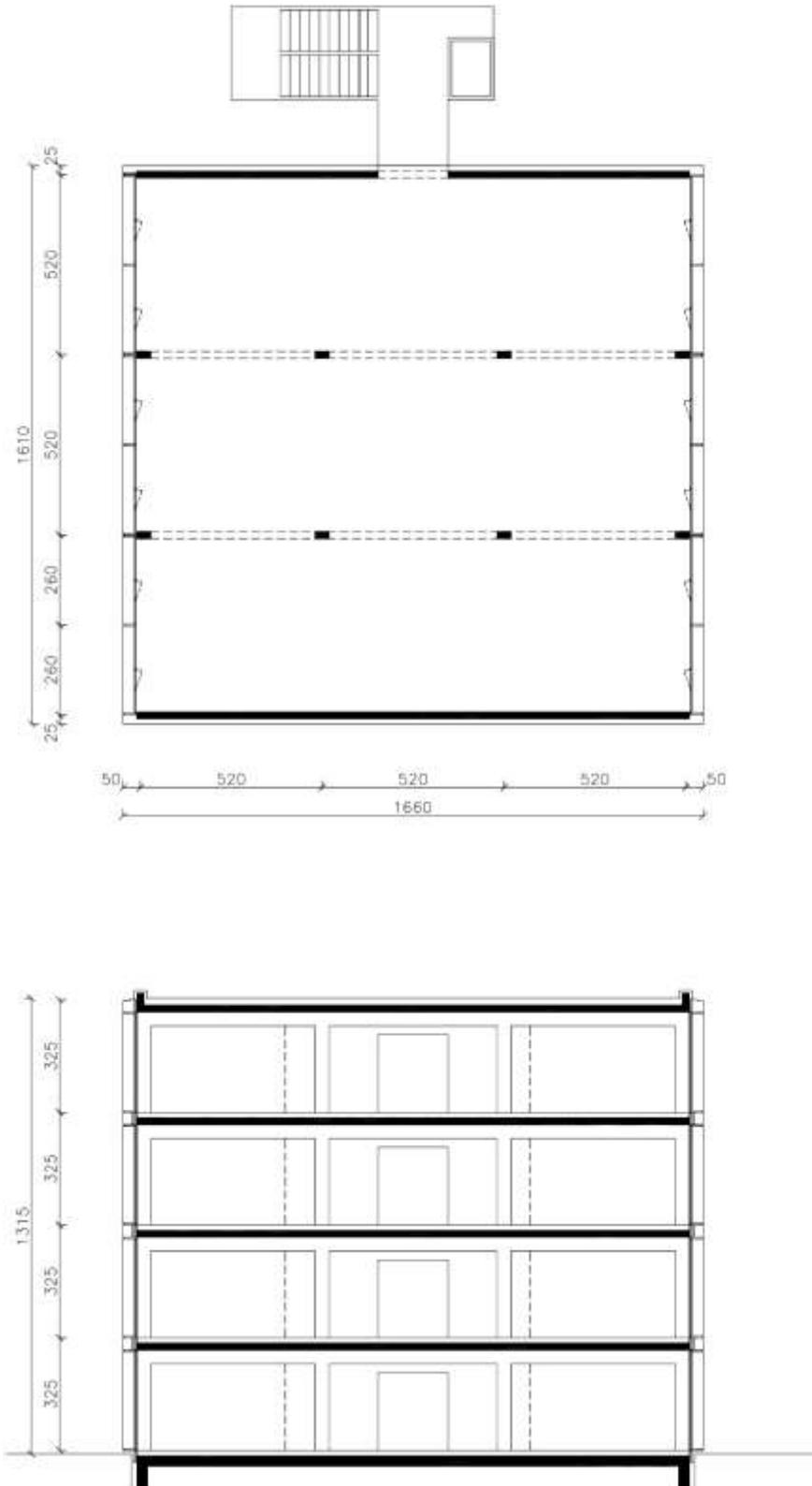


Abb. 7.9: Grundriss und Schnitt [eigene Darstellung]

7.1.3 Tragkonstruktion und Bauweise

Die Fundierung erfolgt mit einer Stahlbetonbodenplatte. Darüber wird die Tragstruktur in Holzbauweise errichtet. Der Hauptraster der Wandscheiben und Stützen beträgt 5,2 m. Die Wand- und Deckenelemente werden aus CLT-Platten mit einer maximalen Länge von 16 m hergestellt. Die Gebäudeaussteifung erfolgt über die Wand- und Deckenscheiben sowie über die geklebten Holz-Glas-Fassaden. Es werden Holz-Glas-Doppelfassaden mit einer Elementbreite von 5,2 m, einer Höhe von 3,25 m und einem Ausbauraster von 1,3 m eingesetzt. Die Außentreppe und der Aufzugsschacht sind als Stahlkonstruktion konzipiert.

Sämtliche Holzbauteile und sowie die Fassadenelemente werden vorgefertigt auf die Baustelle geliefert. Das Versetzen und die Montage erfolgt geschoßweise wie in den folgenden Schemazeichnungen dargestellt.

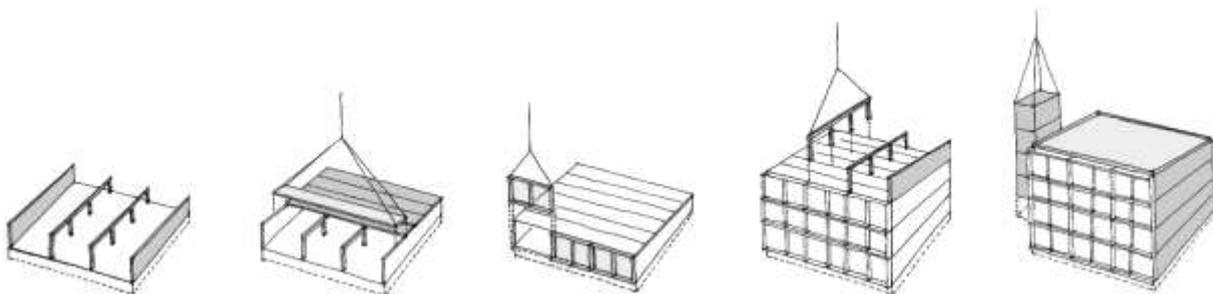


Abb. 7.10: Schematische Darstellung des Bauablaufs [eigene Darstellung]

7.1.4 Gebäudeaussteifung mit geklebten Holz-Glas-Fassaden

Insbesondere bei mehrgeschoßigen Holzbauten, die gegenüber Gebäuden mit einer Tragkonstruktion aus Stahlbeton über geringere Steifigkeiten verfügen, sind Holz-Glas-Fassadenelemente auch als statisch wirksame Bestandteile der Gebäudeaussteifung geeignet.

Da dieses prototypische Gebäude über keinen innenliegenden Erschließungskern verfügt, erfolgt die Aussteifung der Tragkonstruktion ausschließlich durch die schubsteifen Wand- und Deckenscheiben bzw. durch den Holz-Glas-Verbund der inneren Fassadenebene.

Anhand von Fallstudien wurde im Zuge des HGV-Forschungsprojektes [1] aufgezeigt, dass bei einer geeigneten Wahl der Gebäudegeometrie und der Tragkonstruktion eine Aussteifung von mehrgeschoßigen Gebäuden ausschließlich mit Holz-Glas-Verbundbauweise möglich wäre:

„Die einwirkenden Lasten wurden gemäß ÖNORM EN 1991 für Wind und ÖNORM EN 1998 für Erdbeben gewählt. Die Varianten „Stahlbeton“ und „Holz“ unterscheiden sich lediglich im Eigengewicht der Tragkonstruktion, wobei hier für die Stahlbetondecke der Wert $g=6,25 \text{ kN/m}^2$ und für die Massivholzdecke der Wert $g=1,00 \text{ kN/m}^2$ gewählt wurden. Der Deckenaufbau betrug jeweils $2,00 \text{ kN/m}^2$. Zusätzlich wurde noch die Nutzlast auf Grund der Nutzung als Bürogebäude mit $q=3,00 \text{ kN/m}^2$ angesetzt. Für Wind und Erbeben wurden die maßgebenden, in Wien auftretenden Werte angenommen. Die Berechnungen auf Basis der beschriebenen Grundlagen zeigen, dass ein Holzskelettbau bei Einhaltung aller Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitskriterien mit den vorhandenen Mitteln bei beliebiger Geometrie des Grundrisses bis zu zwei Geschossen rein durch HGV-Elemente ausgesteift werden kann. Bei drei Geschossen ist lediglich noch ein Seitenverhältnis von Gebäudebreite zu -länge von 1:1 zulässig. Für komplexere Geometrien und eine größere Geschößanzahl wäre eine erhöhte Tragfähigkeit notwendig, welche durch eine verbesserte Konzeption der Einzelelemente und des Verbandes bis zu vier Geschossen durchaus im Bereich des Möglichen liegt.“

7.1.5 Brandschutztechnische Abweichungen bei Verwendung geklebter Holz-Glas-Fassaden

Bei HGV-Anwendungen von Gebäuden ohne aussteifenden Kern muss die Wirksamkeit der Aussteifung über die Fassadenebene im Brandfall zumindest in reduziertem Ausmaß erhalten bleiben. Eine Trennung der Geschoßflächen durch brandabschnittsbildende Bauteile oder eine kleinzellige Bauweise ist im Hinblick auf die Wirksamkeit der Gesamtaussteifung unbedingt erforderlich, um die Wirksamkeit der aussteifenden Fassade in dem nicht vom Brand betroffenen Brandabschnitt aufrecht zu erhalten.

Im Fall einer geschoßweisen Brandabschnittsbildung muss im Brandfall von einem Versagen der Aussteifung an allen Fassadenfronten ausgegangen werden. Bei Gesamtausfall aller HGV-Fassaden im Brandgeschoß werden jedoch auch die über dem Brandgeschoß gelegenen Fassaden statisch unwirksam, auch wenn diese durch den Brand unbeschädigt bleiben, wie in den folgenden Schemazeichnungen dargestellt ist:

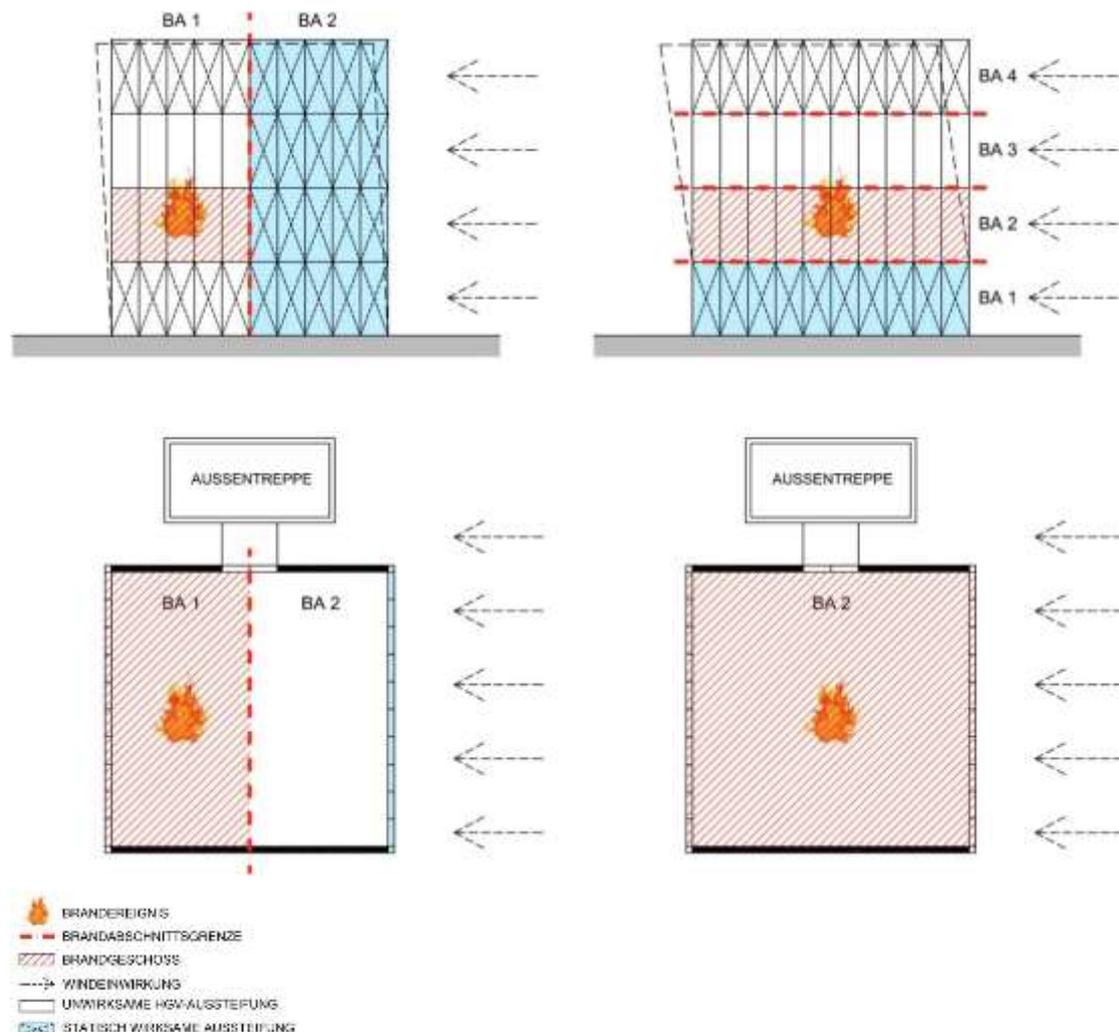


Abb. 7.11: Schematische Darstellung des Einflusses der Brandabschnittsbildung auf die Gebäudeaussteifung [eigene Darstellung]

Bei dem prototypischen Gebäudetyp A mit aussteifender Holz-Glas-Fassade liegt auf Grund der Verwendung von Fassadenelementen ohne definierten Feuerwiderstand im Hinblick auf die Anforderung der OIB Richtlinie 2 eine Abweichung vor, da aussteifende Bauteile den gleichen Feuerwiderstand wie die die Tragkonstruktion (in diesem Fall mindesten R 60) aufweisen müssen.

7.2 Typ B: Revitalisierung eines Bürogebäudes

Anhand eines Bestandsgebäudes am Schwedenplatz im 1. Wiener Gemeindebezirk soll nachfolgend das Potential von modularen Holz-Glasfassaden für thermische Gebäudesanierungen exemplarisch dargestellt werden.

Der Schwedenplatz ist ein zentraler Verkehrsknotenpunkt und wird einerseits durch den Donaukanal und andererseits durch die Bebauung der Inneren Stadt begrenzt. Im Laufe der Geschichte war dieser ehemals auch als Kaiser-Ferdinands-Platz bezeichnete Stadtraum vielfältigen Veränderungen unterworfen und wurde im 2. Weltkrieg stark zerstört. Die letzte wesentliche Umgestaltung des Schwedenplatzes erfolgte im Jahr 1978. In den letzten Jahren ist ein wachsendes öffentliches Interesse an einer Neugestaltung, welches sich anhand von Ausstellungen und Planungswettbewerben manifestiert, zu erkennen. [W12]

Aus dem Planungswettbewerb von 2016 ging der Entwurf der Landschaftsplaner Realgrün als Siegerprojekt hervor. Die Realisierung ist etappenweise geplant und soll ab 2018 erfolgen. Die wesentlichen Inhalte des Wettbewerbsentwurfs werden von den Planern wie folgt formuliert:

„Im Verständnis des ‚Leitbildes Schwedenplatz‘ – einer gesamthaften Erlebbarkeit des Platzraumes – werden die Teilbereiche Schweden-, Morzin- und Hotelvorplatz durch präzise freiraumplanerische Gestaltungsinterventionen unter Wahrung und Weiterentwicklung der differenzierten Nutzungsspektren neu definiert und in eine neue signifikante Beziehung zum übergeordneten innerstädtischen Flussraum des Donaukanals gesetzt. Gegebene funktionale und gestalterische Defizite werden beseitigt. Hierzu trägt in besonderer Weise der platzübergreifende lichte Baumfilter aus Gingkobäumen entlang des Franz-Josefs-Kais und die neue grüne Stadtkante bei. Stadtgarten, Transitraum, Ruhebereich, Gedenkort und der alle Teilbereiche verbindende Boulevard sind weitere identitätsstiftende Bausteine, welche zu einer schlüssigen Gesamtkomposition im übergeordneten städtebaulich freiraumplanerischen Kontext führen. Die bestehende, sehr unaufgeräumt wirkende Raumsituation mit ihren vielen Aufbauten, Ausstattungselementen, ‚Ecken und Winkeln‘ wird beruhigt. Ziel dabei ist es, den Grünflächenanteil zu maximieren, Übersicht und Transparenz gezielt zu stärken, Angsträume zu vermeiden und eine deutlich verbesserte Aufenthaltsqualität zu schaffen.“ [W4]



Abb. 7.13: Lageplan Neugestaltung Schwedenplatz-Morzinplatz mit roter Kennzeichnung des für die Revitalisierung ausgewählten Objektes, Entwurf: Realgrün [W4]

7.2.1 Beschreibung des Sanierungsobjektes

Das im Zuge dieser Arbeit exemplarisch ausgewählte Objekt ist ein Eckgebäude am Laurenzerberg und dem Schwedenplatz. Es handelt sich um ein Gebäude aus der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, welches in Stahlbetonbauweise mit innenliegendem Stiegenhaus errichtet wurde. Die beiden Fassadenfronten sind durch horizontale Fensterbänder und eine vertikale Tragstruktur gegliedert. Im Erdgeschoß sind Verkaufsf lächen, in den acht Obergeschoßen überwiegend Büroflächen untergebracht. Da Fenster, Außenwände und Dachflächen nicht den aktuellen bauphysikalischen Standards entsprechen, stellt eine thermische Gebäudesanierung eine wesentliche Verbesserungsmaßnahme zur Reduktion des Heiz- und Kühlbedarfs dieses Objekts dar.

Aus architektonischer Sicht, würde eine Fassadensanierung dieses Gebäudes mit Holz-Glas-Fassadenelementen in Verbindung der geplanten Neugestaltung des Schwedenplatzes einen deutlichen Akzent für eine zeitgemäße Aufwertung dieses Stadtraums setzen und dadurch eventuell auch weitere Revitalisierungen ähnlicher Gebäuden in der Umgebung bewirken.



Abb 7.14.: Luftbild Schwedenplatz/Laurenzerberg [<http://www.skyscrapercity.com>, 17.08.2017]

7.2.2 Bauablauf Fassadensanierung

Insbesondere bei innerstädtischen Bauplätzen, wie auch bei der gegenständlichen Situation des gewählten Fallbeispiels, stellt die Baustelleneinrichtung und Abwicklung eine besondere logistische Herausforderung dar. Lager- und Manipulationsflächen sind in sehr geringen Ausmaß vorhanden, und die Verkehrs- und Parkplatzsituation darf durch die Bauführung nur geringfügig eingeschränkt werden. Aus diesem Grund stellt eine Fassadensanierung mit vorgefertigten Elementfassaden eine adäquate Maßnahme dar, um die Bauzeit vor Ort auf ein Mindestmaß zu reduzieren.

Der Bauablauf erfolgt in folgenden Schritten:

1. Abbruch der Brüstungen und Fenster
2. Montage der Fassadenelemente
3. Komplettierung der Lüftungsgitter und Anschlüsse

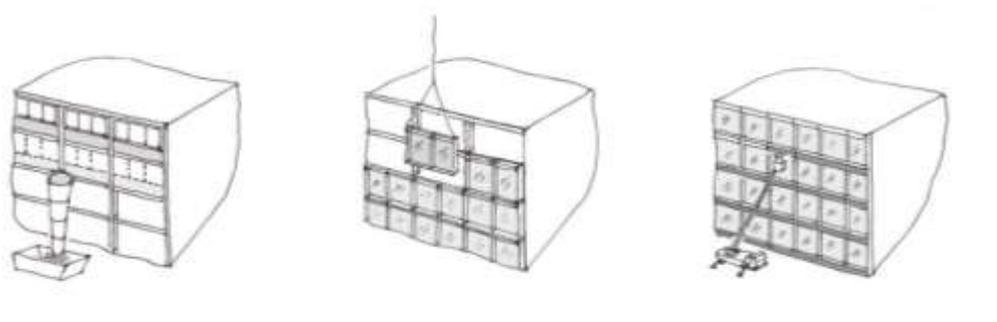


Abb. 7.15: Schematische Darstellung des Ablaufs der Fassadensanierung [eigene Darstellung]

7.2.3 Bauphysikalische Kennwerte der Holz-Glas-Fassade

Die bestehende Fassade des Referenzobjektes wird aus massiven Brüstungselementen, Stahlbetonstützen und Fensterelementen gebildet. Ohne den konstruktiven Aufbau und den gegenwärtigen Zustand dieser Bauteile genauer zu analysieren, kann man überschlagsmäßig von einem Wärmedurchgangskoeffizienten von mindestens $3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ausgehen.

Die folgende beispielhafte Berechnung soll das Potential einer bauphysikalischen Optimierung des Gebäudes durch eine Fassadensanierung mit geklebter Holz-Glas-Fassade aufzeigen. Die Berechnung des Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten eines Fassadenelements erfolgt gemäß folgender Formel:

$$U_F = (A_g \times U_g + A_R \times U_R + U \times \psi) / (A_g + A_R) \quad [32]$$

dabei sind

A_g ... Verglasungsfläche (m^2)

A_R ... Rahmenfläche (m^2)

U ... Umfang der Verglasungsfläche (m)

U_g ... U-Wert der Scheibenmitte ($\text{W/m}^2\text{K}$)

U_R ... U-Wert des Rahmens ($\text{W/m}^2\text{K}$)

ψ ... linearer Wärmedurchlasskoeffizient (W/mK) des Randverbundes

Kennwerte eines geklebten Holz-Glas-Fassadenelements mit dreischeiben Isolierverglasung:

$$A_g = 6,5 \text{ m}^2$$

$$A_R = 0,6 \text{ m}^2$$

$$U = 17,2 \text{ m}$$

$$U_g = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_R = 2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\psi = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Durch Einsetzen dieser Werte in die Formel ergibt sich der Gesamtwärmedurchgangswiderstand:

$$U_F = (6,5 \times 0,7 + 0,6 \times 2,1 + 17,2 \times 0,3)/(6,5 + 0,6) = \mathbf{1,54 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Es ist dadurch ersichtlich, dass es durch die Halbierung des Wärmedurchgangskoeffizienten von ca. $3 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf $1,54 \text{ W/m}^2\text{K}$ im Zuge einer Fassadensanierung zu einer wesentlichen Reduktion des Heizwärmebedarfs bei dem gegenständlichen Objekt kommt. Im Sinne einer ganzheitlichen Gebäudesanierung sollte natürlich auch eine bauphysikalische Optimierung des Dachaufbaus und allfälliger Wärmebrücken unbedingt in Betracht gezogen werden.

Folgende weitere Aspekte der Fassadensanierung führen zusätzlich zu einer bauphysikalischen und energetischen Verbesserung des Bestandsgebäudes:

- Solare Strahlungsenergiegewinne durch den größeren Glasflächenanteil
- Reduktion der sommerlichen Überwärmung durch wirksamen Sonnenschutz im ZFR
- Verhinderung der Blendung im Arbeitsplatzbereich durch wirksamen Blendschutz
- Erhöhter Schallschutz auch bei geöffneten Lüftungsflügeln durch die Doppelfassade
- Höhere Behaglichkeit auf Grund geringerer Fugendurchlässigkeit

7.2.4 Brandschutztechnische Aspekte der neuen Fassadenkonstruktion

Für die brandschutztechnische Beurteilung der Holz-Glas-Fassade bei dem exemplarisch ausgewählten Projekt wird davon ausgegangen, dass das maßgebliche Fluchtniveau des gegenständlichen Objektes nicht mehr als 22 m beträgt, und es sich daher um ein Bauwerk der Gebäudeklasse 5 handelt. Gemäß dem Stand der Technik muss in jedem Geschoß ein deckenübergreifender Außenwandstreifen von mindestens 1,20 m Höhe in EI 30-ef und A2 bzw. EW 30-ef und A2 gemäß OIB RL 2, Pkt. 3.3 vorhanden sein.

Bei dem gegenständlichen Objekt erfolgt, entgegen der zuvor angeführten Anforderung, die Ausführung mit HGV-Kastendoppelfassaden mit einer Rahmenkonstruktion aus Holz der Klasse D, s2. Diese Ausführung stellt eine Abweichung an die zuvor angeführte A2-Anforderung im Bereich des deckenübergreifenden Außenwandstreifens dar.

Die Kompensation dieser Abweichung wird wie folgt begründet:

Im Bereich der geschoßweise vorgesehenen Zuluftöffnungen des Fassadenzwischenraums der Kastendoppelfassade werden Brandsperren der Klassifikation EI 30 ausgeführt, welche bei einem Fensterausbrand bzw. bei einem Fassadenbrand eine Kanalisierung der Brandgase und eine Rauchausbreitung im Fassadenzwischenraum wirksam verhindern und somit ein gleichwertiges Schutzniveau bieten.

Es liegt ein Prüfbericht mit ergänzender Stellungnahme der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien über die Eignung der gegenständlichen HGV-Fassade als wirksame Maßnahme zur Begrenzung einer vertikalen Brandübertragung durch die Verhinderung einer direkten Flammenübertragung im Bereich des Brandschutzschildes über einen Zeitraum von 30 Minuten vor.

7.2.5 Fassadendetails

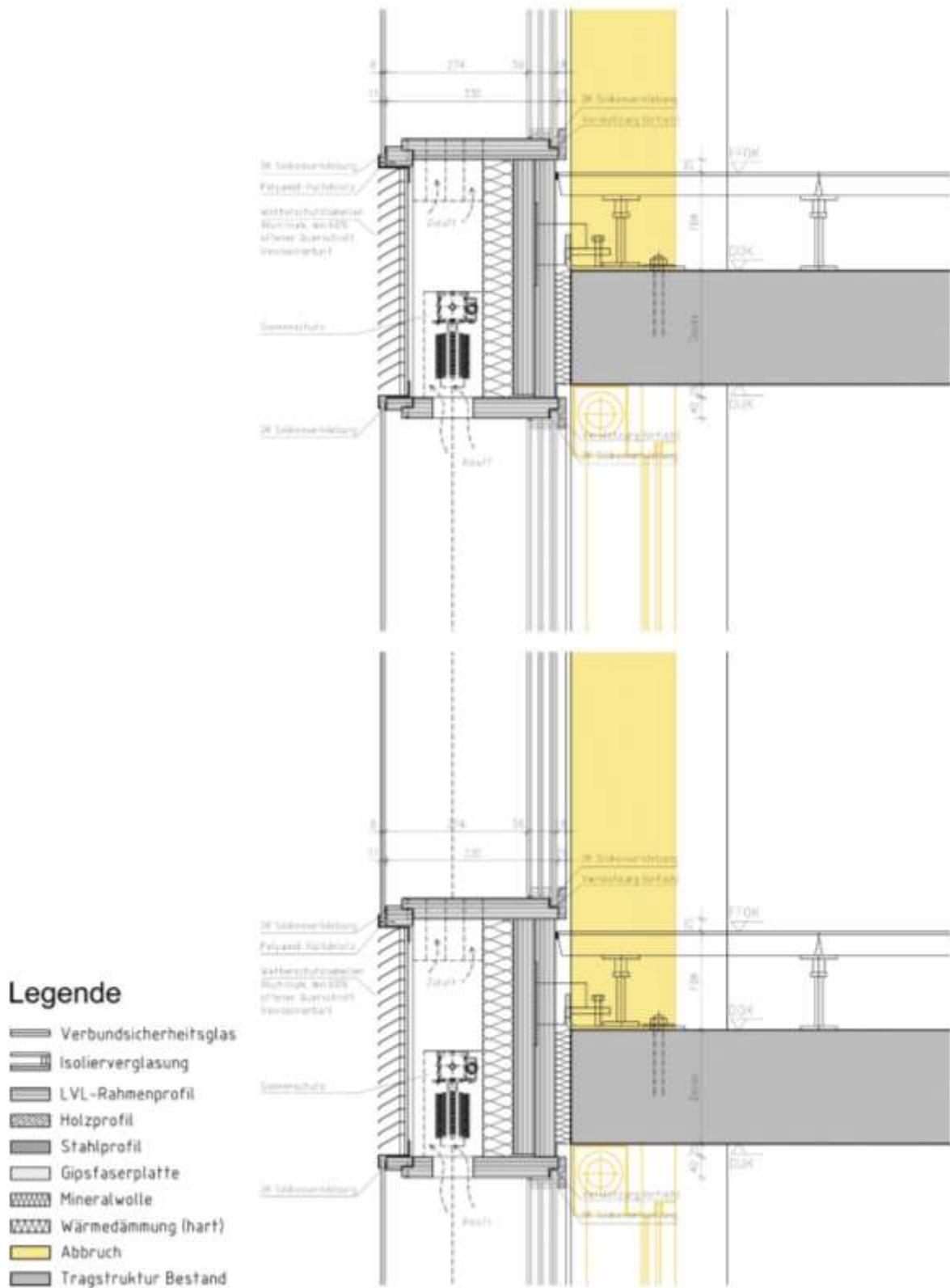


Abb. 7.16: Fassadenschnitt [eigene Darstellung]

7.2.6 Visualisierung



Abb. 7.17: Fotomontage des revitalisierten Bestandsgebäudes [eigene Darstellung]

Typ C: Holzochaus mit Holz-Glas-Doppelfassade

Zuletzt soll auch ein Ausblick auf die Möglichkeit einer prototypischen Anwendung der entwickelten Doppelfassade bei einem Hochhaus in Massivholzbauweise gemacht werden. Hierfür wurde das derzeit höchste Holzhochhaus, das Studentenwohnheim Brock Commons in Vancouver, Kanada, welches 2017 fertiggestellt werden soll, als Bearbeitungsgrundlage herangezogen. Das im folgenden beschriebene Gebäude eignet sich auf Grund des klar strukturierten Tragsystems sehr gut für die Verwendung von modularen, vorgefertigten Holz-Glas-Fassadenelementen.

7.2.7 Projektbeschreibung Brock Commons

„Das Studentenwohnheim der University of British Columbia in Vancouver, Kanada wird mit seiner Fertigstellung das weltweit höchste Gebäude in Massivholzbauweise sein und verfügt über rund 15.000 m² Nutzfläche auf 18 Geschoßen mit einer Höhe von 53 m.

Der rechteckige Grundriss weist eine Dimension von 15 x 56 m auf und verfügt über einen Stützenraster von 2,85 x 4 m. Auf den Stützen liegen Deckenplatten aus Brettsperrholz (CLT) in fünf Schichten und einer Gesamtstärke von 16,6 cm. Der Schubverbund zwischen den einzelnen CLT Platten wird mit einer versenkten

3-Schicht-Platte hergestellt. Alle horizontalen Kräfte (Wind, Erdbeben) werden über Stahlbänder aus dieser Scheibe in die betonierten Stiegentürme übertragen. Die Holzstützen tragen die vertikalen Lasten ab und geben sie weiter auf eine Stahlbetonkonstruktion im Erdgeschoß.

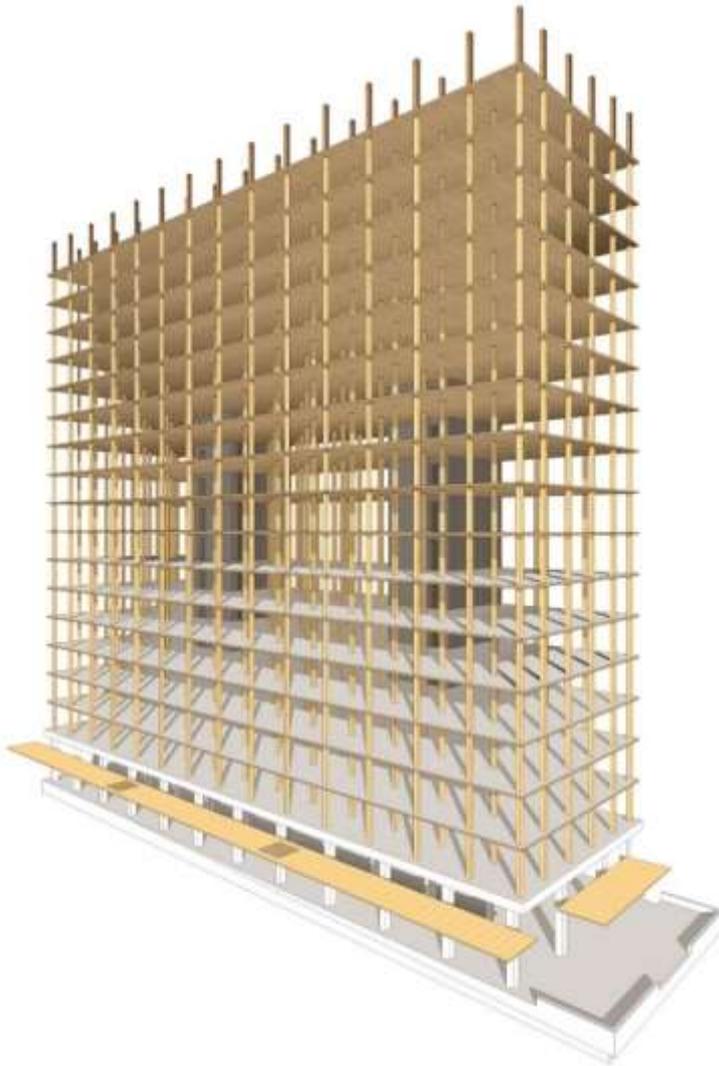


Abb. 7.17: Darstellung der Tragstruktur von Brock Commons [W2]

Das Wohnhaus konnte innerhalb kürzester Zeit errichtet werden: Pro Woche wuchs die Baustelle um zwei Geschoße an.

Der Bewilligungsprozess war dementsprechend aufwändig: Neben einem Peer-review beurteilte ein Ausschuss aus Brandschutzexperten, Wissenschaftlern, Behörden und Feuerwehrlern die Konstruktion. Um die Widerstandsfähigkeit der Holzkonstruktion gegen Brand zu erhöhen, sind die Holzbauteile in Gipskarton eingepackt. Lediglich im obersten Geschoß, das als Aufenthaltsraum für die Studierenden dient, ist die Konstruktion sichtbar und bietet einen anschaulichen Blick auf die Bauweise des Hochhauses. Ein redundantes System versorgt die Sprinkleranlage auch dann noch mit Wasser und Strom, wenn die Anschlüsse an das öffentliche Netz unterbrochen sind.

Die Fassaden bestehen aus der in Kanada üblichen Stahlrahmen-Konstruktion mit einer Verkleidung aus Hochdruck-Schichtpressstoffplatten aus Holz und Papier, wobei sich Elemente mit großformatigen Trespa Platten und raumhohen Fenstern abwechseln.“ [W2]

Geklebte Holz-Glas-Fassaden

Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschoßige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall



Abb. 7.18 (li.): Bauzustand Brock Commons [W2]



Abb. 7.19 (re.): Innenansicht der Aussenwandelemente [W2]

7.2.8 Brandschutztechnische Aspekte bei der Ausführung mit einer Holz-Glas-Doppelfassade

Bei einer Modifikation dieses Gebäudes mit einer Holz-Glas-Doppelfassade anstelle des zuvor beschriebenen, bereits realisierten Fassadensystems, sind zusätzlich folgende brandschutztechnische Risiken zu beachten:

- Verhinderung der Rauchausbreitung bzw. Kanalisierung der Brandgase über den Zwischenfassadenbereich der Doppelfassade in angrenzende bzw. über dem Brandgeschoß liegende Fassadenbereiche.
- Verhinderung einer raschen Rauch- und Brandausbreitung über allfällig geöffnete Lüftungsflügel in angrenzende bzw. über dem Brandgeschoß liegende Räume und Raumgruppen
- Begrenzung der vertikalen Brandausbreitung (Brandüberschlag) in Folge der Entzündung der brennbaren Fassadenkonstruktion und der damit zusammenhängenden höheren Heißgastemperatur und größeren Strömungsgeschwindigkeiten im ZFR.

Zur Verminderung dieser Risiken können die nachfolgend beschriebenen Zusatzmaßnahmen in Betracht gezogen werden:

- Die Belüftung des ZFR wird im Brandfall oberhalb des Brandgeschoßes durch intumeszierende Brandsperren wirksam unterbrochen.
- Die geschosswise angeordneten horizontalen Brandsperren werden mit einem Feuerwiderstand von mindestens 90 Minuten ausgeführt.
- Die Lüftungsflügel der Doppelfassade werden im Brandfall automatisch durch Auslösen der Brandmeldeanlage geschlossen.

Diese zusätzlichen Brandschutzmaßnahmen sind im nebenstehenden Fassadenschema dargestellt.

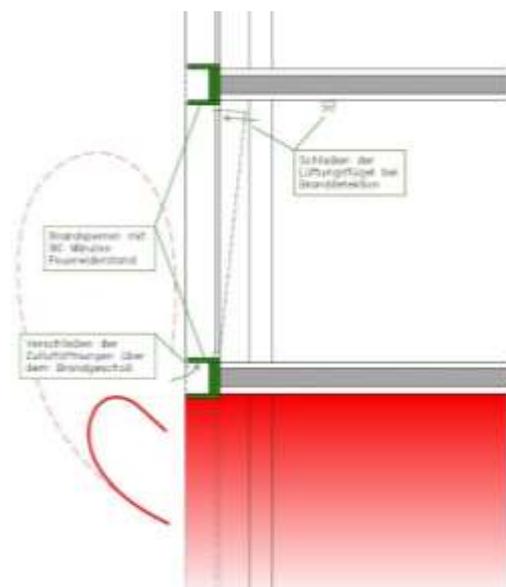


Abb. 7.20: Fassadenschema mit Darstellung der zusätzlichen Brandschutzmaßnahmen [eigene Darstellung]

Unter Berücksichtigung dieser Zusatzmaßnahmen wäre im Zuge einer Weiterentwicklung des bisher entwickelten Holz-Glas-Fassadensystems eine Anwendung im Einzelfall eventuell auch bei Hochhäusern, wie in diesem prototypischen Fall gezeigt, denkbar. Dies setzt jedoch positive Prüfergebnisse sowie effektive Kompensationsmaßnahmen im Rahmen einer objektspezifischen Brandschutzplanung voraus.

7.2.9 Visualisierung



Abb. 7.21: Fotomontage des Holzhochhauses mit HGV-Doppelfassade [eigene Darstellung, Grundlage: treesource.org, 08.08.2017]

8 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die im Zuge dieser Forschungstätigkeit gewonnen Erkenntnisse sollte eine Erweiterung des Anwendungsbereichs von geklebten Holz-Glas-Fassaden auf großvolumige Bauvorhaben unter Berücksichtigung der höheren brandschutztechnischen Anforderungen an Fassaden von mehrgeschoßigen Gebäuden erzielt werden. Als Arbeitsgrundlage wurde der Stand der Technik und Forschung von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen aufgearbeitet bzw. Forschungsarbeiten und Dissertationen zu diesem Themenbereich ausgewertet. Relevante Verordnungen und Richtlinien betreffend Brandschutzanforderungen an Fassaden von mehrgeschoßigen Gebäuden wurden erläutert sowie Unterschiede bei den Schutzziele in Österreich, Deutschland und der Schweiz diskutiert.

Im experimentellen Teil wurde zuerst das Verhalten unterschiedlicher Klebstoffe für den Holz-Glas-Verbund unter Temperaturbelastung untersucht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bildeten eine Entscheidungsgrundlage für die anschließenden Fassadenbrandversuche. Die wesentlichen Erkenntnisse aus dieser Versuchsreihe können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Da im Fassadenbereich Temperaturen über 80°C bereits ohne Brandeinwirkung auftreten können, sind Holz-Glas-Verbindungen mit dem untersuchten Acrylatklebstoff für Außenanwendungen ungeeignet, da bereits ab dieser Temperaturbelastung ein sehr starker Festigkeitsverlust auftritt.
- Holz-Glas-Verbindungen mit der untersuchten silanterminierten Epoxidverklebung weisen bei Raumtemperatur sehr hohe Scherfestigkeiten auf, welche jedoch schon bei einer Temperaturbelastung über 120 °C deutlich abnehmen.
- Holz-Glas-Verbindungen mit der untersuchten Silikonverklebung weisen bis zu einer Temperaturbelastung von 200°C ein sehr konstantes Verhalten bei einer geringeren Reduktion der Scherfestigkeit auf.

Auf Grund der Auswertung der Grundlagenversuche wurde entschieden, die Fassadenprototypen für die folgenden Brandversuche ausschließlich mit Silikonverklebungen herzustellen.

Vor Durchführung der Brandversuche mit großen Fassadenelementen wurden konstruktive Lösungsansätze für unterschiedliche Fassadenvarianten mit geklebten Holz-Glas-Fassaden entwickelt und evaluiert. Das Fassadensystem einer belüfteten Kastendoppelfassade in Holz-Glas-Verbundbauweise wurde für die weitere Realisierung als Prototyp sowie für die Fassadenbrandversuche ausgewählt, da diese Bauart hinsichtlich des vorgesehenen Einsatzbereiches bei mehrgeschoßigen Gebäuden eine Vielzahl positiver Aspekte aufweist.

Die Herstellung der Prüfkörper und deren Untersuchung mittels Fassadenprüfversuchen erfolgte im Rahmen des kooperativen Forschungsprojekts „Holz-Glas-Verbundfassaden | Verhalten im Brandfall | Brandschutzkonzepte“ unter der Leitung des Autors in Zusammenarbeit mit der Brandrat ZT GmbH und dem Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau der Technischen Universität Wien.

Zur Festlegung des Worst-Case-Szenarios sowie zur Bewertung unterschiedlicher konstruktiver Detaillösungen wurden vor Abwicklung der Fassadenbrandversuche zwei Vorversuchsreihen mit Prüfkörpern in ökonomischen Dimensionen durchgeführt. Die Schutzziele für Doppelfassaden von Gebäuden ab der Gebäudeklasse 4, die in den vom Österreichischen Institut für Bautechnik herausgegebenen Richtlinien festgelegt sind, wurden mittels normierter Prüfversuche, deren Abwicklung mit der Prüf- Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien abgestimmt wurde, nachgewiesen.

Für das entwickelte Fassadensystem einer belüfteten Kastendoppelfassade in Holz-Glas-Verbundbauweise konnte in den durchgeführten Brandversuchen ein positiver Nachweis über die Einhaltung folgender Schutzziele erbracht werden:

- Verhinderung der Brandweiterleitung im Zwischenraum von Kasten-Doppelfassaden
- kein Herabfallen von Teilen und Elementen der Fassade
- keine Gefährdung von flüchtenden Personen und Rettungsmannschaften
- Begrenzung der vertikalen Brandausbreitung mittels deckenübergreifendem Außenwandstreifen mit einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten

Die Brandversuche wurden in der Prüfhalle der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien durchgeführt. Die Beurteilung liegt in Form von Prüf- und Laborberichten vor und ist Teil des Anhangs dieser Arbeit. Im Zuge der Auswertung der Messdaten erfolgte eine vergleichende Beurteilung mit Erkenntnissen aus anderen Naturbrandversuchen, um die Prüfergebnisse auf Plausibilität zu überprüfen.

Abschließend wurden in Fallstudien unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten von Holz-Glas-Verbundfassaden mittels Kurzbericht, Plänen und Visualisierung dargestellt. Bei den gewählten Objekten erfolgt eine Fokussierung auf Büronutzungen, welche aus Sicht des Autors großes Potential für die Verwendung von Holz-Glas-Fassaden aufweisen. Dies ist einerseits durch die transparente Bauweise dieser Fassadentechnologie begründet, da bei Bürogebäuden vorwiegend verglaste Vorhang- bzw. Doppelfassaden zum Einsatz kommen. Andererseits ist es auf Grund der Novellierung der OIB-Richtlinien im Jahr 2015 insbesondere bei Wohngebäuden hinsichtlich der Brandschutzanforderungen zu einigen Erleichterungen gekommen. Dies umfasst unter anderem auch den Verzicht auf die Anforderung nach einem deckenübergreifenden Außenwandstreifen bei Wohngebäuden der Gebäudeklasse 5 mit mehr als fünf oberirdischen Geschossen.

Für die im Zuge der Forschungsarbeit entwickelte Kastendoppelfassade in HGV-Bauweise konnte mittels der durchgeführten Prüfversuche bei der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien unter anderem nachgewiesen werden, dass Holz-Glas-Verbundfassaden dieser Bauart das Schutzziel der Begrenzung einer vertikalen Brandausbreitung mittels deckenübergreifendem Außenwandstreifen mit einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten im Sinne der OIB Richtlinie 2 erfüllen. Daher sind Holz-Glas-Fassadenkonstruktionen bei Bürogebäuden in der Gebäudeklasse 5 mit mehr als sechs oberirdischen Geschossen von besonderem Interesse, da in diesem Fall weder zusätzliche bauliche Brandschutzmaßnahmen im Brüstungsbereich noch anlagentechnische Kompensationsmaßnahmen notwendig sind. Bei solchen Gebäuden stellen die Forschungsergebnisse einen wesentlichen Beitrag für zukünftige Realisierungen von Gebäuden mit Holz-Glas-Verbundfassaden dar.

Die in dieser Arbeit entwickelten prototypischen Fallbeispiele mit geklebten Holz-Glas-Fassaden bei mehrgeschoßigen Gebäuden zeigen Anwendungsmöglichkeiten und Leistungsgrenzen dieser innovativen Technologie auf. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass HGV-Fassaden für Gebäude bis zur Hochhausgrenze aus brandschutztechnischer Sicht den Stand der Technik gewährleisten können. Eine Erweiterung des Einsatzbereichs von geklebten Holz-Glas-Fassaden auf Gebäude über der Hochhausgrenze ist unter Berücksichtigung des höheren Sicherheitsniveaus aus derzeitiger Sicht nur eingeschränkt vorstellbar. Zur Validierung eines wirksamen Sicherheitskonzepts fehlen auch statistisch gesicherten Daten aus Realbrandversuchen und Brandereignissen für diese Gebäudeklasse.

Für brandschutztechnische Beurteilungen bei Hochhausanwendungen ist eine Differenzierung in Abhängigkeit von der Gebäudehöhe unerlässlich. Als Leistungsgrenze für den Einsatz von HGV-Fassaden kann aus derzeitiger Sicht eine Gebäudehöhe von ca. 35 m (dies entspricht einem Fluchtniveau von 32 m) angesehen werden. Bei Hochhäusern, die dieses Fluchtniveau nicht überschreiten, kann im Fall von ausreichenden Aufstellflächen für die Feuerwehr von einem wirksamen Löschangriff über die gesamten Fassadenflächen ausgegangen werden. Der Einsatz von HGV-Fassaden für Hochhäuser mit einem Fluchtniveau über 32 m muss grundsätzlich kritisch betrachtet werden. Auf Grund der spezifischen Bauweise von HGV-Fassaden und der damit verbundenen Brandlast in der Fassadenebene bzw. im Zwischenfassadenbereich, be-

steht ein höheres Risiko einer raschen Brandweiterleitung bei einem Fenster- bzw. Fassadenausbrand. Anwendungsmöglichkeiten sind daher nur im Einzelfall und unter Berücksichtigung ausreichender Kompensationsmaßnahmen vorstellbar. Bei dem zuvor angeführten Fallbeispiel Typ C wurden exemplarische Maßnahmen vorgeschlagen, die jedoch durch weitere Forschungsprojekte und Brandversuche auf ihre tatsächliche Wirksamkeit hin untersucht werden müssen.

Im Hinblick auf zukünftige Forschungsarbeiten und Prüfversuche kann auch eine Klassifizierung des entwickelten Fassadentyps der HGV-Kastendoppelfassade mit EW 30-ef gemäß ÖNORM EN 13501-2 [N27] auf Grund der Temperatúrauswertungen als realistische Option in Betracht gezogen werden.

Weiters sollten auch HGV-Kastendoppelfassaden mit silanterminierter Epoxidverklebung und Verklotzung im Bereich der inneren Fassadenebene detailliert untersucht werden, da aktuelle Forschungsarbeiten deutlich höhere Wandsteifigkeiten als bei HGV-Fassaden mit Silikonverklebungen zeigen [27]. Die hohe Sensibilität von Epoxidklebstoffen auf UV-Strahlung könnte bei entsprechender Ausbildung der äußeren Fassadenebene mit einer Verglasung mit hohem UV-Transmissionsgrad in Verbindung mit einer effektiven Beschattung im Fassadenzwischenraum deutlich reduziert werden. Außerdem wurde bei den in dieser Arbeit durchgeführten Brandversuchen festgestellt, dass die Temperaturbelastung bei der gegenständlichen HGV-Kastendoppelfassade im Zwischenfassadenbereich ungefähr 120 °C erreicht und daher als unkritisch hinsichtlich des Festigkeitsverlusts von silanterminierten Epoxid-Klebeverbindungen angesehen werden kann.

Diese Themenfelder beinhalten vielfältige Aspekte und mögliche Fragestellungen für zukünftige Forschungsarbeiten mit Holz-Glas-Verbundkonstruktionen. Wenn es durch Modifikationen der im Zuge dieser Arbeit entwickelten Holz-Glas-Doppelfassade gelingt, einerseits die Steifigkeit der gegenwärtigen HGV-Fassadensysteme zu erhöhen und andererseits einen Nachweis über die Einhaltung des bei Hochhäuser erforderlichen Schutzniveaus zu erbringen, könnte dadurch der mögliche Anwendungsbereich dieser innovativen Technologie nochmals erweitert werden.

9 Quellenverzeichnis

9.1 Literatur

- [1] Brandrat ZT GmbH, Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau der Technischen Universität Wien: Holz-Glas-Verbundfassaden | Verhalten im Brandfall | Brandschutzkonzepte. Forschungsbericht. Wien, 2017
- [2] Edl, T.: Entwicklung von wandartigen verklebten Holz-Glas-Verbundelementen und Beurteilung des Tragverhaltens als Aussteifungsscheibe. Dissertation. Technische Universität Wien, 2008
- [3] Edl, T.; Schober, K.P.: Statisch wirksame Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zur Aussteifung von Holzbauten. Forschungsbericht. Holzforschung Austria, 2005
- [4] Fachausschuss Brandschutz im Holzbau, Lignum, VKF, SIA: 7.1 Aussenwände. Konstruktion und Bekleidungen. Zürich, 2009
- [5] Fadai, A.; Winter, W.; Jöbstl, R.: Development of timber-glass composite for multi-story facades. In: engineered transparency. Düsseldorf, 2014
- [6] Gertis, K.: Sind neuere Fassadenentwicklungen sinnvoll? Teil 2: Glas-Doppelfassden (GDF). In: Bauphysik 21 – Heft 2. Ernst & Sohn. 1999
- [7] Hamm, J.: Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas. Dissertation. EPF Lausanne, 1999
- [8] Heißbemessung nach den Eurocodes unter Verwendung von Naturbrandkurven. Ernst & Sohn Spezial, 2014
- [9] Hochhauser, W.; Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundscheiben. Dissertation. Technische Universität Wien, 2011
- [10] Hochhauser, W.; Winter, W.; Kreher, K.: Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: Berechnung und Bemessungskonzept. Forschungsbericht. Technische Universität Wien, 2011
- [11] Hosser, D.: Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes. Erläuterungen und Anwendungen zu den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 5. Berlin, 2012
- [12] Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der technischen Universität Braunschweig: Brandversuche Lehrte. Forschungsbericht. Bonn, 1978
- [13] Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau der Technischen Universität Wien: Load-bearing timber glass composite elements. Forschungsbericht. Wien, 2015
- [14] Kampmeier, B.: Grundlagen nach Eurocode 1. Bauphysik Kalender - Ernst & Sohn. 2011
- [15] Kaufmann, H., Nerdinger, W.: Bauen mit Holz – Wege in die Zukunft. 2016
- [16] Kinowski, J., Sedlak, B., Sulik, B.: Large Glazing in Curtain Walls – Study on Impact of Fixing Methods on Fire Resistance. In: MATEC Web of Conferences 46 (2016)
DOI: 10.1051/mateconf/20164605004
- [17] Kotthoff, I.: Glasfassaden, Brandausbreitung an Fassaden. Beitrag zum VI. Baurecht & Brandschutz-Symposium. Frankfurt am Main, 2002
- [18] Kreuzinger, H.; Niedermaier, P.: Glas als Schubfeld, Tagungsband Ingenieurholzbau. Karlsruhe, 2005

- [19] Kuhnkelmann, J.: Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung– Teil 1. Forschungsbericht. Karlsruhe, 1996
- [20] Kuhnkelmann, J.: Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung– Teil 2. Forschungsbericht. Karlsruhe, 1997
- [21] Kuhnkelmann, J.: Auswirkung des Einsatzes ortsfester Wassernebel-Löschanlagen auf die Brand- und Rauchausbreitung mit doppelten Fassaden– Teil 3. Forschungsbericht. Karlsruhe, 1998
- [22] Kuhnkelmann, J.: Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung– Teil 4. Forschungsbericht. Karlsruhe, 1999
- [23] Mayr, J., Battran, L.: Brandschutz Atlas. Feuertrutz GmbH. Köln, 2013
- [24] Natterer, J., Herzog, T., Volz, M.: Holzbau Atlas Zwei. Studienausgabe, München 1996
- [25] Neubauer, G.: Entwicklung und Bemessung von statisch wirksamen Hol—Glas-Verbundkonstruktionen zum Einsatz im Fassadenbereich. Dissertation. Technische Universität Wien, 2011
- [26] Neubauer, G.; Schober, K.P.: Holz-Glas-Verbundkonstruktionen. Forschungsbericht. Holzforschung Austria, 2008
- [27] Nicklisch, F.: Ein Beitrag zum Einsatz von höherfesten Klebstoffen bei Holz-Glas- Verbundelementen. Technische Universität Dresden, 2016
- [28] Niedermaier, P.: Holz-Glas-Verbundkonstruktionen – Ein Beitrag zur Aussteifung von filigranen Holzkonstruktionen. Dissertation. Technische Universität München, 2005
- [29] Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB aktuell 03 September 2014. Fachmagazin. 2014
- [30] Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB aktuell 04 Dezember 2014. Fachmagazin. 2014
- [31] Rinnhofer, M.: Tragende Verklebungen von Glas mit Holz unter besonderer Berücksichtigung der Bemessungsansätze für das Langzeitverhalten von Silikonfugen. Dissertation. Technische Universität Wien, 2017
- [32] Schittich, C. et.al.: Glasbau Atlas. Edition Detail. München. 2006
- [33] Staib, G., Dörrhofer, A., Rosenthal, M.: Elemente+Systeme – Modulares Bauen. Entwurf, Konstruktion, neue Technologien. Edition Detail. München, 2008
- [33] Teibinger, M.: Att. - Brandschutzvorschriften in Österreich. Anforderungen nach OIB-Richtlinie 2. proHolz Austria. Wien, 2012
- [34] Winter, W. (2012): Tragende Holz-Glas Klebeverbindungen Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten, 5. Europäischer Kongress für effizientes Bauen mit Holz 2012

9.2 Normen und Richtlinien

- [N 1] Brandschutzerläuterung - Bauten mit Doppelfassaden. 102-03d. Brandschutz-Erläuterung 1004. Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen. Ausgabe 2001
- [N 2] ETAG Nr. 002-1: Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen. Teil 1: Gestützte und ungestützte Systeme. OIB-467-011/13. Österreichisches Institut für Bautechnik. Wien, 2013

- [N 3] Musterbauordnung (MBO). Fassung 2002. Zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 13.05.2016
- [N 4] OIB Richtlinien – Begriffsbestimmungen. OIB-330-014/15. Österreichisches Institut für Bautechnik. Wien, 2015
- [N 5] OIB Richtlinie 1 - Mechanische Festigkeit und Standsicherheit. OIB-330.1-003/15. Österreichisches Institut für Bautechnik. Wien, 2015
- [N 6] OIB Richtlinie 2 – Brandschutz. OIB-330.2-011/15. Österreichisches Institut für Bautechnik. Wien, 2015
- [N 7] Erläuternde Bemerkungen OIB RL 2 – Brandschutz. OIB-330.2-015/15. Österreichisches Institut für Bautechnik. Wien, 2015
- [N 8] OIB Richtlinie 2.3 – Brandschutz bei Gebäuden mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m. OIB-330.2-014/15. Österreichisches Institut für Bautechnik. Wien, 2015
- [N 9] Erläuternde Bemerkungen OIB RL 2.3 – Brandschutz bei Gebäuden mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m. OIB-330.2-018/15. Österreichisches Institut für Bautechnik. Wien, 2015
- [N 10] ONR 22000:2007 – Gebäude mit besonderen brandschutztechnischen Anforderungen (Hochhäuser). ICS 13.220.01; 91.040.01
- [N 11] ÖNORM B 2332:2015 - Brandschutztechnische Ausführung von Fassaden aus Holz und Holzwerkstoffen in den Gebäudeklassen 4 und 5. Anforderungen und Ausführungsbeispiele
- [N 12] ÖNORM B 3716-1:2009 - Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau. Teil 1: Grundlagen
- [N 13] ÖNORM B 3716-2:2009 - Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau. Teil 1: linienförmig gelagerte Verglasungen
- [N 14] ÖNORM B 3716:2010 - Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau. Konstruktiver Glasbau Beiblatt 1
- [N 15] ÖNORM B 3800-5:2013 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 5: Brandverhalten von Fassaden - Anforderungen, Prüfungen, Beurteilungen
- [N 16] ÖNORM B 3800-6:2013 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 6: Brandverhalten von Kasten-Doppelfassaden (2-schalige Fassade) - Anforderungen, Prüfungen, Beurteilungen
- [N 17] ÖNORM B 3800-8:2013 - Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 8: Brandverhalten über die Dauerhaftigkeit von deckenübergreifenden Außenwandstreifen (Brandschutzschiene gegen Feuerüberschläge im Parapetbereich) - Anforderungen, Prüfungen, Beurteilungen
- [N 18] ÖNORM B 1991-1-2:2003 – Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke. Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-2
- [N 19] ÖNORM EN 357:2005 - Glas im Bauwesen – Brandschutzverglasungen aus durchsichtigen oder durchscheinenden Glasprodukten – Klassifizierung des Feuerwiderstandes
- [N 20] ÖNORM EN 1363-1:2000 – Feuerwiderstandsprüfungen. Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- [N 21] ÖNORM EN 1363-2:2000 – Feuerwiderstandsprüfungen. Teil 2: Alternative und ergänzende Verfahren
- [N 22] ÖNORM EN 1364-3:2014 - Feuerwiderstandsprüfungen für nichttragende Bauteile. Teil 3: Vorhangfassaden – Gesamtausführung

- [N 23] ÖNORM EN 1364-4:2014 - Feuerwiderstandsprüfungen für nichttragende Bauteile. Teil 4: Vorhangfassaden – Teilausführung
- [N 24] ÖNORM EN 1990:2003 – Grundlagen der Tragwerksplanung
- [N 25] ÖNORM EN 1991-1-2:2010 – Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke
- [N 26] ÖNORM EN 13501-1:2009 - Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten. Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen von Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten
- [N 27] ÖNORM EN 13501-2:2010 - Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten. Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen
- [N 28] ÖNORM EN 13830:2015 - Vorhangfassaden – Produktnorm
- [N 29] ÖNORM EN ISO 12542-2:2011- Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas. Teil 2: Verbund-Sicherheitsglas
- [N 30] ÖNORM EN ISO 13943:2000 – Brandsicherheit – Terminologie
- [N 31] Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, veröffentlicht im ABI. L 88 vom April 2011

9.3 Weblinks

- [W 1] <http://www.faz.net> (letzter Zugriff: 22.06.2017)
- [W 2] <http://www.hermann-kaufmann.com> (letzter Zugriff: 07.09.2017)
- [W 3] <http://www.oib.or.at> (letzter Zugriff: 23.03.2015)
- [W 4] <http://realgrünarchitekten.de> (letzter Zugriff: 31.08.2017)
- [W 5] <https://de.wikipedia.org/wiki/acrylharz> (letzter Zugriff: 23.03.2015)
- [W 6] <https://de.wikipedia.org/wiki/epoxidharz> (letzter Zugriff: 23.03.2015)
- [W 7] <https://de.wikipedia.org/wiki/fassade> (letzter Zugriff: 20.03.2016)
- [W 8] https://de.wikipedia.org/wiki/grenfell_tower (letzter Zugriff: 30.09.2017)
- [W 9] <https://de.wikipedia.org/wiki/holz> (letzter Zugriff: 17.09.2017)
- [W 10] <https://de.wikipedia.org/wiki/klebstoff> (letzter Zugriff: 16.09.2017)
- [W 11] <https://de.wikipedia.org/wiki/silikone> (letzter Zugriff: 23.03.2015)
- [W 12] <https://de.wikipedia.org/wiki/schwedenplatz> (letzter Zugriff: 31.08.2017)
- [W 13] <https://www.ogni.at/de/erstecampus> (letzter Zugriff: 31.08.2017)

10 Anhang