

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER LÄNDER

DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

BERICHTE

## **Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise**

Teil 2:

- Verhalten von Verglasungen bei thermischer Beanspruchung
- Verhalten von Verglasungen beim Feuerwehreinsatz
- Mechanische Zerstörung von Verglasungen
- Zerstörung von Verglasungen durch Explosivmittel

von

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

# 164

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER  
LÄNDER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-  
ANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE  
VERTEIDIGUNG

**Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder,  
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastro-  
phenschutz und Zivile Verteidigung**

Forschungsbericht Nr. 164

**Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbe-  
kämpfung in Gebäuden moderner Bauweise**

Teil 2:

- Verhalten von Verglasungen bei thermischer Beanspruchung
- Verhalten von Verglasungen beim Feuerwehreinsatz
- Mechanische Zerstörung von Verglasungen
- Zerstörung von Verglasungen durch Explosivmittel

von  
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe  
Februar 2013

FA. Nr. 214 (2/2010) und 218 (3/2011)

ISSN 0170-0060

## Berichtskennblatt

<b>Nummer des Berichtes:</b>  164	<b>Titel des Berichtes:</b> <b>Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise</b> <b>Teil 2:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verhalten von Verglasungen bei thermischer Beanspruchung</li> <li>• Verhalten von Verglasungen beim Feuerwehreinsatz</li> <li>• Mechanische Zerstörung von Verglasungen</li> <li>• Zerstörung von Verglasungen durch Explosivmittel</li> </ul>	<b>ISSN:</b>  0170-0060	
<b>Autor:</b>  Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann	<b>durchführende Institution:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe		
<b>Nummer des Auftrages:</b> FA. Nr. 214 (2/2010) und 218 (3/2011)	<b>auftraggebende Institution:</b> Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung		
<b>Abschlussdatum:</b> Februar 2013			
<b>Seitenzahl:</b> 148	<b>Bilder:</b> 76	<b>Tabellen:</b> 22	<b>Literaturverweise:</b> 51
<b>Kurzfassung:</b> <p>In dieser Arbeit wurde sowohl theoretisch als auch experimentell das thermisch und das mechanisch bedingte Versagen von Fenstern und Verglasungen unter besonderer Berücksichtigung ihrer Anwendung bei modernen Bauweisen wie z.B. Niedrigenergie-, Passiv- und Nullenergiehäusern untersucht.</p> <p>Von besonderem Interesse ist auch die Beantwortung der Fragestellung, wie beim Feuerwehreinsatz bei mechanisch stabilen Verglasungen die Schaffung von Öffnungen für den gezielten Abzug von zündfähigem und toxischem Brandrauch erreicht werden kann.</p> <p>Bei entsprechender Wärmebelastung setzte die Rissbildung bei den in den Versuchen untersuchten verwendeten Fenstern sehr früh ein. Der frühe Zeitpunkt für den ersten Riss sagt jedoch noch nichts darüber aus, wie lange insgesamt die Scheiben im Fenster auch im gerissenen Zustand einen relativ dichten Raumabschluss bilden und verhindern, dass zündfähige Brandpyrolyseprodukte abströmen können. Bei der rechnerischen Beschreibung des Versagens von Verglasungen ist daher der effektive Zeitpunkt zu berücksichtigen, bei dem das Fenster eine Öffnung frei gibt. Entscheidend sind hierbei nicht nur die Werkstoffkenngrößen des Glases wie z.B. zulässige Betriebstemperaturen für das Glas, sondern das Versagen der Verglasung in Zusammenhang mit den Eigenschaften des Rahmens (Größe, Material, Dichtungen, etc.) und der Einbausituation.</p> <p>Im Vergleich verschiedener Fensterrahmenarten halten die Außenscheiben bei Fenstern mit Holzrahmen sowohl bei 2-fach als auch 3-fach Verglasung einer höheren Temperaturbeanspruchung länger stand und erhöhen daher durch die Verhinderung des Rauch- und Wärmeabzuges die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Rollovers oder Backdrafts.</p> <p>Mit Versuchen zur mechanischen Widerstandskraft von Verglasungen konnte gezeigt werden, dass Feuerwehreinsatzkräfte mit den ihnen üblicherweise zur Verfügung stehenden Mitteln in der Lage sind, mehrfach verglaste Fenster aus Floatglas wie z.B. Passivhausfenster zu öffnen. Das Öffnen von Fenstern mit Verbund- und Verbundsicherheitsgläsern erfordert hingegen einen im Vergleich beträchtlichen Aufwand. Dies gilt insbesondere für einbruchhemmende Verglasungen in Obergeschossen.</p> <p>Die Luftdichtheit des Gebäudes kann zu einer verspäteten Branderkennung von außen führen. Dies verursacht wiederum lange Brandentwicklungszeiträume (z.B. langandauernde Schwelbrände) mit entsprechender Gefährdungserhöhung. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, die Brandmeldung auch außerhalb des Gebäudes anzuzeigen.</p>			
<b>Schlagwörter:</b> Versagen von Verglasungen beim Brand, Feuerwehreinsatz, Zerstörung von Verglasungen			

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>BERICHTSKENNBLETT</b>	<b>III</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>XIII</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>2 KONSTRUKTIONSMERKMALE VON GEBÄUDEN MODERNER BAUWEISE</b>	<b>3</b>
2.1 Einleitung	3
2.2 Wärmedämmung	3
<b>3 FENSTER FÜR GEBÄUDE MODERNER BAUWEISE</b>	<b>9</b>
3.1 Einleitung	9
3.2 Eigenschaften und Anforderungen	9
3.2.1 Energiedurchlassgrad (g - Wert)	9
3.2.2 Wärmedurchgangskoeffizient (U – Wert)	10
3.3 Aufbau	11
3.3.1 Glasarten	12
3.3.1.1 Floatglas / Einfachglas	13
3.3.1.2 Ornament- oder Gussglas	13
3.3.1.3 Borosilikatglas	14
3.3.1.4 Thermisches vorgespanntes Glas / Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG)	14
3.3.1.5 Teilvorgespanntes Glas (TVG)	15
3.3.1.6 Verbundglas (VG)	16
3.3.1.7 Verbundsicherheitsglas (VSG)	16
3.3.1.8 Spezialverglasungen	17
3.3.2 Glasrandverbund	17
3.3.3 Glaseinstand im Rahmen	18
3.3.4 Rahmen	18
3.3.4.1 Materialien und Bauweise	19
3.3.4.2 Einfluss der Fenstergröße auf den Wärmedurchgangskoeffizienten	20
3.3.4.3 Luftdichtheit	20
3.3.5 Gasfüllung im Scheibenzwischenraum	20

3.3.6	Beschichtung	22
3.3.7	Einbau in Fensteröffnung	23
<b>3.4</b>	<b>Glasbruch</b>	<b>23</b>
3.4.1	Rissbildung unter thermischer Einwirkung	25
3.4.2	Auswirkung des Glaseinstandes auf Rissbildung unter thermischer Einwirkung	32
<b>4</b>	<b>BRANDPHÄNOMENE</b>	<b>33</b>
4.1	Auftreten bestimmter Brandphänomene in Gebäuden moderner Bauweise	34
<b>5</b>	<b>LITERATURAUSWERTUNG - FENSTER UNTER BRANDEINWIRKUNG</b>	<b>35</b>
<b>5.1</b>	<b>Versuche von Shields et al.</b>	<b>35</b>
5.1.1	Versuchsanordnung:	35
5.1.2	Versuchsdurchführung:	35
5.1.3	Versuchsergebnisse:	36
<b>5.2</b>	<b>Versuche von Klassen et al.</b>	<b>39</b>
5.2.1	Kleinmaßstäbliche Versuche	39
5.2.2	Großmaßstäbliche Versuche	40
5.2.3	Versuchsergebnisse:	41
5.2.3.1	Kleinmaßstäbliche Versuche	41
5.2.3.2	Großmaßstäbliche Versuche	43
<b>6</b>	<b>VERSUCHSAUFBAU ZUR UNTERSUCHUNG DER THERMISCHEN STABILITÄT VON VERGLASUNGEN</b>	<b>44</b>
<b>6.1</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>44</b>
6.1.1	Messtechnik und Dokumentation	49
6.1.2	Verwendete Fenster	61
<b>7</b>	<b>UNTERSUCHUNG DER THERMISCHEN STABILITÄT VON FENSTERN</b>	<b>62</b>
<b>7.1</b>	<b>Versuchsergebnisse</b>	<b>70</b>
7.1.1	Erste Rissbildung	70
7.1.2	Fenster nach der thermischen Belastung - Schadensausmaß	75
7.1.2.1	Versuchsserie 1 (Temperaturniveau 1: niedrig)	75
7.1.2.2	Versuchsserie 2 (Temperaturniveau 2: mittel)	81
7.1.2.3	Versuchsserie 3 (Temperaturniveau 3: hoch)	86

<b>7.2</b>	<b>Zusammenfassung der wesentlichen Versuchsergebnisse zum Verhalten von Fenstern bei Brandbeanspruchung</b>	<b>87</b>
<b>8</b>	<b>GEWALTSAMES ÖFFNEN VON FENSTERN</b>	<b>99</b>
<b>8.1</b>	<b>Gefahren, Techniken und Taktiken</b>	<b>100</b>
8.1.1	Schutzkleidung	100
8.1.2	Handhabung der Werkzeuge	100
8.1.3	Effizienter Ablauf einer Zugangsschaffung durch eine Scheibe	100
<b>8.2</b>	<b>Vergleich der Geräte und Verfahren</b>	<b>101</b>
8.2.1	Versuchsbeschreibung und verwendete Werkzeuge	101
8.2.2	Versuchsdurchführung	102
8.2.3	Versuchsauswertung	103
8.2.3.1	Wärmeschutzverglasung	103
8.2.3.2	Verbundsicherheitsglas	104
8.2.3.3	Einscheiben-Sicherheitsglas	108
8.2.4	Weitere Werkzeuge und Methoden zum mechanischen Zerstören von Verglasungen	109
8.2.4.1	Herausbrechen der Verglasung aus dem Rahmen	110
8.2.4.2	CCS-Cobra® – Cobra Cold Cutting System	111
8.2.4.3	Öffnen von Verglasungen mit Explosivstoffen	112
<b>8.3</b>	<b>Öffnen über Anlagentechnik oder konstruktive Schwachstellen</b>	<b>122</b>
8.3.1	Sollbruchstellen	122
8.3.2	Konstruktive Schwächung der Fensterkonstruktion	122
8.3.3	Öffnung über Anlagentechnik	123
<b>8.4</b>	<b>Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zum mechanischen Zerstören von Fenstern</b>	<b>124</b>
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>126</b>
<b>10</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>128</b>

### **Bemerkung zu den vorliegenden Untersuchungen**

**Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie verbunden.**

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Zerstörte Hausfassade, welche mit einem brennbaren WDVS wärmegeklämmt war [Widetschek /41/] .....	7
Abbildung 3-1: Schematischer Aufbau von Wärmeschutzverglasungen [Bauhaus /4/] .....	12
Abbildung 3-2: Doppelscheibeneffekt nach [SANCO /35/].....	21
Abbildung 3-3: Verformung einer Glasplatte bei Krafteinwirkung [Wagner, E. /38/] ...	23
Abbildung 3-4: Entstehung von Tangentialbrüchen [Wagner, E. /38/] .....	24
Abbildung 3-5: Entstehung von Ausmuschelungen entlang der Bruchkanten [Wagner, E. /38/].....	24
Abbildung 3-6: Lasteinwirkung bei VSG [Wagner, E. /38/].....	25
Abbildung 3-7: Typisches Aussehen eines thermischen Sprunges [Wagner, E. /38/]	27
Abbildung 3-8: Thermisch induzierte Spannungen bei Teilerwärmung in der Scheibenfläche und kalten Randbereich [Wagner, E. /38/].....	27
Abbildung 3-9: Thermische Sprünge mit unterschiedlich hoher Bruchspannung [Wagner, E. /38/].....	28
Abbildung 6-1: Wärmestrahlwand mit Abmessungen [FFB] .....	45
Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit Thermoelementen an verschiedenen Positionen der Rauchschiicht.....	46
Abbildung 6-3: Versuchstand mit eingebautem Fenster.....	47
Abbildung 6-4: Versuchstand: Unterschiedliche warme Zonen mittels Disconebel visualisiert (Blick auf Wärmestrahlwand).....	48
Abbildung 6-5: Wärmebildaufnahme im inneren Bereich der Versuchsanordnung (Blick auf das Fenster).....	48
Abbildung 6-6: Position der Messstellen im Fensterbereich (Vorderseite des Fensters = wärmezugewandte Seite) .....	52
Abbildung 6-7: Bi-direktionale Strömungsmesssonde mit Thermoelement im Spalt Einhausung und Fenster .....	53
Abbildung 6-8: Frontalansicht Kalibrierplatte (Calciumsilikat-Dämmplatte) mit Wärmeflussaufnehmern und Thermoelementen.....	54
Abbildung 6-9: Versuchstand mit Wärmebildkamera (Bild oben links: Fotoaufnahme der Firma FLIR, <a href="http://www.flir.com">http://www.flir.com</a> /47/).....	58



Abbildung 6-10: Beispiel für eine Wärmebildaufnahme, aufgenommen während eines Versuches mit Fenster (hier: Realbild des Umfeldes, mit Infrarotbild des Fensters überlagert (Bild-im-Bild Modus)) .....	59
Abbildung 7-1: Temperaturverlauf in der Rauchschiicht an der oberen Messstelle TRSo .....	64
Abbildung 7-2: Führung der Thermoelemente zur Messung im verdeckten Glasbereich .....	66
Abbildung 7-3: Bruchbild FV1-6 PVC,2f - keine Thermoelemente im Rahmen .....	67
Abbildung 7-4: Bruchbild FV1-7 Holz, 2f - Thermoelemente im äußeren Rahmenbereich verlegt und mittels Bohrung im Rahmen an die Glasscheibe geführt.....	67
Abbildung 7-5: Zeiten bis zur ersten Rissbildung der wärmezugewandten Innenscheibe.....	73
Abbildung 7-6: Temperaturen bei erster Rissbildung der wärmezugewandten Innenscheibe - Messstelle TVGm, TRSo und TVGo.....	74
Abbildung 7-7: Gegenüberstellung TVRo, TVGo und der resultierenden Temperaturdifferenz $\Delta T_o$ bei erster Rissbildung der wärmezugewandten Innenscheibe.....	75
Abbildung 7-8: Versuch FV1-1 - PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch .....	76
Abbildung 7-9: Versuch FV1-5 - PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch .....	76
Abbildung 7-10: Versuch FV1-6 - PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch .....	77
Abbildung 7-11: Versuch FV1-3 - Holz-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch .....	77
Abbildung 7-12: Versuch FV1-7 - Holz-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch .....	78
Abbildung 7-13: Versuch FV1-4 - PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG (Widerstandsklasse RC2 (früher WK 2)) – Fenster vor und nach dem Versuch.....	78

Abbildung 7-14: Versuch FV1-2 - PVC-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Fenster vor und nach dem Versuch.....	79
Abbildung 7-15: Versuch FV1-8 - Holz-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Fenster vor und nach dem Versuch.....	79
Abbildung 7-16: Versuch FV1-9 - Holz-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Fenster vor und nach dem Versuch.....	80
Abbildung 7-17: Versuch FV2-8 - PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch .....	83
Abbildung 7-18: Versuch FV2-10 - Holz-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch .....	83
Abbildung 7-19: Versuch FV2-11 - PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG (Widerstandsklasse RC2 (früher WK 2)) – Fenster vor und nach dem Versuch.....	84
Abbildung 7-20: Versuch FV2-9 - PVC-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Fenster vor und nach dem Versuch.....	84
Abbildung 7-21: FV2-9 PVC,3f (Passivhaus): Platzen aller drei Scheiben der Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung zeitgleich.....	85
Abbildung 7-22: Versuch FV2-13 - Holz-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Fenster vor und nach dem Versuch.....	85
Abbildung 7-23: Versuch FV2-13 - Holz-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Versuchszeit: ca. 30 min.....	86
Abbildung 7-24: Versuch FV2-13 - Holz-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Fenster vor und nach dem Versuch.....	86
Abbildung 7-25: FV1-3 Holz,2f: Temperatureinwirkung auf den Holzrahmen nach 10 Minuten (Temperaturniveau 1).....	91
Abbildung 7-26: FV2-10 Holz,2f – Fensterrahmen bei Versuchsende (Temperaturniveau 2).....	92
Abbildung 7-27: FV2-10 Holz,2f – Querschnitt des Holzrahmens nach Versuchsende (Temperaturniveau 2).....	92
Abbildung 7-28: FV2- 8 PVC 2f – Fensterrahmen bei Versuchsende (Temperaturniveau 2).....	93
Abbildung 7-29: FV 1-4: Aufgeschnittener Rahmen (Temperaturniveau 1) .....	94

Abbildung 7-30: Starke Verrauchung der Versuchshalle bei Versuchsende bei Versuch FV2-11 (PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG).....	95
Abbildung 7-31: Blasen- und Fingerbildung der Folie bei Versuch FV2-11 (PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG). .....	96
Abbildung 7-32: Verfärbung der geschmolzenen Folie an den Rissen (Versuch FV2-11 (PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG).....	97
Abbildung 7-33: Flammenbildung aus Rissen (Versuch FV2-11 (PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG).....	97
Abbildung 7-34: Flammenzungen bis zur Scheibenmitte, Rahmen brennt (Versuch FV2-11 (PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG). .....	98
Abbildung 8-1: Gewaltiges Öffnen von Sicherheitsverglasungen - Reihenfolge der Schneidvorgänge (Bild links: Einsatz von Handwerkzeugen, Bild rechts: Einsatz von motorbetriebenen Werkzeugen) nach Stone und Percher /31/.....	101
Abbildung 8-2: Verwendete Werkzeuge und PSA .....	102
Abbildung 8-3: Rissbildung nach Wegnahme der Schneidbrennerflamme .....	104
Abbildung 8-4: Feine Rissbildung nach schneller Abkühlung durch Hohlstrahlrohr..	104
Abbildung 8-5: Bruchbild - VSG Scheibe nach mehrmaligen Hammerschlägen.....	105
Abbildung 8-6: Einsatz des Trennschleifers an VSG – Scheibe .....	106
Abbildung 8-7: Meißelhammer an VSG – Scheibe .....	107
Abbildung 8-8: ESG - Scheibe zerspringt beim fünften Hammerschlag .....	108
Abbildung 8-9: Schematische Darstellung: Bruchbild von ESG – Bild links: Scheibenansicht, Bild rechts: Bruchquerschnitt [Wagner, E. /38/].....	109
Abbildung 8-10: Hydraulik-Hebezeug Büffel (Bildquelle: Webseite der WEBER-Hydraulik GmbH, Güglingen, 2013) .....	111
Abbildung 8-11: Hydraulischer Türöffner (Bildquelle: Webseite der LUKAS Hydraulik GmbH, Erlangen, 2013) .....	111
Abbildung 8-12: Versuch 1: Sprengung von VSG mit Sprengfolie.....	114
Abbildung 8-13: Versuch 2: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt.....	115
Abbildung 8-14: Versuch 3: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt.....	115
Abbildung 8-15: Versuch 4: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt.....	116
Abbildung 8-16: Versuch 5: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt.....	117

Abbildung 8-17: Versuch 6: Sprengung von VSG mit Schneidladung .....	118
Abbildung 8-18: Versuch 7: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt.....	118
Abbildung 8-19: Versuch 8: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt.....	119
Abbildung 8-20: Versuch 9: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt.....	119
Abbildung 8-21: Versuch 10: Sprengung von Passivhausfenster (Floatglas, 3-fach) mit Sprengschnur, verdämmt .....	120
Abbildung 8-22: Versuch 11: Sprengung von VSG aus TVG (2-fach) mit Sprengschnur, verdämmt.....	121
Abbildung 8-23: Außenansicht - ICE Fenster mit Sollbruchstelle .....	122

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: U-Werte verschiedener Baustandards im Vergleich .....	3
Tabelle 2-2: Verschiedene Dämmstoffe im Überblick [Pregizer /28/] .....	4
Tabelle 2-3: Massivbauweise und Leichtbauweise im Vergleich [Pech, et al. /26/] .....	6
Tabelle 3-1: Einfluss des Scheibeneinstandes auf den U – Wert [Gabriel und Ladener /17/].....	18
Tabelle 3-2: Druckanstieg im SZR nach idealem Gasgesetz (Raumtemperatur: 20°C, Luftdruck: 1,01325 bar) .....	22
Tabelle 3-3: Festigkeiten von Verglasungen (Auszug aus einer Tabelle nach [Interpane /34/]) .....	29
Tabelle 3-4: Lineare Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Materialien nach Wagner, E. /38/.....	30
Tabelle 5-1: Versuchsergebnisse [Shields et.al. /21/].....	36
Tabelle 6-1: Messstellenliste .....	50
Tabelle 6-2: Details der verwendeten Fenster .....	61
Tabelle 7-1: Details der verwendeten Fenster .....	62
Tabelle 7-2: Einstellungen des Luft- und Flüssiggasverbrauchs der Wärmestrahlwand bei den Versuchen zu Gruppe 1 .....	63
Tabelle 7-3: Einstellungen des Luft- und Flüssiggasverbrauchs der Wärmestrahlwand bei den Versuchen zu Versuchsserie 2 .....	68
Tabelle 7-4: Einstellungen des Luft- und Flüssiggasverbrauchs der Wärmestrahlwand bei den Versuchen zu Versuchsserie 3 .....	68
Tabelle 7-5: Auftreten der ersten Rissbildung – Messwerte für diverse Temperaturen und Wärmeströme. ....	71
Tabelle 7-6: Zerfall der inneren Scheibe (wärmezugewandte Seite).....	81
Tabelle 7-7: Zerfall der mittleren Scheibe bei den Passivhausfenstern .....	81
Tabelle 7-8: Zerfall der äußeren Scheibe.....	82
Tabelle 7-9: Fensterversuche - Zusammenstellung .....	87
Tabelle 7-10: Versagenszeiten der Fenster.....	89
Tabelle 8-1: Verwendete Werkzeuge für Versuche.....	103
Tabelle 8-2: Geeignete Werkzeuge für Verglasungen.....	124

# 1 Einleitung

Aufbauend auf den bisherigen Forschungsergebnissen der Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zu brandschutzrelevanten Aspekten von Gebäuden in moderner Bauweise (hier: Niedrigenergiehäuser, Passivhäuser, Nullenergiehäuser, Plusenergiehäuser, siehe Kunkelmann, Brein /1/) werden hier zur Ergänzung einige wesentliche Faktoren, die zu einem gesteigerten Brandrisiko führen können, experimentell untersucht und bewertet. Daraus werden Lösungsansätze für ein zielgerichtetes, schnelles und vor allem sicheres Eingreifen der Feuerwehr abgeleitet.

Konstruktive Merkmale dieser Gebäude wurden ausführlich in obengenannter Arbeit dargestellt.

Die bisherigen Ergebnisse zeigten unter anderem, dass bei Bränden in diesen Gebäuden Probleme in erster Linie aufgrund des Wärmestaus zu erwarten sind. Verursacht wird dieser durch die großen Dämmstoffdicken, die luftdichte Gebäudehülle und die hochwertigen Verglasungen.

In der vorliegenden Arbeit werden zwar einige ergänzende Ausführungen zur Wärmedämmung im Hinblick auf die Brandübertragung und Feuerüberschlag gemacht, das Hauptaugenmerk liegt aber auf dem Verhalten von Verglasungen und Fenstern im Brandfall.

Im Zusammenhang sind im Wesentlichen folgende Fragestellungen beim Einsatz von hochwärmedämmten Fenstern in Gebäuden moderner Bauweise zu stellen:

- Kommt es zu einer späteren Zerstörung der Verglasung aufgrund von Vorspannungen und gleichmäßigerem Aufheizverhalten sowie durch höhere mechanische Stabilität der Fenster?
- Wie wirkt sich dies auf das Brandgeschehen in Gebäuden moderner Bauweise und auf den Einsatzablauf der Feuerwehr aus?
  - Ergeben sich hierdurch längere Vorbrennzeiten mit später Brandmeldung, da der Rauchaustritt nach außen erheblich verzögert wird?

- Ergibt sich ein größerer Wärmestau in den Räumen?
- Kann es vermehrt zu unterventilierten Brandverläufen und Brandphänomenen wie Rauchdurchzündung/Rollover und Backdraft kommen, da die Frischluftzufuhr zum Brandherd gegenüber einer herkömmlichen Bauweise durch Verzögerungen in der thermischen Zerstörung der Verglasungen nicht gewährleistet ist?
- Ist Rauch- und Wärmeabführung schwierig, weil Verglasungen einen hohen mechanischen Widerstand aufweisen, Dachfenster häufig nicht vorhanden sind?
- Ist der Angriffsweg von außen über die Fenster durch hohe Standfestigkeit der Verglasungen eingeschränkt, oder nicht möglich?

Daraus resultierend kann sich für den Feuerwehreinsatz eine Verkürzung der noch zur Verfügung stehenden Reaktionszeiten für die Personenrettung im Vergleich zu konventionell errichteten Gebäuden ergeben insbesondere dann, wenn bauliche Rettungswege ausgefallen sind und Rettung sowie Löschangriff über die Fassadenöffnungen erfolgen müssen.

Für die Einsatzkräfte der Feuerwehr erscheint dabei die Zerstörung der Fenster als einzig möglicher Ausweg, um eine drohende Gefahr einer Rauchgasdurchzündung oder eines Backdraft zu verringern, da durch die infolge des Versagens von Verglasungen nach thermischer Belastung beziehungsweise durch deren manuelles Zerstören geschaffenen Abströmöffnung(en) ins Freie effektiver Rauch- und Wärmeabzug hergestellt werden kann. Hierbei ist unterstellt, dass der Brand nicht durch eine automatische ortsfeste Wasserlöschanlage (z.B. Sprinkler- oder Wassernebellöschanlage) frühzeitig bekämpft wird, wodurch die in dieser Arbeit beschriebenen Gefährdungen zweifelsohne erheblich verringert würden.

Daher werden im Rahmen dieser Arbeit das thermische und mechanische Verhalten von Fenstern unterschiedlicher Bauarten und Baustoffe untersucht und in Folge Empfehlungen für die Einsatzpraxis vorgestellt.

## 2 Konstruktionsmerkmale von Gebäuden moderner Bauweise

### 2.1 Einleitung

Im Folgenden werden einige ergänzende konstruktive Merkmale in Erweiterung zu den Ausführungen von Kunkelmann und Brein /1/ bei mit denen die für Gebäude moderner Bauweisen geforderten hohen energetischen Ausnutzungsgrade erreicht werden können, beschrieben.

### 2.2 Wärmedämmung

Zur Minimierung der Wärmeverluste ist für Gebäude moderner Bauweise eine gute Wärmedämmung mit hohen Dämmstoffstärken erforderlich.

Einen Überblick über die Entwicklung der Anforderungen an die Wärmedämmung bzgl. des U-Wertes an Außenwände, Decken, Kellerdecke und Dach gemäß der Wärmeschutzverordnung [WSchV /8/], der Energieeinsparverordnung [EnEV /9/] sowie den Richtlinien des Passivhaus Instituts [PHI /16/] gibt die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 2-1: U-Werte verschiedener Baustandards im Vergleich <sup>1</sup>

	Wärmeschutzverordnung WSchV U-Wert [W/(m <sup>2</sup> ·K)]			Energieeinsparverordnung EnEV U-Wert [W/(m <sup>2</sup> ·K)]				Passivhausinstitut PHI U-Wert [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
	1977	1982	1995	2002	2004	2007	2009	
Außenwand:	1,55	1,20	0,50	0,45	0,45	0,45	0,28	0,15
Decken:	0,45	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,28	0,15
Kellerdecke:	0,80	0,55	0,50	0,40	0,40	0,40	0,35	0,15
Dach:	0,45	0,45	0,30	0,30	0,25	0,25	0,29	0,15

---

<sup>1</sup> Die Werte der Wärmeschutzverordnungen beziehen sich auf den früheren k-Wert, die der Energieeinsparverordnungen und des Passivhausinstitutes auf den U-Wert.



In Gebäuden moderner Bauweise werden konventionelle Dämmstoffe (z.B. Stein- und Glaswolle, Mineralschaum, Polyurethan-Hartschaum, Polystyrol-Partikelschaum oder Vakuumdämmplatten) und wahlweise alternative Dämmstoffe, zum Beispiel solche aus Recyclingprodukten oder aus Naturprodukten (Zellulosedämmstoffe, Holzfasern, Baum- und Schafwolle, Kork, Flachs, Hanf, Kokosfasern) zur Wärmedämmung (und auch aus Schallschutzgründen) verwendet.

Der Wärmedurchgangskoeffizient eines Bauteiles ist abhängig von dessen Material und dessen Dicke. Als Maß für den Wärmedurchgang gilt die Wärmeleitfähigkeit. Wird ein Bauteil aus mehreren unterschiedlichen Materialien aufgebaut, so addieren sich die einzelnen Wärmedurchgangskoeffizienten der Materialien zu einem Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten [Feist /15/].

In nachfolgender Tabelle sind einige exemplarische Werte für die Wärmeleitfähigkeit und der Baustoffklasse unterschiedlicher Materialien aufgetragen.

Tabelle 2-2: Verschiedene Dämmstoffe im Überblick [Pregizer /28/]

<b>Wärmedämmstoff:</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit [W / m*K] (bei 20 °C):</b>	<b>Baustoffklasse nach DIN 4102-1 (im Regelfall):</b>
Baumwolle	0,040	B 2
Holzfasern	0,050 - 0,060	B 2
Holzwolle - Leichtbauplatten	0,090 - 0,150	B 1
Kokosfasern	0,05	B 2
Kork	0,045 - 0,055	B 2
Mineralfasern	0,035 - 0,045	A1 / A2
Mineralische Schüttungen	0,040 - 0,060	A 1
Polystyrol - Extruderschaum	0,030 - 0,035	B 1
Polystyrol - Hartschaum	0,035 - 0,045	B 1
Polyurethan - Hartschaum	0,025 - 0,035	B 1 / B 2
Schafwolle	0,040 - 0,045	B 2
Schaumglas	0,040 - 0,055	A 1
Vakuum - Wärmedämmung	0,004 - 0,008	-
Zellulose	0,040 - 0,045	B 2

Die Außenwände eines Gebäudes bilden meist den größten Anteil an der Gebäudehülle. Mit **massiven** Bauteilen können die geforderten Wärmedurchgangswerte bei noch vertretbaren Wanddicken nicht erfüllt werden.

Um den bei Gebäuden moderner Bauweise angestrebten Wärmedurchgangskoeffizienten U (früher k-Wert) von  $\leq 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  zu erreichen, müssten nach [Grobe /19/] im konventionellen Bau verwendete einschalige Massivwände aus beispielsweise porierten Leichtziegeln eine Dicke von ca. 1 m aufweisen.

Da diese Konstruktion die nutzbare Fläche verkleinern würde, gibt es Wandkonstruktionen, die mit zusätzlicher Wärmedämmung auch bei erheblich geringeren Wanddicken die angestrebten U-Werte erreichen:

- Massivbauweise: Mauerwerk oder Massivholz mit Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) mit unterschiedlichen Dämmstoffen wie z.B. Stein- und Glaswolle, Mineralschaum, Polyurethan-Hartschaum, Polystyrol-Partikelschaum oder Vakuumdämmplatten. (z.B. Steinstärke 15 – 17,5 cm, Wärmedämmung: 25 - 40 cm, Putz)
- Leichtbauweise: Holzrahmenkonstruktion mit alternativen statt konventionellen Dämmstoffen, z.B. aus Recyclingprodukten oder Naturprodukten (z.B. Zellulosedämmstoffe, Holzfasern, Baum- und Schafwolle, Kork, Flachs, Hanf, Kokosfasern) .

Bei der Massivbauweise werden in der Regel die Dämmstoffe außenseitig angebracht, bei der Leichtbauweise erfolgt die Wärmedämmung über die im Ständerzwischenraum angeordneten Dämmstoffe [Grobe /19/].

Tabelle 2-3 vergleicht und begründet die sich aus verschiedenen Charakteristiken der beiden genannten Bauweisen in der Praxis ergebenden Auswirkungen bzw. Einschränkungen.

Tabelle 2-3: Massivbauweise und Leichtbauweise im Vergleich [Pech, et al. /26/]

	<b>Massivbauweise</b>	<b>Leichtbauweise</b>
<b>Wärmespeicherfähigkeit</b>	hoch	gering
<b>Wärmebrücken</b>	vermeidbar - Einhüllung des gesamten Gebäudes in Außendämmschicht	nicht ganz vermeidbar
<b>Platzbedarf</b>	hoch, da dickerer Wandaufbau durch Außendämmung	gesamte Wandstärke nutzbar, im Verhältnis kleiner
<b>Dämmstoffarten</b>	keine Schüttungen	nahezu alle Dämmstoffe einsetzbar

Dämmstoffe stellen unter Umständen eine zusätzliche Gefahrenquelle im Brandfall dar, wenn sie brennbar sind (und zusätzlich zum Gebäudeinhalt mit offener Flamme abbrennen und hierbei die Brandausbreitung beschleunigen), oder wenn sich bei hinreichender Aufheizung – auch unter weitgehendem Luftabschluss - Glutnester in ihnen bilden können. Diese Glutbrände sind zum Teil schwierig zu orten und zu bekämpfen.

Flammenlängen betragen bei Raumbränden mit zerstörten Fenstern sowie Vollbränden an Fassaden oft mehrere Meter mit entsprechend hoher Wärmestrahlung.

Die Gefahr des Feuerüberschlages auch auf das übernächste Stockwerk ist hierdurch, besonders bei Mitbrennen brennbarer Fassaden in einem fortgeschrittenen Brandstadium, beträchtlich erhöht.

Des Weiteren sind nicht nur Gefahren durch Abbrennen von Dämmstoffen zu beachten, sondern ebenso in der Vorphase das mögliche Freisetzen toxischer Bestandteile unter Wärmeeinwirkung.

Da das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit nicht auf der Bewertung des Einflusses von brennbaren Fassaden auf das Brandgeschehen liegt, werden die weiteren Ausführungen im Hinblick auf die derzeit in Fachkreisen laufenden Diskussionen zu brennbaren WDVS, die ihre Ursache in spektakulären Brandfällen in jüngerer Zeit haben, nicht vertieft.

Nach [Widetschek /41/] und [Wimmer /42/]) kommt es immer häufiger zu Bränden unter Beteiligung der Fassaden, bei denen auch verschäumte Kunststoffe zur Wär-

medämmung eine große Rolle spielen. Durch evtl. Vollbrand dieser Fassaden ist es der Feuerwehr und den Rettungskräften nicht mehr möglich, den 2. Rettungsweg durch Anleitern zu verwenden. Weiterhin kommt es in der Regel auch zu einer Brandweiterleitung in das Gebäude selbst und zu einer Verrauchung des Treppentraumes. Somit sind der erste und der zweite Rettungsweg für die Bewohner nicht mehr nutzbar.



Abbildung 2-1: Zerstörte Hausfassade, welche mit einem brennbaren WDVS wärmedämmt war [Widetschek /41/]

Das Verhalten derartiger Fassadensysteme im Brandfall grundsätzlich schon lange bekannt war, zeigt der Hinweis auf einen Versuchsbericht aus 1988. Es wurden dort [Brein und Seeger /3/] jeweils ein schwerentflammbares und ein nichtbrennbares Wärmedämmverbundsystem in Großbrandversuchen einem Raumbrand mit aus dem Fenster herausschlagenden Flammen ausgesetzt.

Die Gesamthöhe des zweigeschossigen Versuchsgebäudes mit jeweils einer Fensteröffnung pro Geschoss betrug 7,2 m. Die Fassade wies eine Z-Form auf, mit der Fensteröffnung im Mittelteil des „Z“. Das WDVS wurde in die Schenkel des „Z“ fortgeführt, so dass eine gedämmte Innenecke und eine gedämmte Außenecke entstanden. Als Brandlast wurden im Brandraum insgesamt 625 kg Holzkrippen entsprechend 30 kg/m<sup>2</sup> „Holzgleichwert“ verwendet. Während der Phase des vollentwickelten Raumbrandes wurden dabei etwa 6 MW Wärmeleistung erzeugt. Die Branddauer betrug jeweils etwas mehr als 30 Minuten.

Bei dem schwerentflammbareren Wärmedämmverbundsystem breitete sich der Brand im wesentlichen in vertikaler Richtung über den Flammeneinwirkungsbereich hinaus weiter aus, die horizontale Ausbreitung blieb auf die Wand mit den Fenstern und die Seitenwand (= an die Innenecke angrenzender gedämmter Fassadenabschnitt) beschränkt. Eine Brandausbreitung über die Außenecke hinaus fand nicht statt. Das nichtbrennbare Wärmedämmverbundsystem trug dagegen weder zur horizontalen noch zur vertikalen Brandausbreitung bei.

Das schwerentflammbare Wärmedämmverbundsystem war auf der brandzugewandten Seite mit Ausnahme des nichtbrennbaren Gerüsts des Armierungsgewebes praktisch völlig zerstört, wobei sich in einer späten Phase des Brandes ein Großteil des gesamten Aufbaus von Wand und Seitenwand gelöst hatte. Das nichtbrennbare Wärmedämmverbundsystem wies hingegen nur im unmittelbaren Bereich der Flammeneinwirkung stärkere Beschädigungen auf und trug nicht zu einer Brandausbreitung an der Fassade bei. Dabei blieb der Schichtenaufbau voll erhalten.

Diese Erkenntnisse sind somit nahezu 25 Jahre alt. Zwischenzeitlich vorgenommene konstruktive Änderungen an brennbaren WDVS können aber nur bei sorgfältiger handwerklicher Ausführung greifen. Es ist allerdings auch nicht auszuschließen, dass der Beitrag brennbarer WDVS zum Brandgeschehen durch die heutzutage erheblich größeren Dämmschichtdicken als noch von 25 Jahren üblich deutlich höher ausfallen kann. Die Wärmedämmung mit großen Dämmstoffdicken führt theoretisch zu einem schnelleren Aufheizen im Brandfall.

Vergleicht man die Anforderungen des Passivhausinstitutes [PHI /16/] mit einem U-Wert von  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  mit einer Außenwandkonstruktion eines Bestandsgebäudes aus einer Ziegelkonstruktion ohne Wärmedämmung von 24 – 36 cm Dicke und einem U-Wert von ca.  $0,8 - 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , so ist dort der Energieverlust um den Faktor 5 – 10 höher. Dies wirkt sich im Brandfall allerdings nicht erheblich aus, da der Wärmeverlust an die Wand in der Gesamt(wärme)bilanz vergleichsweise gering ist. Bei kurzen Zeiten der Brandeinwirkung ist der Wärmeverlust über Wände nichtlinear anzusetzen und durch die instationäre Wärmeleitungsgleichung bestimmt. Die großen Dämmstoffdicken im Dachbereich behindern eine Öffnung zur Rauch- und Wärmeabfuhr durch die Feuerwehr beträchtlich.

## **3 Fenster für Gebäude moderner Bauweise**

### **3.1 Einleitung**

Die Fenster nehmen bei der Realisierung eines Gebäudes moderner Bauweise eine zentrale Rolle ein. Sie sind traditionell die am schlechtesten gedämmten Flächen, über die viel Energie nach draußen abgegeben wird.

Fenster bestehen im Wesentlichen aus der Verglasung und dem Fensterrahmen.

Die Verglasungen haben zwei widersprüchliche Anforderungen zu erfüllen:

- geringer Wärmedurchgang zur Verminderung von Transmissionswärmeverlusten,
- hoher Energiedurchlass, damit in der Winterzeit möglichst viel Solarenergie in das Gebäude gelangt.

Durch neuartige Materialien und Aufbauten in Kombination mit einer optimalen Südausrichtung ist es heute möglich, über Fenster zusätzliche Energie zu gewinnen und diese aktiv in das thermische Energiekonzept einzubinden.

### **3.2 Eigenschaften und Anforderungen**

#### **3.2.1 Energiedurchlassgrad (g - Wert)**

Ein Maß für die Nutzung der Sonnenstrahlung bei Verglasungen ist der Energiedurchlassgrad (g-Wert). Er gibt an, welcher Anteil der Energie in Form von Wärmestrahlung durch das Fenster geht.

Übliche g-Werte für Passivhausverglasungen bewegen sich im Bereich um 60 %. [Grobe /19/] Nach Anforderungen des Passivhausinstitutes soll der g-Wert > 50 % sein. [Endhardt, et al. /7/]

### 3.2.2 Wärmedurchgangskoeffizient ( $U$ – Wert)

Nach [Wagner, A. /39/] ergibt sich der Gesamtwärmeverlust  $U_w$  durch ein Fenster mit Einscheibenglas nach der Beziehung

$$U_w = \frac{A_g \times U_g + A_f \times U_f + l_{fg} \times \varphi_{fg}}{A_g + A_f}$$

mit

$U_w$  = Wärmedurchgangskoeffizient [ $W/m^2 \cdot K$ ]

(„w“ bedeutet: „window“)

$A_g$  = verglaste Fläche ohne Glaseinstand (kleinere der beidseitig sichtbaren Flächen)  
[ $m^2$ ]

$U_g$  = Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung ohne Berücksichtigung des Randeinflusses [ $W/m^2 \cdot K$ ]

$A_f$  = Rahmenfläche (größere der von beiden Seiten gesehenen Projektionsflächen)  
[ $m^2$ ]

$U_f$  = Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens ohne Berücksichtigung des Randeinflusses [ $W/m^2 \cdot K$ ], („f“ bedeutet: „frame“)

$l_{fg}$  = Gesamtumfang der Verglasung [m]

$\varphi_{fg}$  = linearer Wärmedurchgangskoeffizient infolge des kombinierten Einflusses von Abstandhalter, Glas und Rahmen [ $W/m \cdot K$ ]

Zur Berücksichtigung der jeweiligen Einbausituation muss in der Gleichung zur Berechnung des Gesamtwärmeverlustes  $U_w$  der Summand ( $s_g \times \varphi_{Einbau}$ ) ergänzt werden.

$\varphi_{Einbau}$  = linearer Wärmedurchgangskoeffizient infolge des Einflusses der Einbausituation [ $W/m \cdot K$ ]

$s_g$  = Gesamtumfang des Rahmens [m]

Der U-Wert von zusammengesetzten Fenstern (Kastenfenster, Verbundfenster) ist durch die Hintereinanderschaltung der raum- bzw. außenseitigen Wärmeübergangswiderstände, der Wärmedurchgangswiderstände der einzelnen Fenster und Flügel und den Wärmedurchlasswiderstand des Raumes zwischen den Verglasungen bestimmt.

Der Wärmedurchgangskoeffizient  $U_g$  von Einfach- und Mehrfachverglasungen ergibt sich nach Wagner, A. /41/] zu

$$U_g = (R_{se} + r + \sum d + \sum R_s + \sum R_{si})^{-1}$$

mit

$U_g$  = Wärmedurchgangskoeffizient von Einfach- und Mehrfachverglasungen [W/m<sup>2</sup>·K]

$R_{se}$  = außenseitiger Wärmeübergangswiderstand [m<sup>2</sup>·K/W]

$r$  = Wärmeleitwiderstand des Glases [m<sup>2</sup>·K/W]

$d$  = Dicke des Glases [m]

$R_s$  = Wärmedurchlasswiderstand des Gaszwischenraumes [m<sup>2</sup>·K/W]

$R_{si}$  = raumseitiger Wärmeübergangswiderstand [m<sup>2</sup>·K/W]

Nach den Konstruktionshandbuch für Passivhäuser des Passivhausinstitutes [PHI /16/] muss bei üblichen Auslegungsbedingungen (-10°C außen, 20°C innen) zum Erreichen einer inneren Oberflächentemperatur des Fensters von mindestens 17°C der Wärmedurchgangskoeffizient  $U_w$  [W/m<sup>2</sup>·K] ≤ 0,8 [W/m<sup>2</sup>·K] betragen.

Zum Vergleich muss entsprechend der [EnEV (2009) /9/] der Wärmedurchgangskoeffizient  $U_w$  [W/m<sup>2</sup>·K] ≤ 1,3 [W/m<sup>2</sup>·K] betragen.

### 3.3 Aufbau

Abbildung 3 – 3 zeigt den schematischen Aufbau verschiedener Fenster mit Zwei- oder Dreischeiben Wärmeschutzverglasung [Bauhaus /4/]. Unter anderem wurden diese Fenster bei den Versuchen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik eingesetzt. Nähere Einzelheiten zu den Fenstern finden sich in Tabelle 6-1.



		<p>2-fach Verglasung PVC-Rahmen 3 - Kammer Basic</p> <p>Bauhaus GmbH &amp; Co. KG Mannheim</p>
		<p>2-fach Verglasung Holzrahmen Holz Fenster Classic</p> <p>Bauhaus GmbH &amp; Co. KG Mannheim</p>
 <p><i>Verbundsicherheitsglasscheibe</i></p> <p><i>außen</i></p> <p><i>Verbundglasscheibe 1</i></p> <p><i>Verbundfolie</i></p> <p><i>Verbundglasscheibe 2</i></p> <p><i>innen</i></p>		<p>2-fach Verglasung PVC-Rahmen 3 - Kammer Basic Seguro Plus VSG (hier nur die Verglasung dargestellt)</p> <p>Bauhaus GmbH &amp; Co. KG, Mannheim</p>
		<p>3-fach Verglasung 6 - Kammer Lux Varmothek</p> <p>Passivhausfenster</p> <p>Bauhaus GmbH &amp; Co. KG Mannheim</p>

Abbildung 3-1: Schematischer Aufbau von Wärmeschutzverglasungen [Bauhaus /4/]

### 3.3.1 Glasarten

Im Fensterbau kommen heute hauptsächlich die im Folgenden beschriebenen Glasarten zum Einsatz. Glasarten mit in der Praxis geringer Bedeutung werden nicht betrachtet.

#### 3.3.1.1 Floatglas / Einfachglas

Die heute vornehmlich verwendete Glasart, wird im Floatverfahren hergestellt [Pech, et al. /27/], bei dem die heiße, viskose Glasmasse in ein flüssiges, ebenes Zinnbecken gegeben wird und sich durch Aufschwimmen der Glasmasse in Folge der Oberflächenspannung und den Viskositäten der Glasschmelze und des Zinnbades eine etwa 6 mm starke, planparallele Glasscheibe ausbildet. Die Temperatur des Glases beträgt beim Eintritt in das Zinnbad etwa 1000°C, an der Austrittsstelle ca. 600 °C. Anschließend wird das Glas spannungsfrei und langsam abgekühlt [Sanco /35/].

Die thermische Wechselstabilität beschreibt die Fähigkeit eines Glases, Temperaturwechsel ohne zu Zerspringen zu überstehen.

Nachfolgend finden sich Angaben zur thermischen Wechselstabilität und zu maximal zulässigen Temperaturen für Floatglas:

- thermische Wechselstabilität von ca.  $\Delta T = 40$  K nach [Wagner, E. /38/],  
( $\Delta T = 40$  K nach [VEGLA /33/])
- maximale kurzzeitige Gebrauchstemperatur: 120 °C nach [Wagner, E. /38/],  
(80°C nach [VEGLA /33/]  $\triangleq$  Wert von VSG aus Floatglas-Scheiben)
- maximale dauerhafte Glastemperatur: 80 °C (60°C nach [VEGLA /33/]  $\triangleq$  Wert von VSG aus Floatglas-Scheiben)

#### 3.3.1.2 Ornament- oder Gussglas

Die Glasschmelze wird nach dem Prinzip der überlaufenden Wanne durch ein Zinnbad zwischen ein oder mehrere Walzenpaare geleitet und erhält dabei die für den jeweiligen Glastyp charakteristische Oberflächenbeschaffenheit [Pech, et al. /27/]. Es können in Abhängigkeit der Walzen- oder Tischflächen verschieden strukturierte oder glatte Oberflächen erzeugt werden. Im Herstellungsprozess besteht die Möglichkeit, ein Drahtnetz in die noch flüssige Glasmasse einzubringen und somit Drahtglas bei zwei glatten Oberflächen beziehungsweise Drahtornamentglas bei zwei strukturierten Oberflächen zu produzieren [Grimm /18/].

Die physikalischen Eigenschaften von Ornament- und Floatglas gleichen sich. Die Biegebeanspruchung ist durch die Oberflächenbeschaffenheit des Ornamentglases jedoch etwas geringer [Sanco /35/].

Die Temperaturwechselbeständigkeit beträgt für Ornamentglas, ähnlich dem Floatglas etwa 30 - 40 K. Die des Drahtglases beträgt hingegen nur ca. 20 K.

### 3.3.1.3 Borosilikatglas

Borosilikatglas hat gegenüber Float- und Fensterglas einen deutlich niedrigeren Ausdehnungskoeffizienten, woraus eine höhere Temperaturwechselbeständigkeit resultiert. Bewerkstelligt wird dies mittels eines 7 - 15 prozentigen Anteils Boroxid an der Glasschmelze [Pech, et al. /27/].

Auf die unterschiedlichen linearen Ausdehnungskoeffizienten bei verschiedenen Werkstoffen und Glasarten wird in Abschnitt 7.5 näher eingegangen.

Borosilikatglas kann im Float-, Zieh-, wie auch im Guss- oder Walzverfahren hergestellt werden und findet wegen seiner Eigenschaften hauptsächlich Anwendung in Bereichen, wo es den Vorteil der hohen Temperaturwechselbeständigkeit ausspielen kann, wie zum Beispiel bei Brandschutzverglasungen.

### 3.3.1.4 Thermisches vorgespanntes Glas / Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG)

Zur Produktion von thermisch vorgespanntem Glas wird eine Scheibe aus Float-, Guss-, oder Flachglas auf den Transformationspunkt (ca. 600°C) erhitzt und anschließend schlagartig mit kalter Luft abgekühlt. Durch die schlechte Temperaturleitfähigkeit kühlen die Oberflächen schneller ab als der Scheibenkern. Es entsteht im Innern der Scheibe eine Zugspannung und an den Oberflächen eine Druckspannung [Wagner, E. /38/]. Die Eigenschaften des Glases verbessern sich hierdurch bezüglich der Biegebeanspruchung und der Temperaturwechselbeständigkeit.

Bei mechanischer Belastung, zum Beispiel durch einen Stoß mit einem Gegenstand, zerfällt das Glas in kleinste, stumpfe Glaskrümel, welche die Verletzungsgefahr vermindern und den Einsatz als Sicherheitsglas und die Anwendung in den vielfältigsten

Bereichen erlauben. Eine Nachbearbeitung durch Schneid- und Bohrwerkzeuge nach dem Vorspannen führt jedoch zur Zerstörung der Scheibe [Grimm /18/ (2004)].

Nachfolgend finden sich Angaben zur thermischen Wechselstabilität und zu maximal zulässigen Temperaturen:

- thermische Wechselstabilität von ca.  $\Delta T = \text{ca. } 150 \text{ K} - 200 \text{ K}$  nach [Wagner, E. /38/] (150 K nach [VEGLA /33/])
- maximale kurzzeitige Gebrauchstemperatur: 250 °C nach [Wagner, E. /38/ ] (300°C nach [VEGLA /33/])
- maximale dauerhafte Glastemperatur: 200 °C nach [Wagner, E. /38/] (250°C nach [VEGLA /33/])

#### 3.3.1.5 Teilvorgespanntes Glas (TVG)

Teilvorgespanntes Glas wird ähnlich dem Einscheiben-Sicherheitsglas hergestellt. Jedoch wird das Glas weniger schnell abgekühlt. Daraus resultiert eine Oberflächenspannung des TVG, die gerade so groß ist, dass bei einem Bruch nur Radialbrüche von Kante zu Kante entstehen. Es dürfen sich dabei keine größeren selbstständigen Scherben aus der Fläche heraus bilden [Sanco /35/ (2004)].

Die Biegefestigkeit liegt ebenso wie die Temperaturwechselbeständigkeit ( $\Delta T = 100 \text{ K}$ ) deutlich über den Werten des Floatglases. Eine Weiterverarbeitung zu Verbund- oder Verbundsicherheitsglas ist möglich, ein nachträgliches Bearbeiten durch Bohren, Schneiden oder ähnliches scheidet hingegen aus [Wagner, E. /38/ ] .

Nachfolgend finden sich Angaben zur thermischen Wechselstabilität und zu maximal zulässigen Temperaturen.

- thermische Wechselstabilität von ca.  $\Delta T = \text{ca. } 100 \text{ K}$  nach [Wagner, E. /38/(2012)] (gleicher Wert bei [VEGLA /33/].
- maximale kurzzeitige Gebrauchstemperatur: 200 °C (keine Angabe bei [VEGLA /33/])
- maximale dauerhafte Glastemperatur: 120 °C nach [Wagner, E. /38/] (200 °C nach [VEGLA /33/])

### 3.3.1.6 Verbundglas (VG)

Verbundglas stellt eine Glaseinheit dar, die aus mindestens zwei über eine Zwischenschicht fest verbundenen Scheiben besteht. Als Zwischenschicht können Gießharze, aber auch verschiedene andere organische und anorganische Verbindungen eingesetzt werden. Bei Ausrüstung der Scheiben mit speziellen Zwischenschichten können diese unter Stromeinwirkung ihre optischen Eigenschaften verändern; so wird aus einer transparenten eine transluzente<sup>2</sup> Scheibe. Verbundglas ohne Sicherheitseigenschaften findet im Schallschutz und für dekorative Zwecke Anwendung [Grimm /18/].

### 3.3.1.7 Verbundsicherheitsglas (VSG)

Verbundsicherheitsglas setzt sich ebenfalls aus zwei oder mehreren Scheiben zusammen, die fest über eine hochreißfeste, zähelastische Zwischenschicht verbunden sind [Fahrenkrog /13/]. VSG ist ein splitterbindendes Glas, bei dem im Fall des Glasbruchs die Bruchstücke an der Folie haften. Anders als bei ESG, das im Bruchfalle zu Krümeln zerfällt, bleibt bei VSG die verglaste Öffnung geschlossen, der Raumabschluss und die Durchsicht erhalten. Diese Resttragfähigkeit bewirkt, dass auch nach dem Bruch der Scheibe Lasten aufgenommen werden können. Kombinationen aus mehreren unterschiedlich dicken Scheiben, verschiedenen Scheibenarten und unterschiedlich dicken Polyvinyl-Butyral-Folienschichten (PVB) geben der Einheit in Abhängigkeit vom jeweiligen Aufbau zusätzliche angriffshemmende Eigenschaften, wie z.B. einbruch-, durchschuss- oder explosionshemmende Wirkung [Wagner, E. /38/]. VSG kann z.B. aus Floatglas, teilvorgespanntem Glas (TVG) oder Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) hergestellt werden. Bei der Verwendung von TVG anstelle von Floatglas ergeben sich eine erhöhte mechanische und thermische Belastbarkeit und eine Resttragfähigkeit bleibt erhalten. Die Kombination mit ESG erhöht die mechanische und thermische Belastbarkeit noch weiter, allerdings fehlt hier die Resttragfähigkeit aufgrund der Krümelbildung beim Bruch der ESG-Scheibe.

Die zwischenschichtbildende Polyvinyl-Butyral-Folie (PVB) kann zudem noch durch Farbe dekorativen Aspekten dienen oder mittels UV-Beschichtung auch dem Son-

---

<sup>2</sup> Eintrüben der Scheibe in Folge von großem Lichteintrag. Scheibe vermindert dadurch die eintreffende Lichtmenge.

nenschutz. Verwendung findet diese Glaseinheit beispielsweise bei absturzsichernden Verglasungen, Mehrscheibenisolierverglasungen, und PKW (Front-)Scheiben.

### 3.3.1.8 Spezialverglasungen

Im Hinblick auf den zunehmenden Wunsch nach Sicherheit und Einbruchschutz in Kombination mit der Entwicklung neuartiger Gläser sind heute auch bei Einfamilienhäusern Verglasungen anzutreffen, die eine erhöhte mechanische Stabilität gegenüber mechanischer Gewalteinwirkung aufweisen. Diese Eigenschaften werden durch die gezielte Abstimmung von Glasstärken und Folien mittels einer VSG – Verglasung realisiert. Gemäß dem gewünschten Anwendungszweck ist das Fenster dabei immer als Gesamtsystem zu sehen. So verliert zum Beispiel ein einbruchhemmendes Glas durch eine ungeeignete Einfassung im Rahmenbereich seine Schutzwirkung.

Vertreter von Spezialgläsern sind:

- Einbruchhemmende Gläser
- Durchbruchhemmende Gläser
- Durchschusshemmende Gläser

### **3.3.2 Glasrandverbund**

Nach [Wagner, E. /38/] hat der Randverbund von Isolierverglasungen die Aufgabe, den Scheibenzwischenraum gegen Wasserdampfdiffusion von außen zu sperren und ihn gleichzeitig gasdicht abzuschließen, um damit die wärmedämmende Eigenschaft von zwischen den Scheiben eingeschlossenen Edelgasen (siehe 3.3.5) dauerhaft zu erhalten.

Damit die Scheiben einen definierten, vom Füllmedium abhängigen Abstand voneinander einhalten, ist der Einsatz von Abstandshaltern erforderlich.

Lange wurden für die Abstandhalter als Werkstoffe ausschließlich Aluminium und zum Teil auch Stahl eingesetzt.

Für Passivhausfenster kommen diese Materialien nicht in Frage, da Aluminium-Abstandshalter eine Wärmebrücke darstellen. Da Aluminium eine gute Wärmeleitfähigkeit besitzt, kühlt sich der Scheibenrand bei niedrigen Außentemperaturen stark ab.

Bei modernen Fenstern werden Schaum- und Kunststoffe auch in Kombination mit Metallen wie z.B. Aluminium und Edelstahl in Randverbundkonstruktionen eingesetzt.

Hierbei kommt z.B. der nichtelastische Kunststoff Polyisobutylen (Butyl) zum Einsatz. Mit einem zweiten, dauerlastischen Dichtstoff aus Polysulfid (Thiokol) wird der Hohlraum außerhalb des Abstandhalter-Profiles bis zu den Scheibenenden ausgefüllt, um die Scheiben dauerhaft miteinander zu verbinden.

### 3.3.3 Glaseinstand im Rahmen

Der Glas (Scheiben-) einstand bezeichnet die Auflagertiefe eines Glases auf einem Verglasungsprofil.

Nach [Interpane /34/ (2011)] beträgt der Glaseinstand  $\frac{2}{3}$  der Falztiefe  $h$ . Um die Wärmebrücken im Übergangsbereich von Glas und Rahmen zu vermindern, ist ein tieferer Glaseinstand anzustreben.

Den Einfluss des Scheibeneinstandes auf den U – Wert spiegelt die nachfolgende Tabelle nach [Gabriel und Ladener /17/] wieder.

Tabelle 3-1: Einfluss des Scheibeneinstandes auf den U – Wert [Gabriel u. Ladener /17/]

Einfluss der Falztiefe auf den U-Wert				
Falztiefe [mm]	U-Wert Rahmen [W/m <sup>2</sup> K]	U-Wert Scheibenmitte [W/m <sup>2</sup> K]	U-Wert Scheibenrand [W/m <sup>2</sup> K]	U-Wert Fenster [W/m <sup>2</sup> K]
20	1,50	1,55	2,00	1,64
25	1,50	1,55	1,93	1,62
30	1,50	1,55	1,85	1,60

### 3.3.4 Rahmen

Während bei normalem Isolierglas der Rahmen noch einen besseren Wärmeschutz als die Verglasung aufweist, kehren sich bei einem Einsatz von Wärmeschutzglas die Verhältnisse um [Feist /15/].

Gewöhnliche Fensterrahmen haben Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_f$ ) zwischen 1,5 und 2 W/m<sup>2</sup>K. Im Vergleich dazu sind in Passivhäusern Fensterrahmen mit  $U_f < 0,8$  W/m<sup>2</sup>K erforderlich [Grobe /19/].

#### 3.3.4.1 Materialien und Bauweise

Für die Fertigung der wärmegeädämmten Rahmen-Profile gibt es unterschiedliche Konstruktionsalternativen und Materialien [Pech, et al. /27/]:

- Holz- und Holzwerkstoffe
  - Auswahlkriterien:
    - Beständigkeit gegen Holz zerstörende Pilze und Insekten
    - Beständigkeit gegen UV-Belastung und Wärmebeanspruchung
    - Quell- und Schwindverhalten des Holzes
    - Technologische Eigenschaften der Verarbeitung (Verleimung, Lackierung etc.)
    - Qualität und Optik der Oberfläche
    - Instandhaltungskosten
- Aluminium: aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit müssen die Aluminium-Hohlprofile durch den Einsatz von Kunststoffstegen thermisch getrennt werden.
- Holz-Aluminium
- Kunststoff: überwiegend PVC in Verbund mit Stahl-Formrohr als tragendes Element aufgrund des niedrigen Elastizitätsmoduls von PVC, zur Verbesserung des Wärmeschutzes mit Mehrkammerprofilen
- Stahl
- Holz-Kunststoff
- Kunststoff-Aluminium
- Verbundwerkstoffe aus Holz, Holzfasern und Kunststoff
- Hochwärmegeädämmte Profile z.B. Holz mit Dämmstoffeinlagen, Ausschäumung der Hohlräume, spezielle Dichtungssysteme



#### 3.3.4.2 Einfluss der Fenstergröße auf den Wärmedurchgangskoeffizienten

Der Rahmen bei Passivhausfenstern stellt hinsichtlich des Wärmeschutzes immer eine Schwachstelle dar [Pregizer /28/]. Aus diesem Grund wird angestrebt, den Rahmenanteil zu minimieren.

Bei einer großen Scheibenfläche wirken sich die schlechteren Wärmedämmeigenschaften des Rahmens gegenüber der Verglasung auf den Wärmedurchgangskoeffizienten des Fensters ( $U_w$ ) weniger gravierend aus als bei kleinen Fenstern mit im Verhältnis hohem Rahmenanteil.

Neben diesem Aspekt stellen auch noch die höheren solaren Wärmegewinne bei größeren Fenstern einen entscheidenden Vorteil gegenüber kleineren Fenstern dar [Huber, et al. /23/].

#### 3.3.4.3 Luftdichtheit

Die angestrebte Luftdichtheit wird mit Dreifachdichtungen zwischen Flügel und Rahmen bei Dreh-Kipp Fenstern realisiert [Sommer /30/].

#### **3.3.5 Gasfüllung im Scheibenzwischenraum**

Statt herkömmlicher Luft, wie sie bei Isolierglas im Scheibenzwischenraum (SZR) eingesetzt wird, finden bei Wärmeschutzverglasungen Edelgase, wie Argon oder Krypton Anwendung. Die besten Werte für den Wärmedurchgangskoeffizienten des Glases ( $U_G$ ) ergeben sich für das seltene und teure Gas Xenon.

Für Anwendungen im Schallschutz wurde früher das heute aus Klimaschutzgründen verbotene Schwefel-Hexafluorid  $SF_6$  eingesetzt [Pech, et al. /27/].

Nach [Sanco /35/] ist der Zwischenraum im Isolierglas hermetisch abgeschlossen. Bei thermischen und barometrischen Veränderungen wirken Kräfte auf die Isolierglaseinheit ein. Dies wird als Doppelscheibeneffekt oder auch Isolierglaseffekt bezeichnet.

Diese Effekte sind abhängig von:

- Einbauhöhe in m über Meereshöhe
- Luftdruckveränderungen
- Temperaturveränderungen
- Strahlungsabsorptionsgrad des Glases
- Größe des Scheibenzwischenraums

- Ungleichen Glasdicken {asymmetrischer Aufbau)
- Elementabmessungen.

Nach [Sanco /35/] sind Isoliergläser mit kleinen Abmessungen oder kurzen Seitenlängen stärkeren Belastungen ausgesetzt als Isoliergläser mit großen Abmessungen. Aus statischen Gründen sind die Scheiben steifer und können bei Druckerhöhung im Scheibenzwischenraum nicht durchbiegen.

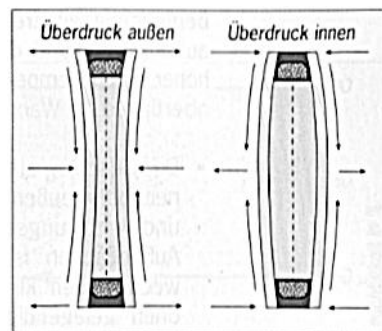


Abbildung 3-2: Doppelscheibeneffekt nach [SANCO /35/]

Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei Dreischeibenverglasungen, da sich hier die Breiten der SZR addieren. Dabei beulen sich die Scheiben in Folge des Gasvolumens aus. Die mittlere Scheibe bleibt dabei starr [Pech, et al. /27/)]. Diese Durchbiegung äußert sich in mehr oder minder starken Verzerrungen der Spiegelbilder bei Betrachtung der Scheiben in der Außenansicht.

Der Isolierglaseffekt hängt von der Scheibengröße und der Breite des Scheibenzwischenraumes ab. Ist dieser Scheibenzwischenraum zu breit, kommt es zu einer starken mechanischen Beanspruchung der Scheibe. Der Isolierglaseffekt ist besonders stark bei Dreifach-Isolierglas, da sich hier die Scheibenzwischenräume addieren.

Inwieweit dieser Effekt im Brandfall zum Reißen, beziehungsweise Platzen der Scheibe führen kann, ist bisher nicht erforscht.

Nach [Pech, et al. /27/] verfügt die Dreifach-Verglasung in Passivhausfenstern zwar gegenüber Zweifach-Verglasungen über den erhöhten Wärmedurchlasswiderstand, jedoch ergeben sich auch Nachteile im Hinblick auf die Weiterverarbeitung,

Größenbegrenzung und Alterungsbeständigkeit (höheres Kondensationsrisiko). Die Schwachstelle bei Isolierglasfenstern stellt bzgl. der Kondensation der Randverbund der Isolierglasscheiben dar. Es kann zu einem Absinken der Oberflächentemperatur an der inneren Isolierglasscheibe im Bereich des Randverbundes kommen und bei Unterschreiten der Kondensat-Grenztemperatur zu Kondensatbildung.

In der nachfolgenden näherungsweisen Berechnung wird auf den Scheibenzwischenraum das ideale Gasgesetz der Thermodynamik angewendet und hierbei das Volumen als konstant angenommen. Hierbei treten bei Veränderung der Temperatur vor der Rissbildung im Glas deutliche Druckanstiege im Scheibenzwischenraum gemäß der nachfolgenden Tabelle auf.

$$p_2 = \frac{p_1 \times T_2}{T_1}$$

Tabelle 3-2: Druckanstieg im SZR nach idealem Gasgesetz (Raumtemperatur: 20°C, Luftdruck: 1,01325 bar)

Temperatur SZR [°C]	Druck SZR [bar]	$\Delta T$ [K]	$\Delta p$ [bar]
100	1,29	80	0,28
200	1,64	180	0,63
300	1,98	280	0,97
400	2,33	380	1,32
500	2,67	480	1,66

### 3.3.6 Beschichtung

Um Energieverluste über Fenster und Fassaden zu minimieren, werden heute sogenannte Low-E-Gläser (Low-Emissivity-Glas (= niedrige Wärmeabstrahlung)) eingesetzt. Hierbei wird eine hauchdünne Metallschicht auf der Basis von Gold, Silber oder Kupfer aufgetragen. Diese Schicht reduziert den Emissionsgrad der Verglasung und dient als Wärme- und/oder Sonnenschutzschicht. Das Emissionsvermögen der Glasoberflächen wird damit von 84 % bei unbeschichtetem Glas auf 4 % gemindert [Sommer /30/].

Da der Anteil der Wärmestrahlung zwei Drittel des Gesamtwärmeverlustes ausmacht, sind die großen Verbesserungen eines beschichteten gegenüber einem nicht beschichteten Fenster nachvollziehbar [Grimm /18/]. Das verbleibende Drittel ergibt sich durch die Wärmeleitung im Randverbund und im Scheibenzwischenraum sowie aus der Konvektion im Scheibenzwischenraum.

Inwieweit sich hieraus Auswirkungen für das Verhalten im Brandfall ergeben ist nicht bekannt.

### 3.3.7 Einbau in Fensteröffnung

Der hohe angestrebte energetische Standard von Rahmen und Verglasungen ist nur in Verbindung mit einer fachgerechten wärmebrückenreduzierten Ausführung der Anschlussfuge zwischen Fensterrahmen und Wandöffnung gewährleistet. Die Anschlussfugen werden daher mit Wärmedämm-Materialien ausgefüllt und mit einem diffusionshemmenden Folienstreifen von innen luftdicht verklebt [Gabriel und Ladener /17/].

## 3.4 Glasbruch

Jedes Material kann aufgrund seiner Eigenschaften Belastungen unterschiedlich stark aufnehmen. Durch die Krafteinwirkung entstehen im Material Spannungen. Ursachen hierfür sind z.B. Erwärmung, Bewegung, Verformung wie Dehnung oder Biegung. Die Druckfestigkeit von Glas ist ca. 10-fach größer als die Zugfestigkeit. Die Hauptkenngröße für die Festigkeit von Glas ist die Biegezugfestigkeit. Sobald die Zugspannungen im Material den kritischen Wert überschritten haben, kommt es zum Versagen und damit zum Glasbruch [Wagner, E. /38/].

Abbildung 3-3 zeigt die Verformung einer Glasplatte bei Krafteinwirkung.

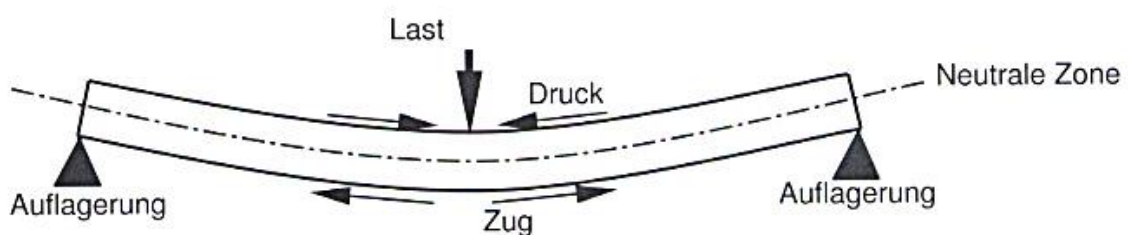


Abbildung 3-3: Verformung einer Glasplatte bei Krafteinwirkung [Wagner, E. /38/]

Bei dieser mechanischen Belastung kommt es nach Überschreiten der kritischen Spannung nach Abbildung 3-4 zum Bruch und zusätzlichen zu Tangentialbrüchen. Es kann auch zu Ausmuschelungen an den Bruchkanten kommen, Abbildung 3-5.

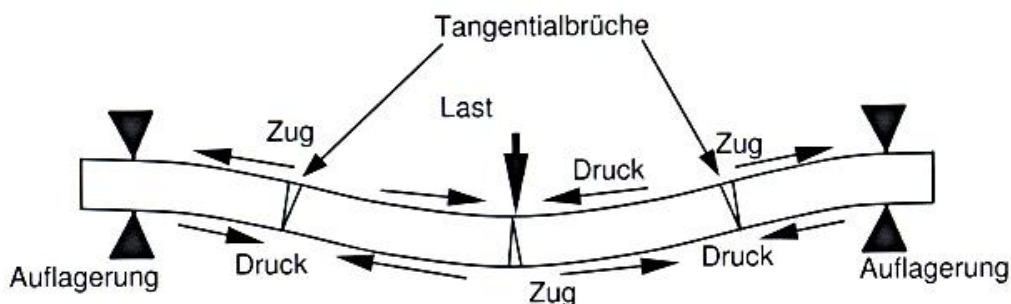


Abbildung 3-4: Entstehung von Tangentialbrüchen [Wagner, E. /38/]

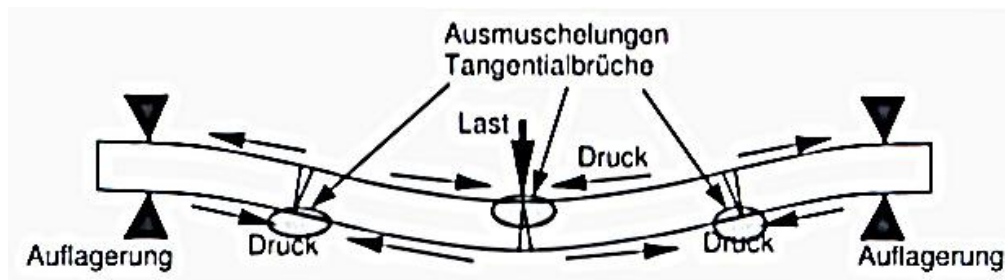


Abbildung 3-5: Entstehung von Ausmuschelungen entlang der Bruchkanten [Wagner, E. /38/]

Hierbei hat die Kante der Glasscheibe entscheidenden Einfluss. Je tiefer die Kerbe, umso höher ist die Bruchanfälligkeit bei Glas. Eine ideale Glaskante ohne jegliche Kerben hätte demzufolge eine extrem hohe Belastbarkeit der Scheibe zur Folge. Da eine solche Kante jedoch aufgrund der Bearbeitungsart von Glas nicht möglich ist, beeinflusst die Größe der mikroskopisch kleinen Anrisse (Mikroeinläufe) nach dem Schneiden oder Bearbeiten entscheidend die Belastbarkeit von Glas. Bereits beim Schneiden von Glas wie auch beim Brechen entstehen Mikroeinläufe, aber auch an der Oberfläche von Glas können je nach Belastung Kerben und Anrisse entstehen. Liegen solche Anrisse vor, so treten je nach Anrisstiefe unterschiedlich hohe Spannungsspitzen an der Kerbe auf. Bei eingekerbter, inhomogener Oberfläche und dem Einwirken von Zugkräften treten die höchsten Spannungen direkt an der Kerbe auf. Diese sehr hohen Spannungsspitzen an der Kerbe führen zu gefährlicher Risserweiterung, die bis zum Glasbruch führen kann.

Nach [Wagner, E. /38/] ergibt sich:

- Je tiefer der Anriss, desto geringer die Biegezugfestigkeit, die zum Bruch führt
- Je tiefer der Anriss, desto geringer die Temperaturdifferenz, die zum Bruch führt.

Derselbe Autor schätzt, dass Temperaturdifferenzen innerhalb der Scheibenfläche von ca. 30 – 60°C, wie sie im Hochbau durchaus vorkommen, bereits Anrisstiefen von ca. 0,08 – 0,02 mm Glasbruch auslösen können.

Ebenso bezeichnet er auch die Belastungsdauer bei Glas als entscheidenden Faktor. Kurzfristig auftretenden Lasten kann Glas wesentlich besser widerstehen als lang anhaltenden Belastungen. In Belastungsversuchen an Glasplatten hat man festgestellt, dass kurzzeitig (ca. 1 – 5 s) bis zu doppelt so hohe Belastungen bis zum Glasbruch einwirken können als gegenüber Langzeitlasten (> 24 h).

Abbildung 3-6 zeigt die Lasteinwirkung bei VSG. Glasbruch entsteht dabei zuerst an der mit Zug belasteten Scheibe. Beim Bruch beider Scheiben wird es in der Regel zu deutlichen Ausmuschelungen am Sprung in der Druckzone kommen. Durch evtl. Zurückfedern der Scheibe sind ggf. Ausmuschelungen auch in der Zugzone möglich.

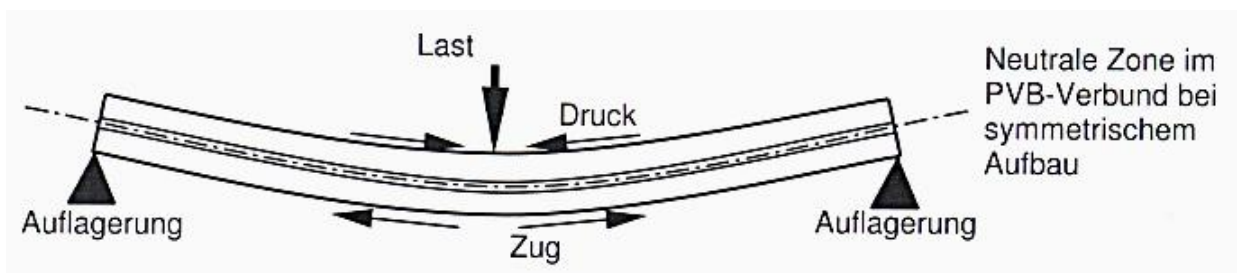


Abbildung 3-6: Lasteinwirkung bei VSG [Wagner, E. /38/]

### 3.4.1 Rissbildung unter thermischer Einwirkung

Nach Fahrenkrog /13/ wird in der Aufheizphase eines Brandes wird die Verglasung zunächst nur in der Mitte der Glasscheibe erhitzt, während der durch den Rahmen

abgedeckte Scheibenrand kalt bleibt. Die heiße Scheibenmitte beginnt entsprechend ihrer Wärmeausdehnung zu expandieren, wird aber durch den kalten Scheibenrand daran gehindert.

In der Mitte der Scheibe entsteht somit eine Druckspannung

$$\sigma_{Druck}$$

und im Randbereich eine Zugspannung

$$\sigma_{Zug}$$

Nach [Wagner, E. /38/] entsteht ein thermischer Sprung immer dann, wenn die typischen Materialkennwerte des Glases in Abhängigkeit der Glaskantenbeschaffenheit und der Temperaturwechselbeständigkeit überschritten werden. Besonders typisch ist hierbei der Einlauf, der von der Glaskante immer im kürzesten Weg zur Kalt-/Warmzone (Druck- oder Zugzone) verläuft. Beim Eintreten in diese Kalt-/Warmzone kommt es dann zu einer deutlichen Richtungsänderung und einem mäanderförmigen weiteren Verlauf, einer ebenfalls typischen Eigenschaft von thermischen Sprüngen. Im Durchlauf ist der Sprung immer rechtwinklig, weil er auch hier nach dem kürzesten Weg verläuft. Damit kann für thermische Sprünge die Aussage getroffen werden, dass der Sprungverlauf immer den Weg des geringsten Widerstandes geht.

Thermische Sprünge sind immer eindeutig aufgrund zweier eindeutiger Parameter zu erkennen:

- rechtwinkliger Einlauf
- rechtwinkliger Durchlauf

Die einzige Ausnahme eines thermischen Sprunges, bei dem diese Aussagen nicht zutreffen, ist der „thermische Wurmsprung“, Abbildung 3-7. Da er weder an der Glaskante beginnt, noch an dieser endet, kann er nicht nach den Kriterien der rechtwinkligen Einlauf- und Durchlaufart zur Glaskante beurteilt werden.

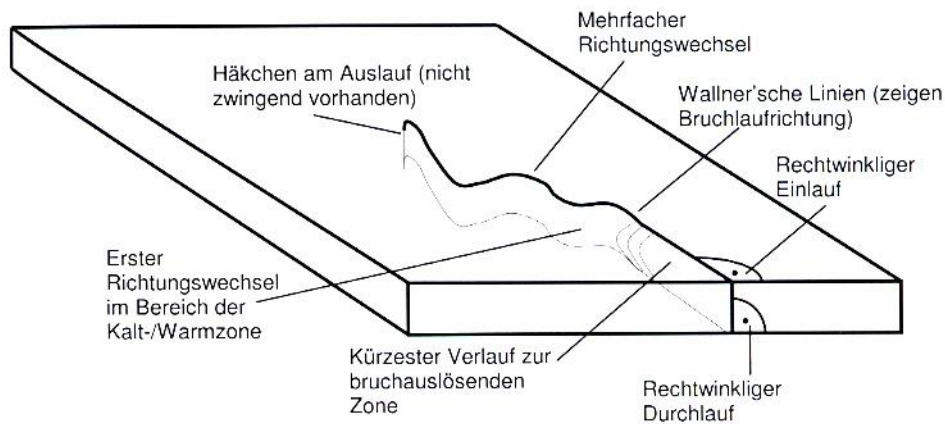


Abbildung 3-7: Typisches Aussehen eines thermischen Sprunges [Wagner, E. /38/]

Abbildung 3-8 stellt die prinzipiellen Spannungsverhältnisse an einem Fenster durch das ungleichmäßige Aufheizverhalten zwischen verdecktem, kaltem Glas im Rahmeneinstand und der heißen Scheibenmitte dar.

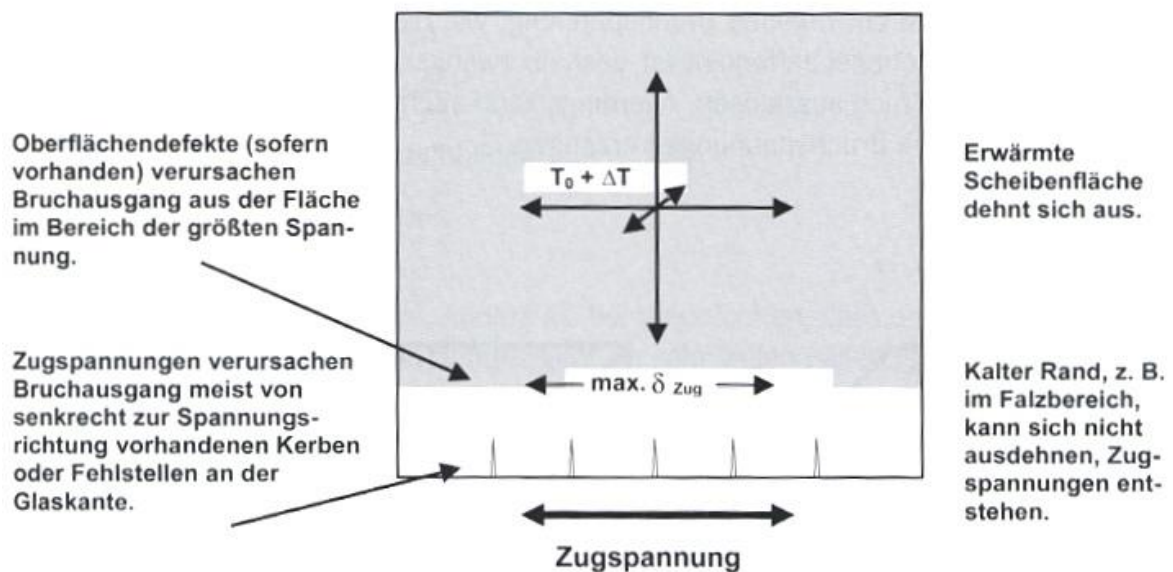


Abbildung 3-8: Thermisch induzierte Spannungen bei Teilerwärmung in der Scheibenfläche und kalten Randbereich [Wagner, E. /38/].

Dabei ist nach [Wagner, E. /38/(2012)] die Verzeigung des Bruchs der Scheibe umso stärker, je höher die einwirkende Bruchspannung ist. Bei sehr guter Kantenbeschaffenheit ist zwangsläufig eine höhere Bruchspannung erforderlich, um den Bruch auszulösen. Allerdings kann auch eine sehr schnelle oder sehr hohe Temperatureinwirkung hohe Bruchspannungen erzeugen, Abbildung 3-9.



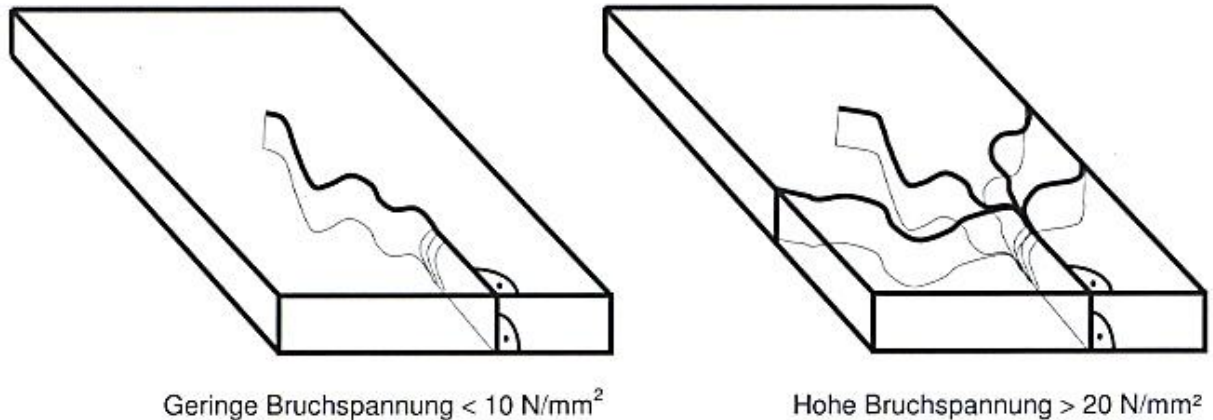


Abbildung 3-9: Thermische Sprünge mit unterschiedlich hoher Bruchspannung  
[Wagner, E. /38/]

In dem Beitrag von [Fahrenkrog /13/] wird ein Rechenverfahren von [Stahn /45/ ] beschrieben, mit dem sich die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  [K] zwischen Scheibenmitte und Scheibenrand, die eine Scheibe ohne Schaden übersteht, ermitteln lässt:

Ist der abgedeckte Scheibenrand schmal gegenüber der nicht abgedeckten Scheibenmitte, dann berechnet sich die Zugspannung nach

$$\sigma_{Zug} = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

mit

$\alpha$  = linearer Ausdehnungskoeffizient [ $K^{-1}$ ]

$E$  = Elastizitätsmodul [ $N/mm^2$ ]

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz zwischen Scheibenmitte und Scheibenrand [K]

Die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ist von der Aufheizgeschwindigkeit des Brandraumes und der Breite der Rahmenabdeckung abhängig.

Überschreitet die entstehende Zugspannung im Randbereich die Festigkeit des Glases in diesem Bereich, so kommt es zum Bruch der Scheibe:

$$\sigma_{Zug} \geq \sigma_{Festigkeit}$$

mit

$\sigma_{Festigkeit}$  = Festigkeit der Scheibe im Randbereich [ $N/mm^2$ ]

Setzt man die beiden vorgenannten Formeln gleich, so kann man die maximale Temperaturdifferenz ermitteln, die eine Scheibe ohne Schäden überstehen kann. Die Festigkeit der Scheibe im Randbereich muss größer sein als:

$$\sigma_{Festigkeit} > \alpha \cdot E \cdot \Delta T$$

Hieraus folgt:

$$\Delta T < \frac{\sigma_{Festigkeit}}{\alpha \cdot E}$$

Die Eingabedaten haben einen entscheidenden Einfluss auf das Berechnungsergebnis des Rechenverfahrens.

Nach [Interpane /34/] ergeben sich z.B. unterschiedliche Werte für die Biegezugfestigkeit  $\sigma_B$  und die zulässigen Spannungen  $\sigma_{zul}$  für unterschiedliche Glasarten und Einbauarten. Einige Beispiele können der folgenden Tabelle 3-3 entnommen werden.

Tabelle 3-3: Festigkeiten von Verglasungen (Auszug aus einer Tabelle nach [Interpane /34/])

	Floatglas	Teilvorgespanntes Glas TVG	Einscheiben- Sicherheitsglas ESG
Biegezugfestigkeit $\sigma_B$	45 N/mm <sup>2</sup>	70 N/mm <sup>2</sup>	120 N/mm <sup>2</sup>
Zulässige Biegezugspannung $\sigma_{zul}$ abhängig von der Anwendung	12 / 18 N/mm <sup>2</sup> *)	29 N/mm <sup>2</sup> **)	50 N/mm <sup>2</sup>
*) 12 N/mm <sup>2</sup> bei Überkopfverglasung bzw. 18 N/mm <sup>2</sup> bei vertikaler Verglasung **) Rechenwert gem. Zulassung			

Nach [Wagner, E. /38/] sind die theoretischen Werte der Biegezugfestigkeit für die Praxis von untergeordneter Bedeutung. Je nach Lastfall werden heute unterschiedliche Werte für die einzelnen Belastungen und Glasarten angegeben. In den vergangenen Jahren haben sich diese Werte durch neue Technische Regeln gegenüber den jahrzehntelang gültigen Werten verändert. In der deutschen Literatur finden sich für ein Glaserzeugnis oft mehrere Werte, die teilweise auch noch abhängig vom Anwendungsfall sind. Aus Gründen der einheitlichen Nutzung von Daten empfiehlt [Wagner, E. /38/] für statische Anwendungen immer die Verwendung der Werte des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin.

Die nachfolgende Tabelle 3-4 zeigt den linearen Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Materialien nach [Wagner, E. /38/], welche das unterschiedliche Verhalten von Rahmenmaterialien und Glasarten bei Erwärmung verdeutlichen. Dieses muss ebenfalls in Berechnungen mit einfließen. Hierauf wird in Abschnitt in Abschnitt 7.5 noch näher eingegangen

Tabelle 3-4: Lineare Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Materialien nach Wagner, E. /38/

Material	Ausdehnungskoeffizient $\alpha$ $K^{-1}$
Spezielle Glaskeramik	0
Zerodur	$< 0,1 \times 10^{-6}$
Kieselglas, Quarzglas	$0,5 \times 10^{-6}$
Diamant	$1,3 \times 10^{-6}$
Silizium	$2,0 \times 10^{-6}$
Borosilikatglas	$3,3 \times 10^{-6}$
Wolfram	$4,6 \times 10^{-6}$
Geräteglas	ca. $5 \times 10^{-6}$
Holz	ca. $5,4 \times 10^{-6}$
Iridium	$7,0 \times 10^{-6}$
Behälterglas	ca. $8,5 \times 10^{-6}$

Tabelle 3–4 (Fortsetzung)

Material	Ausdehnungskoeffizient $\alpha$ $K^{-1}$
Floatglas Kalk-Natronsilikatglas	$9,0 \times 10^{-6}$
Platin	$9,1 \times 10^{-6}$
Eisen und Stahl	$12,2 \times 10^{-6}$
Stahl rostbeständig	$16 \times 10^{-6}$
Nickel	$14,5 \times 10^{-6}$
Konstantan	$15,2 \times 10^{-6}$
Kupfer	$18,5 \times 10^{-6}$
Aluminium	$23,8 \times 10^{-6}$
PVC hart	$78 \times 10^{-6}$

Soll nach [Fahrenkrog /13/] vermieden werden, dass die Glasscheibe während der Aufheizphase im Brandfall zerspringt, gibt es drei Möglichkeiten, den Bruch zu vermeiden:

- Verminderung von  $\Delta T$  durch eine geeignete Scheibeneinfassung
- Erhöhung der Festigkeit im Randbereich der Scheibe
- Verminderung von Glas mit kleiner Wärmedämmung

Die Feuerwiderstandsdauer einer Verglasung wird in erster Linie durch das Viskositätsverhalten des Glases bestimmt. Daneben kommt dem Einbau des Glases in den Rahmen eine ausschlaggebende Bedeutung zu.

Besondere Eigenschaften zeigen auch die in dieser Arbeit untersuchten Verglasungen mit Verbund-Sicherheitsglas (VSG).

### **3.4.2 Auswirkung des Glaseinstandes auf Rissbildung unter thermischer Einwirkung**

Die bei Passivhausfenstern notwendigen hohen Glaseinstände zur Erreichung maximaler U – Werte, (siehe auch Abschnitt 3.3.5) entsprechen nicht den bisherigen Herstellervorgaben. Durch die hohen Glaseinstände befürchteten die Glasproduzenten, dass es leichter zu thermischen Sprüngen kommt.

Berechnungen mittels Computerprogrammen durch das PHI Darmstadt [Feist /15/] ergaben jedoch, dass sich:

- große Temperaturgradienten erst nach längerer Zeit einstellen
- die größten Temperaturgradienten unabhängig vom Glaseinstand immer im Rahmenbereich einstellen
- bei tieferen Glaseinständen das Risiko thermischer Sprünge entgegen der ursprünglichen Annahme geringer einstufen lässt, als bei normalen Glaseinstandstiefen.

## 4 Brandphänomene

Einhergehend mit modernen Bauweisen werden immer wieder besondere Brandphänomene in der Literatur und den Einsatzberichten der Feuerwehren geschildert. Allen voran sind das die im Folgenden beschriebenen Ereignisse des Auftretens von:

- Selbst verlöschenden Bränden
- Rollover
- Flashover
- Backdraft

Auf diese Brandphänomene sowie die Gefährdung durch Brandrauch und Sauerstoffmangel wird bereits von [Kunkelmann /25/] und in Teil 1 dieser Untersuchungen [Kunkelmann, Brein /1/] ausführlich eingegangen.

Nachfolgend werden hierzu einige ergänzende Sachverhalte aufgeführt.

Amerikanische Studien belegen, dass 80% aller Brände in geschlossenen Räumen unterventiliert verlaufen, also zwar ausreichend Brennstoff aber nicht genügend Sauerstoff zur Verfügung steht [Royer /29/].

Aufgrund der luftdichten Bauweise von Gebäuden moderner Bauweise und deren Ausstattung mit hochwertigen Fenstern mit mehreren Scheiben und Beschichtungen sind Einsätze wie beispielsweise der nachfolgend beschriebene bei Feuerwehren heute keine Seltenheit mehr.

Die [Feuerwehr Leonberg /43/] wurde am 17. März 2009 von der Leitstelle zur Nachkontrolle eines erloschenen Brandes gerufen. Vor Ort stellte sich heraus, dass es vor längerer Zeit in der Küche einer Wohnung gebrannt hatte. Der ebenfalls alarmierte Rettungsdienst konnte nur noch den Tod des 19 - Jährigen Bewohners feststellen. Dieser starb vermutlich an einer Rauchgasvergiftung.

Ermittlungen der Polizei zufolge hatte es bereits zwei Tage vor der Alarmierung der Feuerwehr in der Wohnung gebrannt. Brandursache war ein vergessener Kochtopf auf dem Herd.

Die Nachbarn hatten von dem Brand nichts bemerkt, wobei allerdings deutliche Rauchpuren am Küchenfenster der Wohnung und am darüber liegenden Balkon sichtbar waren. Wegen Sauerstoffmangels ist das Feuer von selbst erloschen.

Nach diesen Angaben im Brandbericht ist zu schließen, dass die Fenster bei dem Brandereignis intakt blieben und Brandrauch daher nicht entweichen konnte.

#### **4.1 Auftreten bestimmter Brandphänomene in Gebäuden moderner Bauweise**

Die Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass Gebäude moderner Bauweise grundsätzlich das Auftreten der Brandphänomene Rauchgasdurchzündung und Backdraft begünstigen. Ursächlich hierfür sind vor allem:

- Hohe Wärmedämmung, die einen Wärmestau begünstigt, da Wärme nicht abgeführt werden kann.
- Luftdichte Gebäudehülle, begünstigt das Auftreten von unterventilierten Brandverläufen, verspäteter Brandmeldung und Verlöschen von Bränden.
- Überströmöffnungen ermöglichen unverbrannten, brennbaren Gasen sich durch das ganze Gebäude zu verteilen und damit Bedingungen für einen verlagerten Backdraft zu ermöglichen
- Mehrfachverglasungen, die im Brandfall dem Feuer länger stand halten und daher das Abführen von heißen Rauchgasen, ebenso wie das Zuströmen von Frischluft verhindern. Wärmestau, unterventilierte Brandverläufe und verspätete Brandmeldung sind die Folgen.
- Daneben ist unabhängig von der Bauweise zu beachten, dass die veränderte Brandlast in Räumen von ursprünglich viel naturnahem Material (Massivholzmöbel etc.) hin zu hohen Anteilen an synthetisch hergestellten Kunststoffprodukten das Auftreten dieser Phänomene begünstigt.

## **5 Literaturlauswertung - Fenster unter Brandeinwirkung**

Im nachfolgenden werden Untersuchungen zum Verhalten von Verglasungen unter Brandeinwirkung beschrieben.

### **5.1 Versuche von Shields et al.**

Shields, et.al. /21/ beschreiben Versuche, die sich mit dem Versagen von Doppelverglasungen unter Brandeinwirkung beschäftigen. Es werden die Einflüsse von Scheibengröße und Position der Brandquelle im Raum untersucht und Messungen zur Temperatur und zur Längenausdehnung der Verglasungen durchgeführt

#### **5.1.1 Versuchsanordnung:**

Die Abmessungen des auf einer Abbrandwaage aufgestellten Versuchsraumes betragen 1,7 m Höhe, 1,5 m Breite und 1,6 m Tiefe.

Die Wände wurden in 100 mm dicker Betonbauweise errichtet, der Deckenaufbau bestand aus einer 115 mm dicken, bewehrten Betonschicht, mit einer 15 mm dicken Wärmeschutzplatte. Der Betonboden des Versuchsraumes wurde ebenfalls mit einer 15 mm Wärmeschutzplatte bekleidet. Für die Zuluftsteuerung wurde eine Ventilationsöffnung in einer der Raumecken mit den Abmessungen 1240 mm (Höhe) x 120 mm (Breite) geschaffen.

Als Brandquelle diente eine ca. 19 kg schwere Holzkrippe mit den Abmessungen von ca. 500 mm x 500 mm x 500 mm. Die Holzkrippe war aus 8 Lagen Kanthölzern mit Holzquerschnitten von 30 mm x 30 mm sowie 30 mm Abstand zwischen den Kanthölzern aufgebaut. Während der Versuche wurde die Holzkrippe in einer Ecke oder im Zentrum des Raumes positioniert.

Zur Untersuchung kamen Doppelverglasungen aus Floatglas mit Scheibendicken von je 6 mm.

#### **5.1.2 Versuchsdurchführung:**

Es wurden drei Versuche durchgeführt, bei denen die Position der Brandquelle – Ecke (V1) beziehungsweise Raummitte (V2 und V3), sowie die Größe der Zuluftöffnung variiert (V1 und V2: 1240 mm \* 120 mm, V3: 1050 mm \* 83 mm) und deren Einfluss auf die Stabilität der Doppelverglasung untersucht wurden.



Weiterhin wurden 2 unterschiedlich große Verglasungen bei den Versuchen verwendet (kleine Verglasung: Breite: 787 mm, Höhe: 463 mm, große Verglasung: Breite: 787 mm, Höhe: 965 mm, Glaseinstand: 12,5 mm)

### 5.1.3 Versuchsergebnisse:

Ergebnisse wurden für folgende Versuchsparameter ermittelt:

- Zeit bis zur ersten Rissbildung für innere und äußere Scheibe
- Ausdehnung der inneren und äußeren Scheibe
- Zeit bis zum Versagen der äußeren Scheibe
- Anteil an herausgefallenem Glas aus der äußeren Scheibe

Diese Werte sind der folgenden Tabelle 5-1 zu entnehmen:

Tabelle 5-1: Versuchsergebnisse [Shields et.al. /21/]

Ver- such Nr.	Zeit bis 1. Riss [min]				Dehnung im Randbereich bei Rissbildung [ $\mu\text{s} \triangleq \mu\text{m/m}$ ]			
	große Verglasung		kleine Verglasung		große Verglasung		kleine Verglasung	
	Innen- scheibe	Außen- scheibe	Innen- scheibe	Außen- scheibe	Innen- scheibe	Außen- scheibe	Innen- scheibe	Außen- scheibe
1	5,1	12,7	5,3	14,6	475	340	450	430
2	4,9	13,2	4,1	14,0	-	-	-	-
3	5,2	19,8	5,1	18,8	530	530	-	-

Ver- such Nr.	Zeit bis zum Ver- lust der Stabilität der Außenscheibe [min]		prozentualer An- teil des herausge- fallenen Glases in der Außenscheibe [%]	
	große Vergla- sung	kleine Vergla- sung	große Vergla- sung	kleine Vergla- sung
	Außen- scheibe	Außen- scheibe	Außen- scheibe	Außen- scheibe
1	-	-	-	-
2	21,0	-	2	-
3	-	-	-	-

Die Gastemperaturen zentral unter der Decke betragen nach ca. 4 bis 5 min bei

- Versuch Nr. 1 (Brandlast in der Raumecke) ca. 400°C bis 450°C
- Versuch Nr. 2 (Brandlast in der Raummitte) ca. 650°C bis 750°C
- Versuch Nr. 3 (Brandlast in der Raummitte) ca. 550°C bis 600°C.

Die Gastemperaturen vor der Verglasung im unteren Randbereich betragen nach ca. 4 bis 5 min bei

- Versuch Nr. 1 (Brandlast in der Raumecke) ca. 30°C bis 40°C
- Versuch Nr. 2 (Brandlast in der Raummitte) ca. 30°C bis 40°C
- Versuch Nr. 3 (Brandlast in der Raummitte) ca. 40°C bis 50°C.

Die Gastemperaturen vor der Verglasung im mittleren Bereich betragen nach ca. 4 bis 5 min bei

- Versuch Nr. 1 (Brandlast in der Raumecke) ca. 220°C bis 280°C
- Versuch Nr. 2 (Brandlast in der Raummitte) ca. 250°C bis 300°C
- Versuch Nr. 3 (Brandlast in der Raummitte) ca. 260°C bis 270°C.

Die Gastemperaturen vor der Verglasung im oberen Randbereich betragen nach ca. 4 bis 5 min bei

- Versuch Nr. 1 (Brandlast in der Raumecke) ca. 350°C bis 400°C
- Versuch Nr. 2 (Brandlast in der Raummitte) ca. 350°C bis 430°C
- Versuch Nr. 3 (Brandlast in der Raummitte) ca. 370°C bis 390°C.

Die Oberflächentemperatur der inneren Scheibe betrug z.B. bei Versuch 1 (größere Verglasung) nach ca. 4 bis 5 min

- unterer Rand: ca. 20°C bis 30°C (Temperatur unter dem Rahmen: ca. 20°C bis 30°C)
- Mitte Scheibe: ca. 280°C bis 300°C (Temperatur unter dem Rahmen: ca. 30°C bis 40°C)
- oberer Rand: ca. 230°C bis 250°C (Temperatur unter dem Rahmen: ca. 40°C bis 60°C)

Die Oberflächentemperatur der inneren Scheibe betrug z.B. bei Versuch 2 (größere Verglasung) nach ca. 4 bis 5 min

- unterer Rand: ca. 40°C bis 50°C (Temperatur unter dem Rahmen: ca. 20°C)
- Mitte Scheibe : ca. 200°C bis 230°C (Temperatur unter dem Rahmen: ca. 40°C bis 50°C)
- oberer Rand: ca. 230°C bis 250°C. (Temperatur unter dem Rahmen: ca. 90°C bis 100°C)

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die erste Rissbildung sowohl bei den kleinen, als auch bei den großen inneren Scheiben ca. 4 bis 5 Minuten nach Brandausbruch erfolgte.

Bei den äußeren Scheiben trat diese erste Rissbildung im Zeitbereich zwischen 13 und 20 Minuten auf.

Die durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen dem abgedeckten Randbereich und der Glasoberfläche betrug beim Auftreten der ersten Risse sowohl für die kleine als auch die große Verglasung ca. 160 K.

Es zeigt sich, dass der mittlere Teil der Scheibe am schnellsten und stärksten aufgrund der Absorption von Wärmestrahlung aufgeheizt wird.

Die Versuche belegten darüber hinaus, dass die äußeren Scheiben trotz starker Schwächung durch die hohen Temperaturen nur unbedeutend an Stabilität verlieren und intakt bleiben.

Shields et. al. /21/ weisen in ihrem Bericht darauf hin, dass weitergehende Untersuchungen bezüglich der Stabilität von Verglasungen im Brandfall erforderlich sind:

In der Arbeit werden auch einige Bruchbilder der Versuche mit den Zeiten beim Auftreten der Risse abgebildet.

## 5.2 Versuche von Klassen et al.

[Klassen et al. /22/] berichtet über Untersuchungen zum Glasbruch bei Mehrfachverglasungen aufgrund der Einwirkung von Wärmestrahlung.

Für die Versuche wurden sieben unterschiedliche aus 2 und 3 Glasscheiben zusammengesetzte Verglasungen ausgewählt und einer Wärmestrahlungsquelle ausgesetzt, um Wärmeeinwirkung auf die Verglasung von außen, wie sie bei einem Wald- oder Öllachenbrand vorkommen kann, zu simulieren.

Folgende Glasarten wurden verwendet:

- Verglasung A: Verbund-Sicherheitsglas (VSG) aus 2 Scheiben 6,35 mm grau getöntem Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) mit dazwischen liegender 2,29 mm PVB-Folie
- Verglasung B: VSG aus 2 Scheiben 6,35 mm grau getöntem ESG mit dazwischen liegender 1,52 mm PVB-Folie
- Verglasung C: 6,35 mm grün getöntes ESG, 12,7 mm Luftzwischenraum, 2 Scheiben 14,29 mm aus nicht getöntem ESG mit Sentry Plus<sup>®</sup> laminiert
- Verglasung D: 6,35 mm grau getöntes ESG, 12,7 mm Luftzwischenraum, 2 Scheiben 14,29 mm aus nicht getöntem ESG mit Sentry Plus<sup>®</sup> laminiert
- Verglasung E: VSG aus 6,35 mm grün getöntem ESG und 6,35 mm nicht getöntem ESG mit dazwischen liegender 2,29 mm PVB-Folie
- Verglasung F: 6,35 mm grün getöntes teilvorgespanntes Glas (TVG), 12,7 mm Luftzwischenraum, Hurrikan sicheres Verbundglas aus 2 Scheiben 6,35 mm TVG
- Verglasung G: 6,35 mm grün getöntes teilvorgespanntes Glas (TVG), 12,7 mm Luftzwischenraum, 2 Scheiben 6,35 mm TVG hochfest laminiert
- 

### 5.2.1 Kleinmaßstäbliche Versuche

In kleinmaßstäblichen Versuchen wurden Verglasungen mit den Abmessungen 305 mm x 305 mm (entsprechend 1ft x 1ft) und 609 mm x 1219 mm (entsprechend 2ft x 4ft) mit Hilfe einer Wärmestrahlerwand einer Wärmestrahlung von 5 – 50 kW / m<sup>2</sup> aus-

gesetzt. Hierbei wurde der Abstand zwischen Verglasung und Wärmestrahlwand variiert.

Zusätzlich wurden an den Glasscheiben mit den Abmessungen 305 mm x 305 mm Versuche mit einer runden Brennwanne (Tiefe: 100 mm, Durchmesser: 1 m, Brandstoff: Kerosin) als Wärmestrahlungsquelle von 1 - 30 kW / m<sup>2</sup> durchgeführt, um die Abhängigkeit zwischen Versagen der Verglasung und Art der Wärmestrahlungsquelle zu untersuchen.

### **5.2.2 Großmaßstäbliche Versuche**

Für großmaßstäbliche Untersuchungen wurden zwei Versuche mit jeweils drei Verglasungen mit den Abmessungen 1219 mm x 4238 mm mit drei verschiedenen Abständen zur Brandquelle durchgeführt. Als Wärmestrahlungsquelle wurde hierbei ein Kerosin-Lachenbrand mit einem Durchmesser von 15,24 m verwendet. Die Brennstoffmenge wurde so gewählt, dass eine Brenndauer von mindestens 20 Minuten gewährleistet wurde.

Die Abstände zwischen dem Rand des Lachenbrandes und den Verglasungen wurden hierbei variiert (7,62 m, 15,24 m, 22,86 m). Die Wärmestrahlung variierte hierbei zwischen 4,46 kW / m<sup>2</sup> und 54,8 kW / m<sup>2</sup>.

Da diese Versuche im Freien durchgeführt wurden, hatten der Wind und die fehlende benachbarte Bebauung einen großen Einfluss. Beispielsweise wurde beim ersten Versuch bei einem Abstand von 7,64 m die Verglasung von der Flamme eingehüllt. Hierdurch wurde die Verglasung durch Konvektion und Wärmestrahlung thermisch beaufschlagt. Beim 2. Versuch mit 15,24 m Abstand des Lachenbrandes zur Verglasung änderte sich die Windrichtung derart, dass die Flammen von der Verglasung weggetragen wurden. Hierdurch ergab sich kein direkter Flammenkontakt, wodurch die Verglasung nur durch die Wärmestrahlung der Flammen thermisch beaufschlagt wurde.

### 5.2.3 Versuchsergebnisse:

#### 5.2.3.1 Kleinmaßstäbliche Versuche

Die Versuche in kleinem Maßstab führten zu folgenden Ergebnissen:

Die Dreifachverglasungen mit luftgefüllten Scheibenzwischenräumen wiesen niedrigere Werte für den Gesamtstrahlungsdurchgang, für die Scheibentemperaturen auf der abgewandten Seite und für den Wärmefluss auf der strahlungsabgewandten Seite auf als die Zweifachverglasungen. Dies ist auf die erhöhte reflektierte und absorbierte Strahlung der zusätzlichen optischen Oberflächen bei den Dreifachverglasungen zurückzuführen.

Der Einsatz der Wärmestrawand stellte sich, vor allem in Bezug auf die Vergleichbarkeit der Messergebnisse und den einfachen Versuchsaufbau, als geeignet heraus.

Bei einem Wärmestrom von bis zu  $30 \text{ kW} / \text{m}^2$  betrug

- der Gesamtstrahlungsdurchgang für die Dreifachverglasung unter 10 %
- Die Temperatur auf der Scheibenoberfläche zur Rauminnenseite blieb unter  $100^\circ\text{C}$
- Der Wärmestrom von der Scheibe in den Raum war kleiner als  $4 \text{ kW} / \text{m}^2$

Für die Zweifachverglasung waren die entsprechenden Messwerte deutlich höher:

- Der Gesamtstrahlungsdurchgang war kleiner als 25 %
- Die Temperatur auf der Scheibeninnenseite blieb unter  $220^\circ\text{C}$
- Der Wärmestrom von der Scheibe in den Raum war kleiner als  $5 \text{ kW} / \text{m}^2$

Bei Wärmeströmen größer als  $30 \text{ kW} / \text{m}^2$  verloren die Scheiben sehr schnell an Stabilität und beulten aus.

Beim Zerspringen der Verglasungen ergaben sich Temperaturdifferenzen  $\Delta T$  zwischen dem abgedeckten Randbereich und der exponierten Scheibe von weniger als:

- 200 K für die  $305 \text{ mm} \times 305 \text{ mm}$  Scheiben
- 300 K für die  $609 \text{ mm} \times 1219 \text{ mm}$  Scheiben

Ungeachtet des einfallenden Wärmestromes und Typs der Versuchsprobe nahm die Zeit bis zur ersten Rissausbildung mit zunehmender Wärmestrahlung ab.

Dabei traten die ersten Risse der äußeren Scheibe tendenziell früher bei den Verglasungen mit 3 Scheiben als bei den Verglasungen mit 2 Scheiben auf. Trotzdem ging durch die Mehrfachverglasung weniger Strahlung durch.

Es stellte sich weiterhin heraus, dass die kleineren Glasscheiben früher versagten als die größeren, da die größeren Verglasungen über eine höhere Wärmekapazität verfügen und somit einfallende Wärmestrahlung besser absorbieren und verteilen können, bevor ein thermischer Sprung zum Bruch führt.

In der Veröffentlichung finden sich detaillierte Angaben bzgl. Höhe der Wärmestrahlung, Zeit bis zum ersten Riss, Temperatur auf der Scheibe bei Rissbildung, transmittierter Wärmestrom bei den jeweiligen Versuchen sowie Temperatur auf der Rückseite der Verglasungen.

Bei den Versuchen mit der 305 mm \* 305 mm Verglasung ergaben sich beispielsweise folgende Ergebnisse bzgl. Wärmestrahlung, Zeit bis zum 1. Riss und Temperatur auf der Scheibe:

Die Rissbildung erfolgte bei den untersuchten 305 mm \* 305 mm großen Verglasungen in Abhängigkeit der Wärmestrahlung entsprechend den nachfolgenden Angaben:

- Verglasung A: VSG aus 2 Scheiben 6,35 mm grau getöntem ESG mit dazwischen liegender 2,29 mm PVB-Folie:
  - Wärmestrahlung: 23,2 kW/m<sup>2</sup>: Riss in beiden Scheiben nach 456 s bei 157°C
  - Wärmestrahlung: 42,4 kW/m<sup>2</sup>: Riss in beiden Scheiben nach 178 s bei 338°C
  
- Verglasung C: 6,35 mm grün getöntes ESG, 12,7 mm Luftzwischenraum, 2 Scheiben 14,29 mm aus nicht getöntem ESG mit Sentry Plus<sup>®</sup> laminiert
  - Wärmestrahlung: 21,0 kW/m<sup>2</sup>: Riss strahlungszugewandter Seite nach 200 s bei 152°C
  - Wärmestrahlung: 43,3 kW/m<sup>2</sup>: Riss strahlungszugewandter Seite nach 75 s bei 176°C

### 5.2.3.2 Großmaßstäbliche Versuche

Bei den großmaßstäblichen Tests ergab sich kein wesentlich abweichendes Verhalten zu den Messwerten und Ergebnissen der kleineren Verglasungen. Allerdings hatten die äußeren Bedingungen wie der Wind und die fehlende benachbarte Bebauung einen großen Einfluss auf das Verhalten der Verglasung.



## 6 Versuchsaufbau zur Untersuchung der thermischen Stabilität von Verglasungen

Aufbauend aus den Erkenntnissen aus der Literaturuntersuchung wurden Versuche zur thermischen Stabilität von Verglasungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführt. Dabei ging es vor allem darum, neuartige Verglasungen und deren Verhalten im Brandfall mit den bisher üblicherweise eingesetzten Verglasungen zu vergleichen.

Der Versuchstand wurde so konzipiert, dass die Untersuchung des thermischen Verhaltens im Hinblick auf die Einflüsse von unterschiedlichen Rahmenmaterialien, Glasarten und Rahmenkonstruktionen unter reproduzierbaren Bedingungen ermöglicht wird.

Die Ergebnisse werden abschließend mit den bisher vorliegenden Untersuchungen aus der Literatur verglichen.

### 6.1 Versuchsaufbau

Die Konzipierung des Versuchsaufbaus basierte unter anderem auf der Auswertung bisheriger Fensterversuche, die in der Literatur beschrieben wurden. Ziel war es, den Versuchstand so zu gestalten, dass er zum einen möglichst genau die Bedingungen eines Realbrandes wiedergibt und zum anderen aber reproduzierbare Ergebnisse erzeugt.

Dabei stellte sich die Frage nach einer geeigneten Brandquelle, die das Spektrum der möglichen zeitlichen Temperaturverläufe reproduzierbar darstellen kann. Da diese bei natürlichen Bränden erheblichen Schwankungen unterliegen, fiel die Wahl nach Auswertung der Versuche von [Klassen, M. et al. /22/] auf eine mit Flüssiggas betriebene Wärmestrahlwand.

Zitat:

*„The use of a radiant panel provided very similar results to that obtained from a free burning pool fire. This result suggests that the radiant panel can be used in a test standard for observing fire performance characteristics of building glazings due to the repeatability and ease of use of this radiant source.“* [Klassen, et al. /22/]

Die Heizfläche der an der FFB vorhandenen Wärmestrahlwand (Abbildung 6-1) mit den Abmessungen Breite: 1140 mm, Höhe: 1020 mm beträgt 1,16 m<sup>2</sup>.

Die maximale Wärmestrahlungsleistung beträgt ca. 80 kW/m<sup>2</sup>.

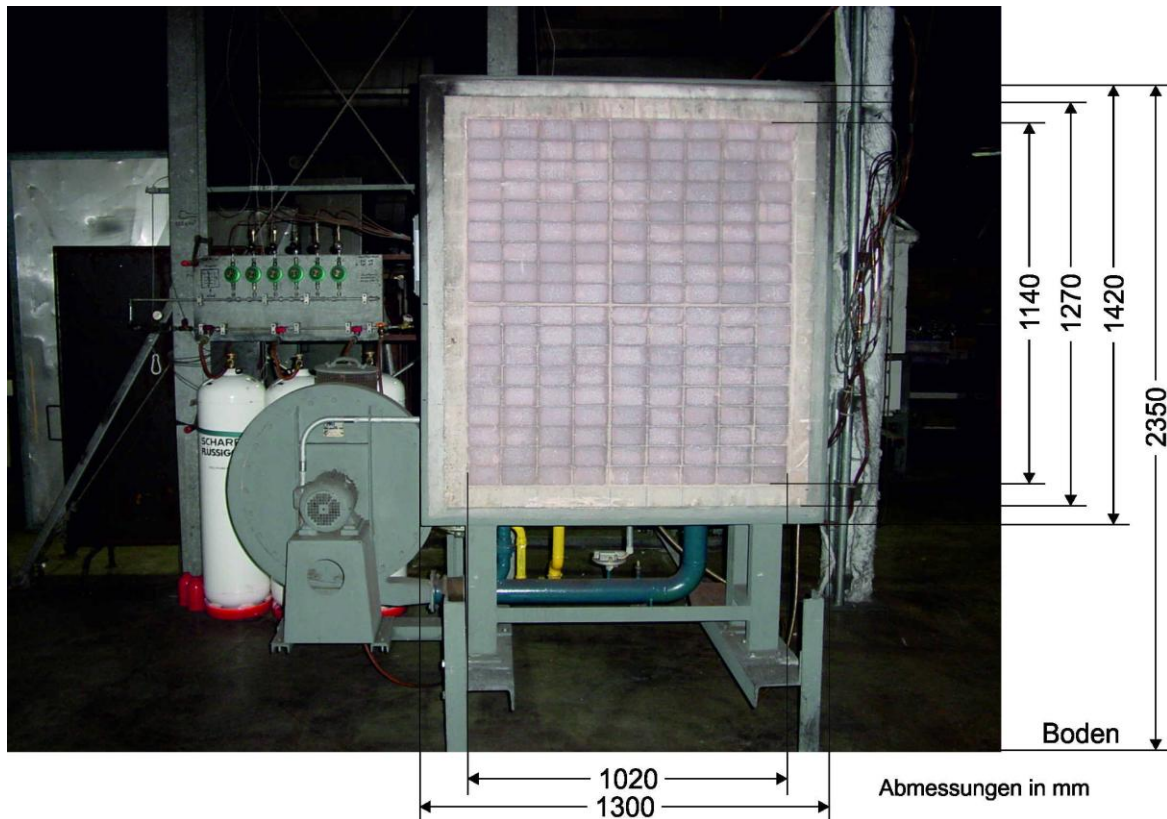


Abbildung 6-1: Wärmestrahlwand mit Abmessungen [FFB]

Um die einwirkende Wärme zusätzlich zu der Einstellung der Leistung der Wärmestrahlwand regulieren zu können wurde der Versuchsträger auf einem Schienensystem montiert, wodurch sich der Abstand zur Wärmestrahlwand und somit auch die einwirkende Strahlungsleistung auf einfache Weise variieren lassen (siehe Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3).

Die Höhe und die Breite der Versuchseinrichtung werden maßgeblich durch die äußeren Abmessungen der Wärmestrahlwand bestimmt. Die Länge von 6 m wird durch das gewählte Schienensystem vorgegeben. Die Maße des Versuchsträgerwagens waren ebenfalls durch den zum Schienensystem gehörigen Wagen definiert, jedoch wurde der Aufbau auf dem Wagen selbst derart gestaltet, dass unterschiedliche Fenstergrößen durch Verschieben des Einbaurahmens eingebaut werden können.

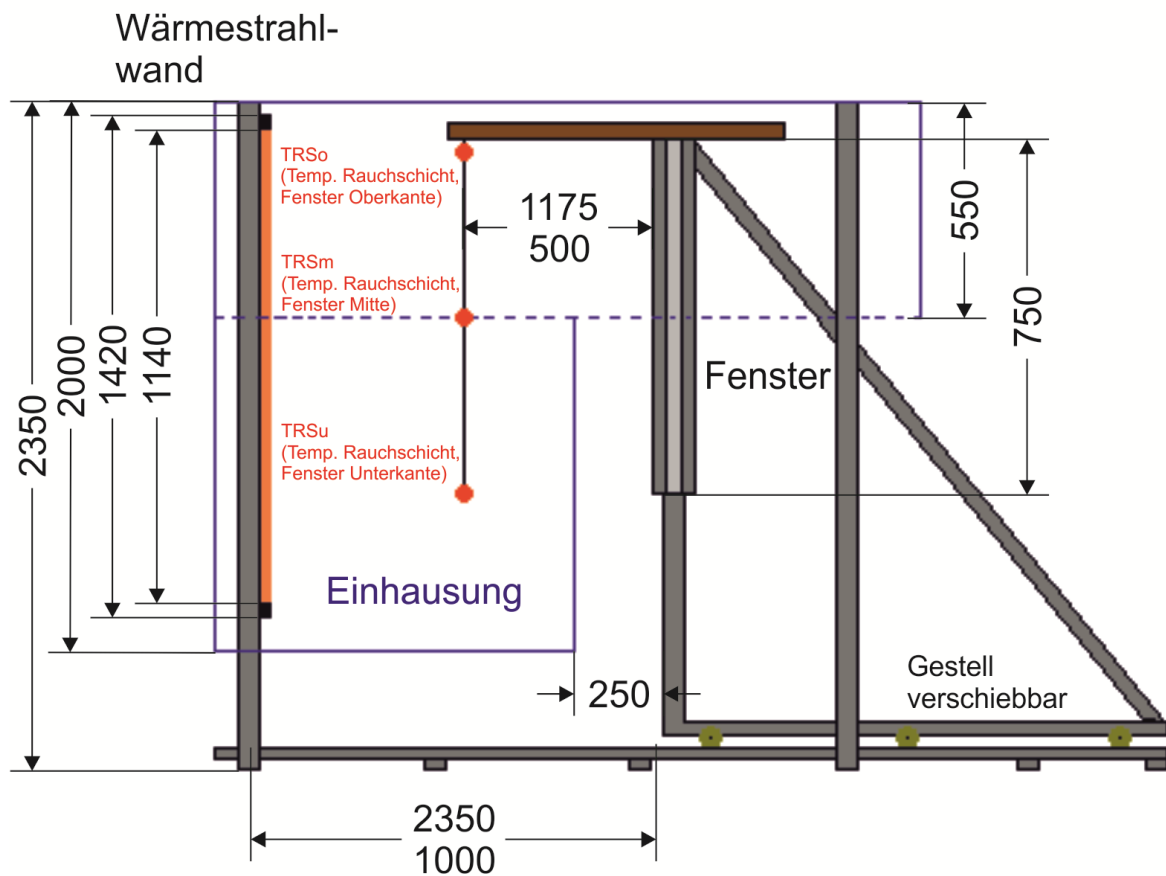


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit Thermoelementen an verschiedenen Positionen der Rauchschrift

Der Raum zwischen Wärmestrahlwand und Probenwagen wurde mittels einer Einhausung aus feuerbeständigen Calciumsilikat-Platten in Teilbereichen verkleidet. Somit konnten neben der Wärmestrahlung auch Einflüsse durch konvektive Wärmeströmung auf das Fenster bzw. die Verglasung realisiert werden.

Dies stellt eine Erweiterung der Versuche der in 5.2 beschriebenen Anordnung dar, bei welcher nur der Wärmestrahlungseinfluss bei den Kleinversuchen nach 5.2.1 zum Tragen kam. Ebenso ließ der hier gewählte Aufbau eine höhere Variabilität als die Versuche nach 5.2 sowie eine bessere Wiederholbarkeit erwarten.



Abbildung 6-3: Versuchstand mit eingebautem Fenster

Die Höhe der seitlichen Einhausung mit Calciumsilikat-Dämmplatten wurde dabei so gewählt, dass sich die Fenster etwa zur Hälfte in der Heißgasschicht befinden, was durch entsprechende Vorversuche mit Disconebel und Thermographie-Aufnahmen mittels Wärmebildkamera bestätigt werden konnte. Disconebel aus herkömmlichem Nebelfluid zersetzt sich bei hohen Temperaturen, so dass ein „Negativ-Bild“ der Heißgasschicht produziert wird. Die Heißgaszone ist ungetrübt. Die Kaltgaszone bleibt dabei vernebelt (siehe Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5).

Durch das nur teilweise Eintauchen des Versuchsobjekts in die Heißgasschicht sollte der Fall eines Raumbrandes bei in einen angrenzenden Raum geöffneter Zimmertür simuliert werden. Heiße Rauchgase ziehen dabei durch die geöffnete Tür in den benachbarten Raum ab, so dass sich im Brandraum nur eine Rauchschiebt bestimmter Dicke ausbilden kann, die nur bis zu einer definierten Fensterposition reicht und das Fenster somit ungleichmäßigen Belastungen ausgesetzt wird.



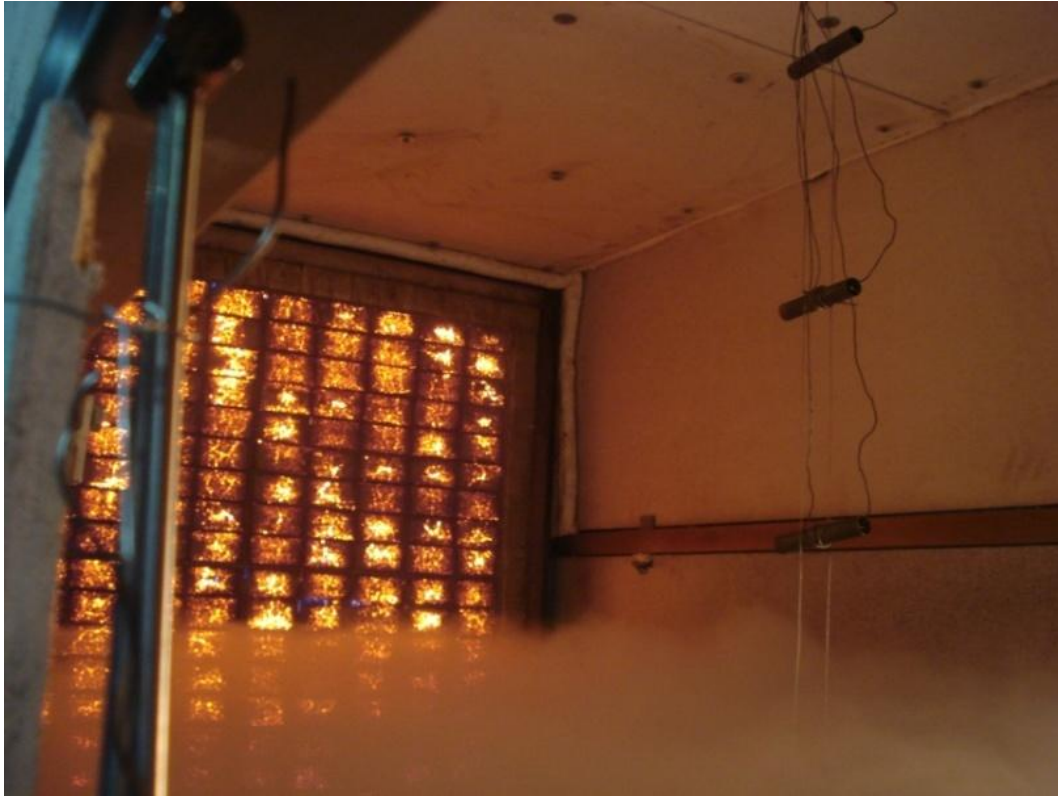


Abbildung 6-4: Versuchsstand: Unterschiedliche warme Zonen mittels Disconebeil visualisiert (Blick auf Wärmestrahlwand)

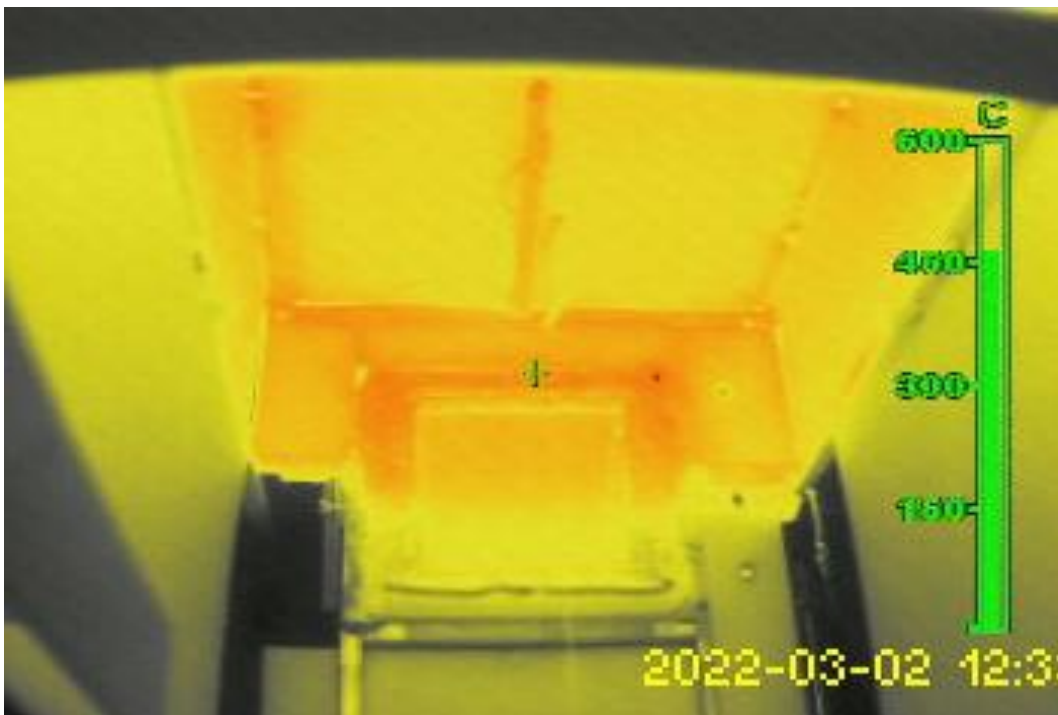


Abbildung 6-5: Wärmebildaufnahme im inneren Bereich der Versuchsanordnung (Blick auf das Fenster)

Durch den modularen Aufbau des Versuchsstandes aus Vierkantrohren und darauf verschiebbaren Trägern können Fenster unterschiedlicher Abmessungen durch Anpassen des Einbaurahmens untersucht werden.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden Fenster mit dem Aussenmaßen 730 mm x 730 mm und 750 mm x 750 mm verwendet.

### **6.1.1 Messtechnik und Dokumentation**

Die Messpositionen im Versuchsstand können der Messstellenliste in Tabelle 6-1 sowie den Abbildungen 6-2, 6-6 und 6-7 entnommen werden.

Die Temperaturmessungen erfolgten im Bereich der Rauchsicht zwischen Wärmestrahlwand und Fenster, auf der Vorder- (wärmezugewandte Seite) und Rückseite (wärmeabgewandte Seite) der Fenster sowohl auf der Scheibenoberfläche als auch im Rahmen im Bereich der abgedeckten Scheibe.

Die Messstellen auf der Fensterrückseite wurden dabei analog zu denen auf der Vorderseite angebracht.

Tabelle 6-1: Messstellenliste

Temperaturmessstellen		
Rauchschicht	Bezeichnung	Position
	$T_{RS0}$	Thermoelement - Rauchschicht Fenster Oberkante, mittig zwischen Wärmestrahlgang und Fenster
	$T_{RSm}$	Thermoelement - Rauchschicht Fenster Mitte, mittig zwischen Wärmestrahlgang und Fenster
	$T_{RSu}$	Thermoelement - Rauchschicht Fenster Unterkante mittig zwischen Wärmestrahlgang und Fenster
Vorderseite der Verglasung (wärme-zugewandte Seite)	Bezeichnung	Position
	$T_{VGo}$	Thermoelement - Vorderseite Glas (Scheibenoberfläche), oben
	$T_{VGl}$	Thermoelement - Vorderseite Glas (Scheibenoberfläche), links
	$T_{VGm}$	Thermoelement - Vorderseite Glas (Scheibenoberfläche), Mitte
	$T_{VGr}$	Thermoelement - Vorderseite Glas (Scheibenoberfläche), rechts
	$T_{VGu}$	Thermoelement - Vorderseite Glas (Scheibenoberfläche), unten
	$T_{VRo}$	Thermoelement - Vorderseite Rahmen (abgedeckter Scheibenbereich), oben
	$T_{VRI}$	Thermoelement - Vorderseite Rahmen (abgedeckter Scheibenbereich), links
	$T_{VRr}$	Thermoelement - Vorderseite Rahmen (abgedeckter Scheibenbereich), rechts
	$T_{VRu}$	Thermoelement - Vorderseite Rahmen (abgedeckter Scheibenbereich), unten

Tabelle 6 – 1 (Fortsetzung)

<b>Temperaturmessstellen</b>		
<b>Rückseite der Verglasung (wärme-abgewandte Seite)</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Messaufnehmer und Position</b>
	$T_{RüGo}$	Thermoelement - Rückseite Glas (Scheibenoberfläche), oben
	$T_{RüGl}$	Thermoelement - Rückseite Glas (Scheibenoberfläche), links
	$T_{RüGm}$	Thermoelement - Rückseite Glas (Scheibenoberfläche), Mitte
	$T_{RüGr}$	Thermoelement - Rückseite Glas (Scheibenoberfläche), rechts
	$T_{RüGu}$	Thermoelement - Rückseite Glas (Scheibenoberfläche), unten
	$T_{RüRo}$	Thermoelement - Rückseite Rahmen (abgedeckter Scheibenbereich), oben
	$T_{RüRl}$	Thermoelement - Rückseite Rahmen (abgedeckter Scheibenbereich), links
	$T_{RüRr}$	Thermoelement - Rückseite Rahmen (abgedeckter Scheibenbereich), rechts
	$T_{RüRu}$	Thermoelement - Rückseite Rahmen (abgedeckter Scheibenbereich), unten
<b>Wärmestrahlung</b>		
<b>Vorder- und Rückseite der Verglasung</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Messaufnehmer und Position</b>
	$WSA_{RÜ}$	Wärmestrahlungsaufnehmer - Rückseite der Verglasung (Position variabel: oben, Mitte, unten)
	$WSA_o$	Wärmeflussaufnehmer - Vorderseite oben
	$WSA_m$	Wärmeflussaufnehmer - Vorderseite Mitte
	$WSA_u$	Wärmeflussaufnehmer - Vorderseite unten
<b>Bi-Direktionale Strömungsmesssonde</b>		
	<b>Bezeichnung</b>	<b>Messaufnehmer und Position</b>
	$P_{Diff}$	Differenzdruckmessung im 300 mm breiten Freiraum zwischen Einhausung und Fenster
	$T_{Diff}$	Thermoelement neben der Bi-Direktionalen Strömungsmesssonde im 300 mm breiter Freiraum zwischen Einhausung und Fenster



Abbildung 6-6 zeigt die Positionen der Messstellen auf der wärmezugewandten Seite des Fensterbereiches.

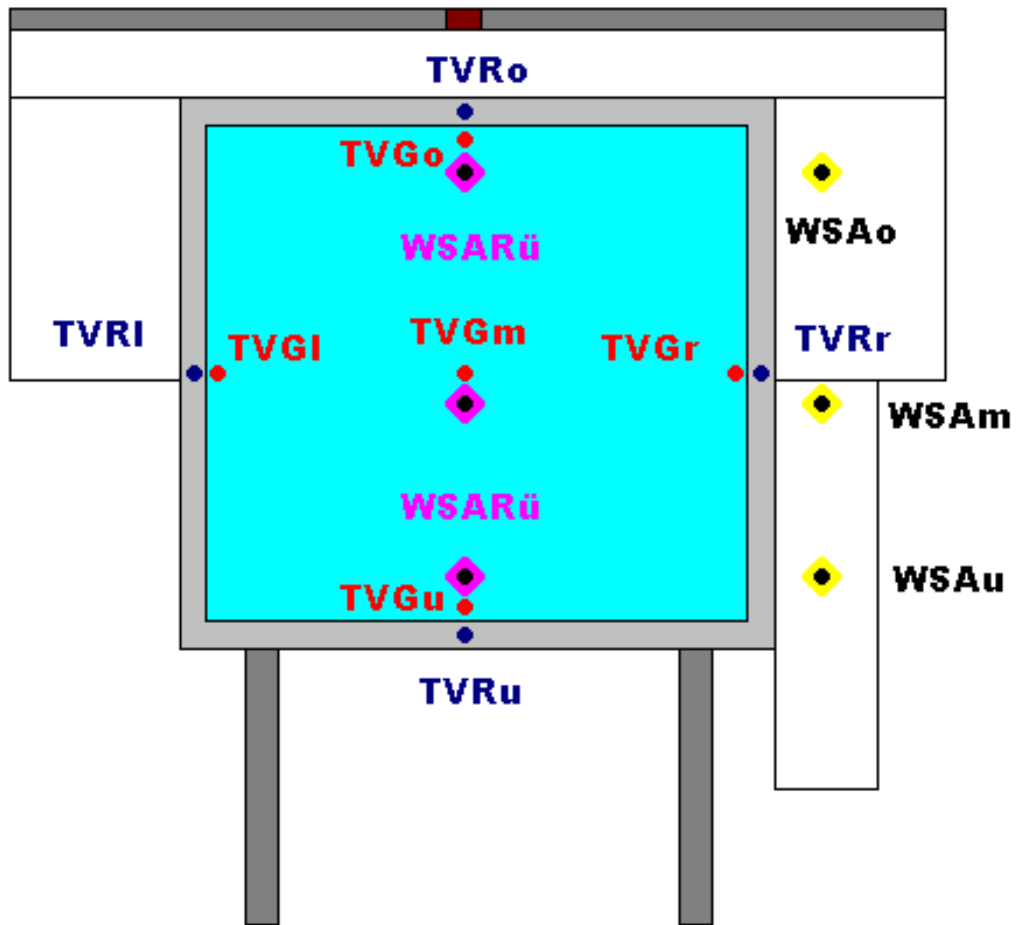


Abbildung 6-6: Position der Messstellen im Fensterbereich (Vorderseite des Fensters = wärmezugewandte Seite)

Die Messung der Temperaturen in der Rauchschiicht wurde über eine vor dem Fenster an einer Halterung herabhängende Messkette realisiert (siehe auch Abbildung 6-2)

Zur Temperaturmessung wurden Mantelthermoelemente vom Typ K (NiCr/Ni) mit Drahtdurchmessern von 1,3 mm eingesetzt und über Ausgleichsleitungen an das PC-Messsystem angeschlossen. Die Mantelthermoelemente verfügen über einen Messbereich von - 40 °C bis +1200 °C.

Weiterhin wurde die Temperatur der austretenden Heißgase im 300 mm breiten Freiraum zwischen Einhausung und Fenster (siehe Abbildung 6-2 und 6-7) gemessen.

Im 300 mm breiten Freiraum zwischen Einhausung und Fenster wurde zusätzlich die Strömungsgeschwindigkeit aus dem dynamischen Druck durch eine Bi-direktionale Strömungsmesssonde nach [McCaffrey, Heskestad /46/], welche über Druckleitungen mit elektrischen Druckmessdosen und der Messwerterfassung verbunden waren, ermittelt (siehe Abbildung 6-7).

Bidirektionale Sonden eignen sich zur Messung von Strömungen in beiden Strömungsrichtungen. Dieses Messverfahren ist im Vergleich zum Prandtl – Rohr relativ unempfindlich bezüglich des Anströmwinkels.



Abbildung 6-7: Bi-direktionale Strömungsmesssonde mit Thermoelement im Spalt Einhausung und Fenster

Auf die Messung mittels der Bi-direktionalen Strömungsmesssonde wird nachfolgend jedoch nicht näher eingegangen.

Zur Messung des Wärmestromes wurden Wärmeflussaufnehmer ohne Vorsatzfenster mit Wasserkühlung (Modell 64-5-18 und 64-10-18) von Medtherm Corporation /Huntsville, Alabama verwendet.

Für die Messung der eintreffenden Wärmestrahlung auf das Fenster wäre es erforderlich, Wärmeflussaufnehmer auf der Scheibe anzubringen. Dies ist jedoch auf Grund deren Bauform und der erforderlichen Leitungen für die Messwertübertragung und Wasserkühlung sowie der Verfälschung der Wärmebelastung der Scheibe (Abdeckung von Teilbereichen durch vorgesetzte Strahlungsaufnehmer nicht sinnvoll) nicht möglich.

Daher wurde bei den Kalibrierversuchen anstelle des Fensters eine Calciumsilikat-Dämmplatte mit Aufnahmebohrungen für die Wärmeflussaufnehmer in den Versuchsträger eingespannt und es wurden verschiedene Abstände zur Wärmestrahlwand für die Untersuchung verwendet (siehe Abbildung 6-8).

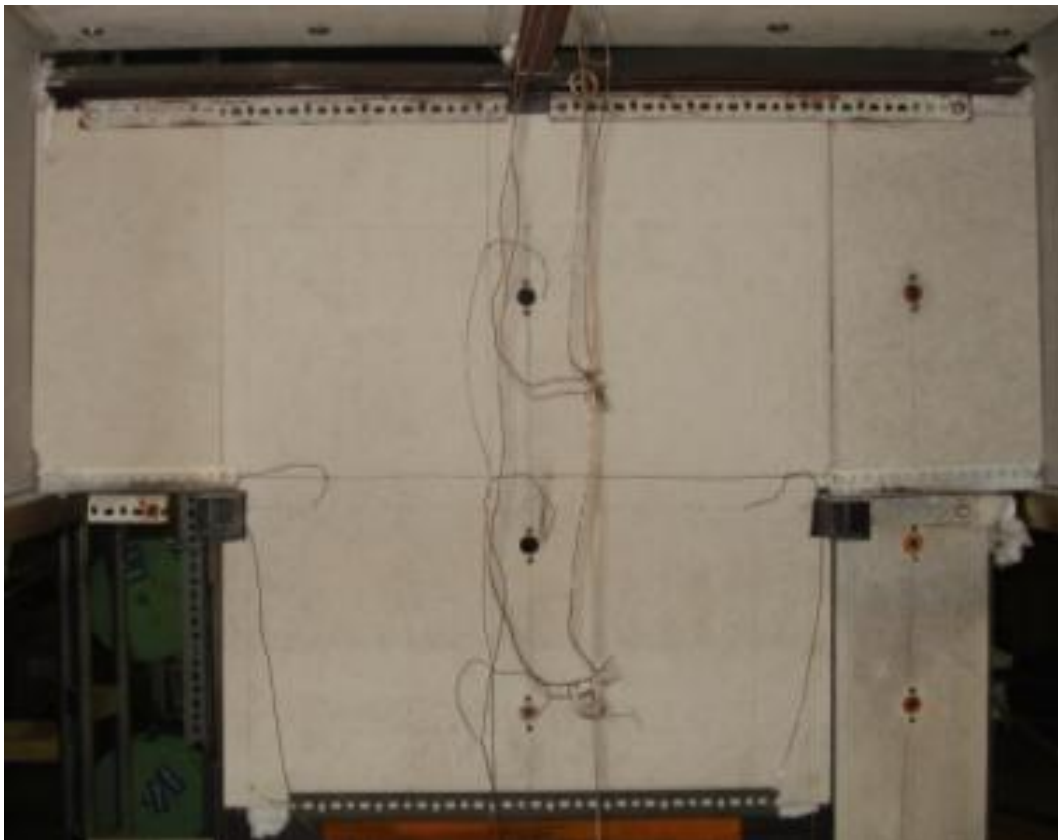


Abbildung 6-8: Frontalansicht Kalibrierplatte (Calciumsilikat-Dämmplatte) mit Wärmeflussaufnehmern und Thermoelementen

Außerdem wurde neben der Fensterrahmenkonstruktion eine weitere Platte angebracht, in der drei Wärmeflussaufnehmer ( $WSA_o$ ,  $WSA_m$ ,  $WSA_u$ ) fest montiert wurden (Abbildung 6-8 rechte Seite).

Die Position des Wärmeflussaufnehmers  $WSA_{RÜ}$  wurde während der Vorversuche variiert, um einen Vergleich zu haben, ob die Ergebnisse bei vertikaler Symmetrieachse übereinstimmen. Während der Fensterversuche wurde er hinter der Scheibe angebracht, um den durchgehenden Strahlungsanteil zu messen.

Im Versuchsbetrieb wurden die Wärmeflussensoren nach dem versuchsbedingten Ausfall von zwei Sensoren u.a. durch Zerstörung der geschwärzten Fläche der Aufnehmer durch Niederschlag von Harz aus den Holzrahmen und weiteren Zersetzungsprodukten aus den Fensterrahmen nur noch kurzzeitig im stationären Betrieb für Messungen eingesetzt und dann wieder entfernt.

Für die Versuchsdokumentation und anschließende Auswertung wurde ein PC-Messsystem zur Messung der zeitlichen Verläufe von Temperatur, Druck und Wärmestrahlung eingesetzt. Die Messwertaufnahme erfolgte bei sämtlichen Messstellen jede Sekunde.

Zusätzlich wurden je eine Videokamera mit Blickrichtung auf Vorder- und Rückseite des Fensters gerichtet und zusätzlich jeder Versuch mit Fotoaufnahmen dokumentiert.

Bei einem Teil der Versuche wurde eine Wärmebildkamera der Firma FLIR vom Typ T 640 mit einer Wärmebildauflösung von  $640 * 480$  Pixel (= 307200 Infrarot-Messpunkte, Temperaturmessbereich:  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+2.000^{\circ}\text{C}$ ) eingesetzt, um die Temperaturen auf der Glasoberfläche der Vorderseite der Fenster (wärmeabgewandte Seite) zu messen.

Eine Wärmebildkamera nimmt die Strahlungsstärke im Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums auf und wandelt sie in ein sichtbares Bild um.

Auf der wärmebeanspruchten Innenseite der Fenster konnte die Wärmebildkamera aufgrund der Einhausung des Versuchsaufbaus und der hohen Wärmebelastung nicht eingesetzt werden.

Verschiedene Faktoren sind in der Lage, Einfluss auf die Temperaturmessung mittels Infrarotkamera zu nehmen. Diese werden im Folgenden dargestellt:

## 1. Emissionsgrad

Dieser stellt das Verhältnis der von einem Körper ausgesendeten Strahlungsleistung zur Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers mit derselben Temperatur dar. Je höher der Emissionsgrad desto geringer ist im Regelfall der Einfluss der reflektierten Temperatur.

Der Einfluss des Emissionsgrades nimmt mit steigender Temperatur zu.

Somit nimmt auch der Fehler durch einen falsch gewählten Emissionsgrad bei steigender Temperatur zu.

Besonders bei kleinen Emissionsgraden ist die Wahl des richtigen Emissionsgrades von Bedeutung, da hierbei schon kleine Fehler bei der Einstellung große Messfehler bewirken. [siehe Infratec /49/]

Dem von [Testo /48/] veröffentlichten Leitfaden für Infrarot Messtechnik zufolge ist ein Fehler bei der Wahl des Emissionsgrades umso einflussreicher je größer die Differenz von Messobjekttemperatur und Umgebungstemperatur und je kleiner der Emissionsgrad ist. Die Auswirkungen eines falsch gewählten Emissionsgrades sind demnach:

- Bei Temperaturen größer der Umgebungstemperatur
  - und zu groß eingestellten Emissionsgraden eine zu niedrige gemessene Temperatur
  - und zu klein eingestellten Emissionsgraden eine zu hohe gemessene Temperatur
- Bei Temperaturen kleiner der Umgebungstemperatur
  - und zu groß eingestellten Emissionsgraden eine zu hohe gemessene Temperatur
  - und zu klein eingestellten Emissionsgraden eine zu niedrige gemessene Temperatur

## 2. Messfleck (kleinstes erkennbares Objekt)

Der Messfleck wird bestimmt durch die geometrische Auflösung (IFOV (Instantaneous Field Of View)) und beträgt bei der eingesetzten Wärmebildkamera T640 beim 25°-Objektiv 0,68 mrad bzw. 1,23 mrad beim 45°-Objektiv.

Zur exakten Messung sollte das Messobjekt 2–3 mal größer als das kleinste erkennbare Objekt sein.

Bei einer räumlichen Auflösung des Objektivs von 0,68 mrad und einem Messabstand von 1 m hat das kleinste erkennbare Objekt eine Kantenlänge von 0,68 mm, bei 2 m Abstand 1,36 mm und bei 3 m Abstand entsprechend 2,04 mm.

Bei einer räumlichen Auflösung des Objektivs von 1,23 mrad und einem Messabstand von 1 m hat das kleinste erkennbare Objekt eine Kantenlänge von 1,23 mm, bei 2 m Abstand 2,46 mm und bei 3 m Abstand entsprechen 3,69 mm.

Ist die Kamera nicht auf den zu messenden Punkt scharf gestellt ist der Einfluss der, den Messfleck umgebenden Temperatur größer und es kommt zu Messfehlern.

### 3. Messwinkel:

Dieser sollte stets zwischen 50° und 90° betragen, da es sonst zu einer falschen Messung der Temperatur kommen kann (siehe [VDS /50/]).

### 4. Reflektierte Temperatur:

Die reflektierte Temperatur ist die Temperatur, die von der Umgebung auf das Objekt strahlt und von diesem reflektiert wird. So scheint es, als wäre die gemessene Temperatur die des Objekts.

Diese kann durch die im Benutzerhandbuch der Wärmebildkamera FLIR T640 beschriebenen Methoden ermittelt und ausgeglichen werden.

Da die reflektierte Temperatur im Zeitverlauf meist gleichbleibend ist, sinkt deren Einfluss mit zunehmender Temperatur des Messobjektes. Dennoch sollte darauf geachtet werden, dass die reflektierte Temperatur nicht punktförmig auftritt sondern gleichmäßig über die gesamte für die Temperaturmessung interessante Oberfläche.



Abbildung 6-9: Versuchsstand mit Wärmebildkamera (Bild oben links: Fotoaufnahme der Firma FLIR, <http://www.flir.com /47/>)



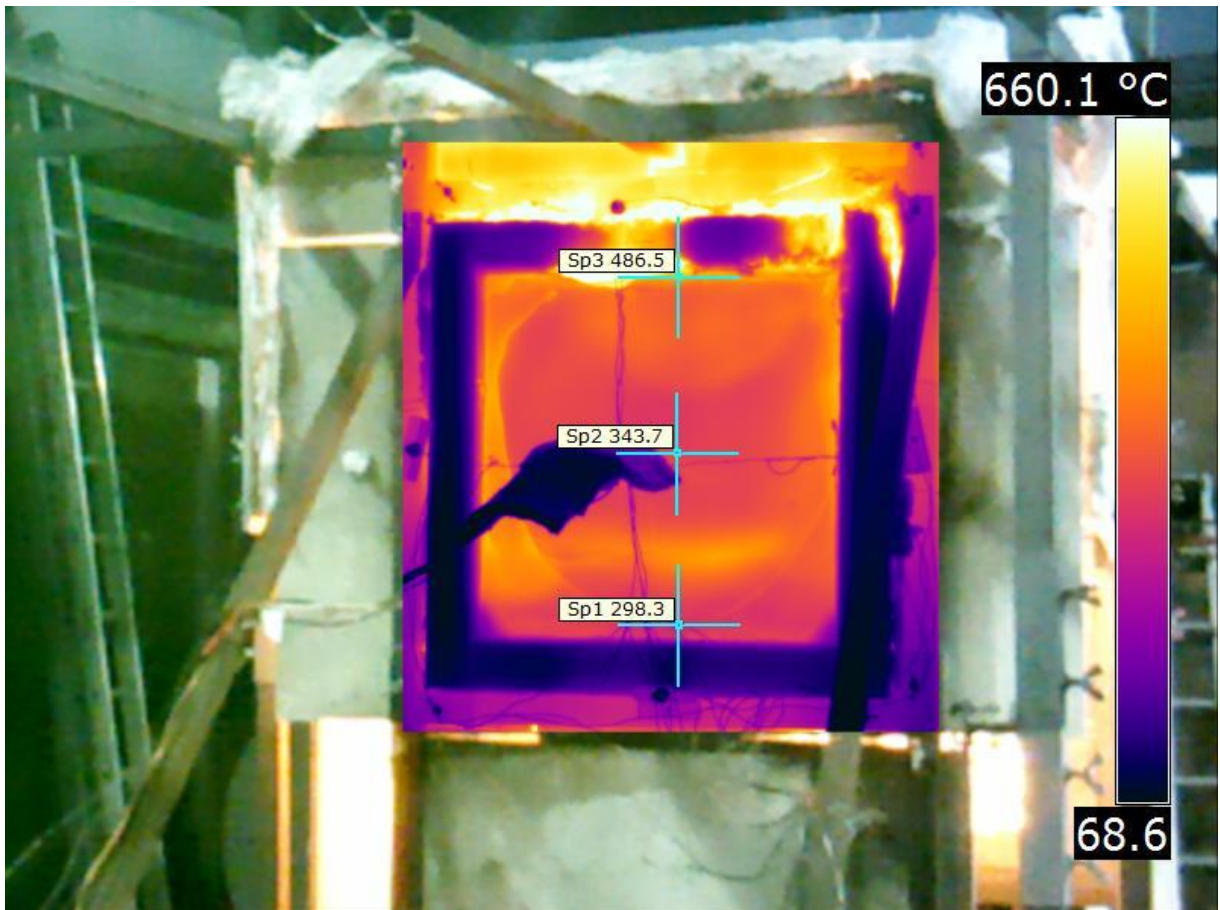


Abbildung 6-10: Beispiel für eine Wärmebildaufnahme, aufgenommen während eines Versuches mit Fenster (hier: Realbild des Umfeldes, mit Infrarotbild des Fensters überlagert (Bild-im-Bild Modus))

Bei den Versuchen hat sich gezeigt, dass die Wärmebildkamera bei korrekten Einstellwerten u.a. des Emissionsgrades eine korrekte Temperaturbestimmung der Glasoberfläche liefert.

Gleiche Ergebnisse sind bei Thermoelementen ebenfalls möglich, bedürfen aber vor allem bei Mantelthermoelementen eines höheren Aufwandes, da diese parallel zu der zu messenden Oberfläche aufgebracht werden müssen, während einfachere Drahtthermoelemente hierfür lediglich mit Thermoelement-Klebeband auf der Oberfläche zu fixieren sind.. Bei Mantelthermoelementen ist zusätzlich Wärmeleitpaste zu verwenden.







Bei der Anwendung der Wärmebildkamera muss darauf geachtet werden, dass die Kamera im für die Messung richtigen Winkel zum Messobjekt steht und korrekt focussiert ist.

Im Falle eines unbekanntem Emissionsgrades ist ein Klebeband mit bekanntem Emissionsgrad auf die entsprechende Oberfläche aufzubringen. Das verwendete Klebeband war bis ca. 300 °C anwendbar.

## 6.1.2 Verwendete Fenster

Tabelle 6-2 gibt die technischen Daten der bei den Versuchen eingesetzten Fenster wider. Sämtliche Angaben entstammen den Produktbeschreibungen der Hersteller/Lieferanten.

Tabelle 6-2: Details der verwendeten Fenster

Bezeichnung		PVC Standard-	Holz Standard-	PVC VSG (RC2, früher WK II)	Passivhaus PVC	Passivhaus Holz
Hersteller / Lieferant und Typenbezeichnung der Fenster		Bauhaus GmbH & Co. KG 3 - Kammer Basic	Bauhaus GmbH & Co. KG Holz Fenster Classic	Bauhaus GmbH & Co. KG, Mannheim 3 - Kammer Basic Seguro Plus VSG	Bauhaus GmbH & Co. KG 6 - Kammer Lux Varmothek	Glaserei Sand GmbH & Co., Karlsruhe Profilsystem IV Wärmedämmfenster Sand 92
						kein Querschnittsbild vorhanden
Maße	Gesamt	75 x 75 cm	73 x 73 cm	75 x 75 cm	75 x 75 cm	75 x 75 cm
	Glas	61 x 61 cm	57 x 57 cm	50 x 50 cm	56 x 56 cm	62 x 62 cm
Art		feststehend	feststehend	Dreh-Kipp	feststehend	feststehend
Rahmenmaterial		PVC	Holz: Eukalyptus, natur	PVC	PVC	Holz: Fichte, weiß lackiert
Rahmentiefe		60 mm	67 mm	60 mm	90 mm versetzt	83 mm
Glas	Außen	4 mm Float	4 mm Float	6 mm VSG	4 mm WSG	LowE4-1
	Mitte	-	-	-	4 mm Float	4 mm Float
	Innen	4 mm WSG	4 mm WSG	4 mm WSG	4 mm WSG	LowE4-In
SZR - Breite		16 mm	16 mm	14 mm	2 x 16 mm	2 x 16 mm
Gasfüllung SZR		Argon	Argon	Argon	Argon	Argon
U-Wert	U <sub>g</sub>	1,1 W / (m <sup>2</sup> K)	1,1 W / (m <sup>2</sup> K)	1,1 W / (m <sup>2</sup> K)	0,6 W / (m <sup>2</sup> K)	0,6 W / (m <sup>2</sup> K)
	U <sub>f</sub>	1,8 W / (m <sup>2</sup> K)	1,8 W / (m <sup>2</sup> K)	1,8 W / (m <sup>2</sup> K)	1,1 W / (m <sup>2</sup> K)	keine Angabe
	U <sub>w</sub>	1,27 W / (m <sup>2</sup> K)	1,27 W / (m <sup>2</sup> K)	1,27 W / (m <sup>2</sup> K)	0,8 W / (m <sup>2</sup> K)	0,78 W / (m <sup>2</sup> K)
G - Wert ( $\varphi_{fg}$ )		0,06 W / (mK)	0,06 W / (mK)	0,06 W / (mK)	0,06 W / (mK)	keine Angabe
Einsatz bei Versuch		FV-1,1; FV1-5; FV1-6; FV2-8	FV1-3; FV1-7; FV2-10	FV1-4; FV2-11	FV1-2; FV2-9	FV1-8; FV1-9; FV2-12; FV2-13

## 7 Untersuchung der thermischen Stabilität von Fenstern

Folgende Fenster wurden in insgesamt drei Versuchsserien in der oben beschriebenen Versuchseinrichtung mit Strahlungs- und Konvektionswärme beaufschlagt:

Tabelle 7-1: Details der verwendeten Fenster

Versuch	
<b>Versuchsserie 1: Temperaturniveau 1</b>	
FV1-1 PVC,2f	
FV1-5 PVC,2f	
FV1-6 PVC,2f	
FV1-3 Holz,2f	
FV1-7 Holz,2f	
FV1-4 PVC,2f,VSG außen (RC 2, früher WK 2)	
FV1-2 PVC,3f (Passivhaus)	
FV1-8 Holz,3f (Passivhaus)	
FV1-9 Holz,3f (Passivhaus)	
<b>Versuchsserie 2: Temperaturniveau 2</b>	
FV2-8 PVC,2f	
FV2-10 Holz,2f	
FV2-11 PVC,2f,VSG außen (RC 2, früher WK 2)	
FV2-9 PVC,3f (Passivhaus)	
FV2-13 Holz,3f (Passivhaus)	
<b>Versuchsserie 3: Temperaturniveau 3</b>	
FV2-12 Holz,3 f (Passivhaus)	

Die maximale Versuchsdauer betrug ca. 60 min bzw. es erfolgte ein vorzeitiger Abbruch bei vollständigem Versagen der Fenster.

### Versuchsserie 1:

#### **Temperaturniveau 1 (niedrig):**

Bei diesen Versuchen wurde ein Entstehungsbrand mit Temperaturen in der Heißgasschicht bis ca. 370 °C simuliert, mit anschließender Steigerung der Strahlwandleistung in zwei Stufen (40, 50 min) auf Temperaturen bis ca. 500 °C.

Der Abstand zwischen Strahlwand und Fenster betrug 2,35 m.

Tabelle 7-2 zeigt die Einstellungen des Luft- und Flüssiggasverbrauchs (jeweils stöchiometrische Gemische) der Wärmestrahlgwand bei den Versuchen zu Gruppe 1.

Die Einstellung 10/250 (Zeile 5 der Tabelle 7-2) stellt das mit dieser Strahlwand üblicherweise gefahrene Maximum dar, da bei höheren Durchsätzen keine Erhöhung der Wärmestrahlungsabgabe der porösen Brennersteine zu verzeichnen ist, weil das überschüssige Brenngas/Luft-Gemisch deutlich außerhalb der Strahlwand verbrennt und somit nur den konvektiven Anteil erhöht, was bei diesen Versuchen nicht angestrebt wurde.

Tabelle 7-2: Einstellungen des Luft- und Flüssiggasverbrauchs der Wärmestrahlgwand bei den Versuchen zu Gruppe 1

Versuchszeit	Gasverbrauch	Luftverbrauch
	[m <sup>3</sup> /h]	[m <sup>3</sup> /h]
0 min – 41 min	5,8	135
41 min – 60 min	7,6	215
51 min – 60 min	10	250

Abbildung 7-1 zeigt den Temperaturverlauf in der Rauchsicht der Versuchseinrichtung an der oberen Messstelle  $T_{RS0}$  (Rauchsicht Fenster Oberkante, mittig zwischen Wärmestrahlgwand und Fenster) bei den unterschiedlichen Versuchen mit den Temperaturniveaus 1 bis 3.

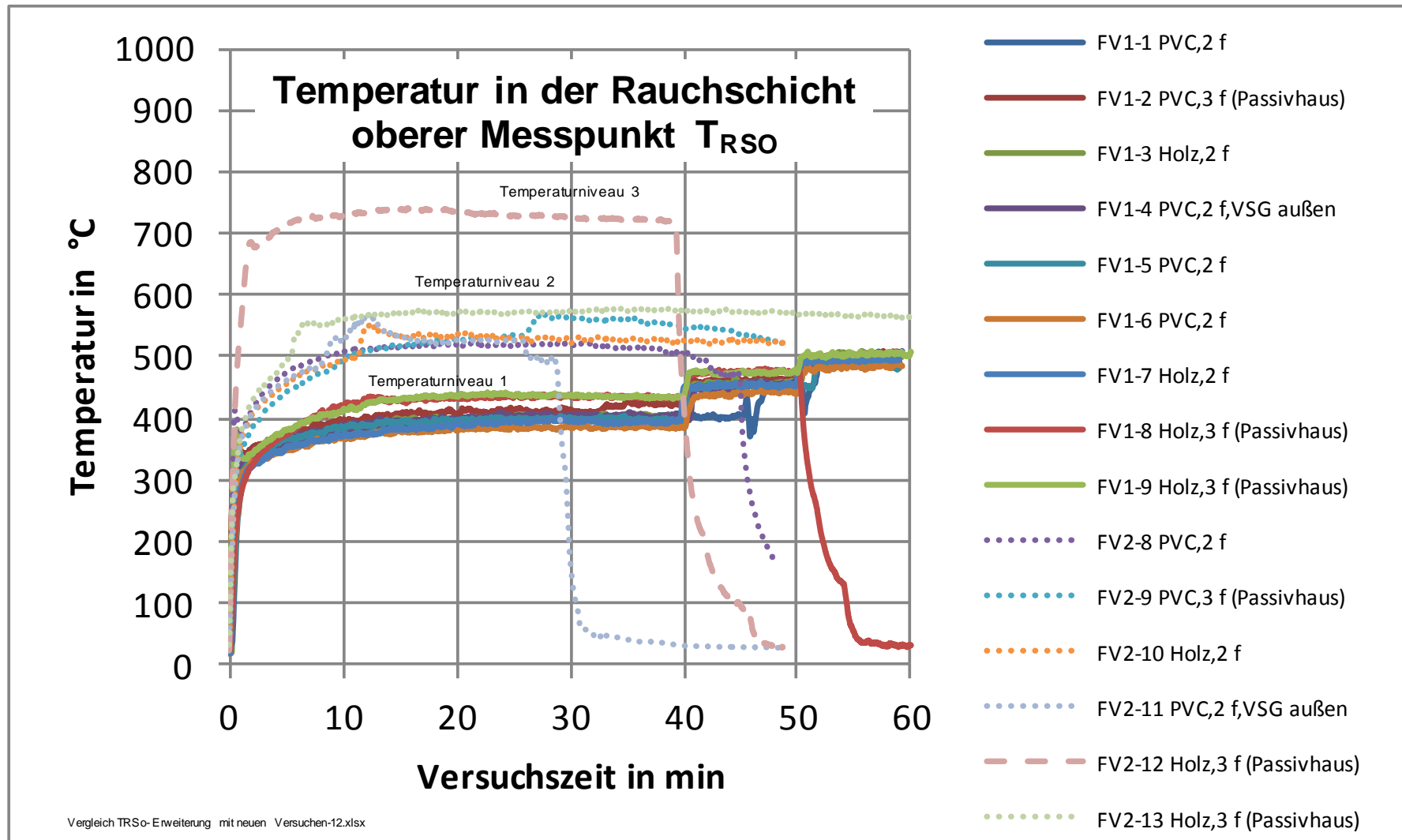


Abbildung 7-1: Temperaturverlauf in der Rauchschiicht an der oberen Messstelle TRSo

Bei den Versuchen

- FV1-1 PVC,2f,
- FV1-2 PVC,3f (Passivhaus)
- FV1-3 Holz,2f
- FV1-4 PVC,2f,VSG außen (RC 2, früher WK 2)

wurden die Thermoelemente, die die Temperaturen am vom Rahmen verdeckten Teil des Glases messen sollten, über eine Bohrung in der Abdeckleiste an ihre Messposition geführt.

Während der ersten Versuche zeigte sich, dass die ersten Risse immer unmittelbar an den Stellen auftraten, wo die Thermoelemente die Scheibe berührten.

Ursächlich hierfür ist vermutlich das Aufheizen des Thermoelementdrahtes außerhalb des Rahmens wobei durch Wärmeleitung die Wärme an die Scheibe übertragen wurde und dort zur Risseinleitung führte.

Wie bereits in Abschnitt 3.4 zum Glasbruch gezeigt wurde, können nach Wagner, E. /38/] vergleichsweise niedrige Temperaturdifferenzen innerhalb der Scheibenfläche von ca. 30 – 60°C, wie sie im Hochbau durchaus vorkommen, bereits Anrisstiefen von ca. 0,08 – 0,02 mm Glasbruch auslösen.

In den Versuchen

- FV1-5 PVC,2f
- FV1-6 PVC,2f

wurden zum Vergleich keine Temperaturmessungen mit Mantelthermoelementen am vom Rahmen verdeckten Teil des Glases durchgeführt.

Hierbei zeigte sich, dass die ersten Risse statt vom Mittelpunkt der Scheibenseite nun von den oberen Ecken ausgingen. Es war jedoch ebenfalls erkennbar, dass der Einfluss der Rahmenthermoelemente im Hinblick auf das zeitliche Auftreten der Risse

se im Glas nur gering ist. Deshalb wurden in den folgenden Versuchen die Thermoelemente im Rahmenbereich durch die Seitenflanken des Rahmens an ihre Positionen geführt (siehe auch Abbildung 7–2), wodurch ein Aufheizen der Thermoelemente durch Wärmestrahlung ausgeschlossen werden konnte.

Lediglich bei Versuch FV2-11 PVC,2f,VSG außen (Fensterflügel mit Dreh-Kippbeschlag) konnte diese Methode nicht angewendet werden, da bedingt durch die größere Rahmendicke gegenüber den feststehenden Verglasungen der anderen Fenster zum Setzen der Bohrung die Scheibe nicht getroffen wurde und dabei versehentlich der Scheibenzwischenraum angebohrt wurde. Da dadurch von einer Verfälschung des Messergebnisses auszugehen war, wurde dieses Fenster nur noch zur Überprüfung der mechanischen Stabilität eingesetzt.

Die Abbildung 7-3 zeigt das Bruchbild beispielhaft für den Versuch FV1-6 PVC, 2f - ohne Thermoelemente im Rahmen.

Die Abbildung 7-4 zeigt das Bruchbild beispielhaft für den Versuch FV1-7 Holz, 2f mit Thermoelementen im äußeren Rahmenbereich verlegt und mittels Bohrung im Rahmen an die Glasscheibe geführt. Man erkennt hier im Gegensatz zu Abbildung 7-3 den Rissbeginn im Bereich der Thermoelementpositionen im Randbereich.



Abbildung 7-2: Führung der Thermoelemente zur Messung im verdeckten Glasbereich

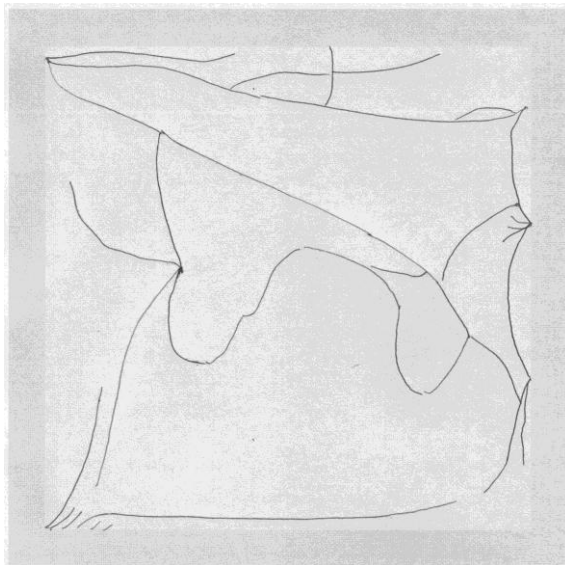


Abbildung 7-3: Bruchbild FV1-6 PVC,2f - keine Thermoelemente im Rahmen

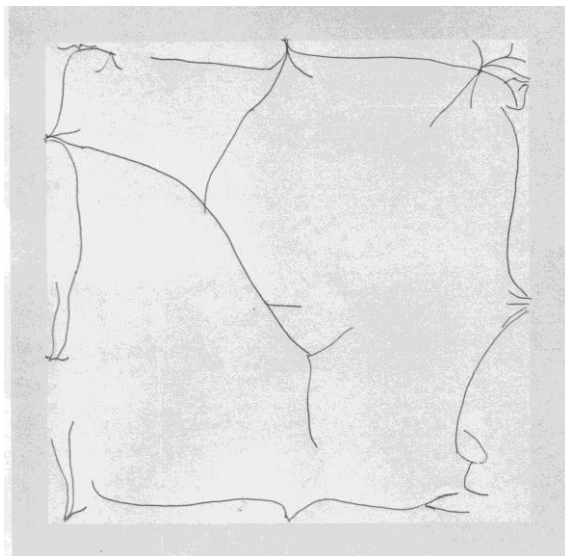


Abbildung 7-4: Bruchbild FV1-7 Holz, 2f - Thermoelemente im äußeren Rahmenbereich verlegt und mittels Bohrung im Rahmen an die Glasscheibe geführt.

## **Versuchsserie 2:**

### ***Temperaturniveau 2 (mittel):***

Bei diesen Versuchen wurden Temperaturen um 550 °C in der Rauchsicht vor dem Fenster erzeugt, um einen charakteristischen Temperaturbereich wiederzugeben, der einen einsetzenden Flashover kennzeichnet (neben der auch über die Wärmestrah-



lung von rund 20 kW/m<sup>2</sup> aus der Rauchschiicht auf brennbare Gegenstände gängigen Definition eines einsetzenden Flashovers).

Der Abstand Wärmestrahlwand und Fenster betrug 1 m.

Tabelle 7-3 zeigt die Einstellungen des Luft- und Flüssiggasverbrauchs der Wärmestrahlwand bei den Versuchen zu Gruppe 2.

Tabelle 7-3: Einstellungen des Luft- und Flüssiggasverbrauchs der Wärmestrahlwand bei den Versuchen zu Versuchsserie 2

Versuchszeit	Gasverbrauch	Luftverbrauch
	[m <sup>3</sup> /h]	[m <sup>3</sup> /h]
0 min – 60 min	5,8	135

Abbildung 7-1 enthält auch den Temperaturverlauf in der Rauchschiicht an der oberen Messstelle TRSo (Rauchschiicht Fenster Oberkante, mittig zwischen Wärmestrahlwand und Fenster) bei den unterschiedlichen Versuchen des Temperaturniveaus 2.

### **Versuchsserie 3:**

#### ***Temperaturniveau 3 (hoch):***

Ein Versuch wurde mit über der gesamten Versuchsdauer ungefähr konstanter Temperatur in der Heißgasschiicht von ca. 730 °C durchgeführt. Der Abstand zwischen Wärmestrahlwand und Fenster betrug 1 m.

Tabelle 7-4 zeigt die Einstellungen des Luft- und Flüssiggasverbrauchs der Wärmestrahlwand bei den Versuchen zu Versuchsserie 3.

Tabelle 7-4: Einstellungen des Luft- und Flüssiggasverbrauchs der Wärmestrahlwand bei den Versuchen zu Versuchsserie 3

Versuchszeit	Gasverbrauch	Luftverbrauch
	[m <sup>3</sup> /h]	[m <sup>3</sup> /h]
0 min – 60 min	10	250

Abbildung 7-1 zeigt ebenfalls den Temperaturverlauf in der Rauchsicht an der oberen Messstelle  $T_{RS0}$  (Rauchsicht Fenster Oberkante, mittig zwischen Wärmestrahlwand und Fenster) bei den unterschiedlichen Versuchen des Temperaturniveau 3.

Diese Temperatur entspricht einem erhöhten Temperaturniveau in einem Brandraum nach den Flashover während der Vollbrandphase. Allerdings sei an dieser Stelle bemerkt, dass z.B. bei einem Wohnzimmerbrand Maximaltemperaturen im Bereich um 1000°C auftreten.

## **7.1 Versuchsergebnisse**

Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse dargestellt.

Dabei werden die Tabellenzeilen und Diagramme entsprechend den unterschiedlichen Fensterarten farblich gruppiert.

### **7.1.1 Erste Rissbildung**

Die Zeiten für das Auftreten der ersten Risse bei den unterschiedlichen Fenstern und Temperaturniveaus sind Tabelle 7 – 5 zu entnehmen.

Zur Verdeutlichung der eingesetzten Fenster wurden bei der Versuchsauswertung gleiche Fenster mit derselben Hintergrundfarbe gekennzeichnet.

Die Dokumentation des zeitlichen Verlaufs der Rissbildungen, insbesondere der Rissbildung auch der inneren Scheiben bei Dreifachverglasungen, ist bei der Auswertung mit Videokamera, Digitalkamera und Wärmebildkamera aufgrund von schwierigen Lichtverhältnissen und auftretenden Reflexionen zum Teil sehr schwierig.

Zudem musste die hintere Kamera unter der Wärmestrahlwand nach einiger Zeit wegen zu hoher Temperaturen entfernt werden, um deren Zerstörung zu vermeiden.

Tabelle 7-5: Auftreten der ersten Rissbildung – Messwerte für diverse Temperaturen und Wärmeströme.

Versuch	1. Riss [min]	TRSo [°C]	TVGo [°C]	TVRo [°C]	$\Delta T_o$ =TVGo - TVRo [°C]	TVGm [°C]	$\Delta T_{mo}$ =TVGm - TVRo [°C]	WSAo [W/cm <sup>2</sup> ]	WSAm [W/cm <sup>2</sup> ]	WSAu [W/cm <sup>2</sup> ]
<b>Temperaturniveau 1</b>										
FV1-1 PVC,2f	03:40	350,6	173,6	120,8	52,8	213,4	92,6	0,7	0,6	0,4
FV1-5 PVC,2f	02:42	341,8	218,9	n. a.	-	210,1	-	n. a.	n. a.	n. a.
FV1-6 PVC,2f	02:26	330,1	174,4	n. a.	-	190,1	-	n. a.	n. a.	n. a.
FV1-3 Holz,2f	01:05	302,3	103,4	27,3	76,1	183,5	156,2	0,5	0,5	0,2
FV1-7 Holz,2f	02:32	326,8	160,2	18,2	142,0	206,4	188,2	n. a.	n. a.	n. a.
FV1-4 PVC,2f,VSG außen (RC 2, früher WK 2)	02:19	338,4	183,6	37,3	146,3	218,0	180,7	0,6	0,6	0,3
FV1-2 PVC,3f (Passivhaus)	00:05	130,5	42,1	26,5	15,6	66,7	40,2	0,4	0,5	0,3
FV1-8 Holz,3f (Passivhaus)	01:42	314,3	232,7	20,9	211,8	187,2	166,3	n. a.	0,2	n. a.
FV1-9 Holz,3f (Passivhaus)	02:16	347,4	267,3	n. a.	250,3	215,4	198,4	n. a.	0,9	n. a.
<b>Temperaturniveau 2</b>										
FV2-8 PVC,2f	01:13	380,5	215,3	20,3	195,0	261,4	241,1	n. a.	n. a.	n. a.
FV2-10 Holz,2f	01:18	376,6	224,9	21,2	203,7	269,0	247,8	n. a.	n. a.	n. a.
FV2-11 PVC,2f,VSG außen (RC 2, früher WK 2)	00:56	357,8	142,5	n. a.	-	325,4	-	n. a.	n. a.	n. a.
FV2-9 PVC,3f (Passivhaus)	01:07	349,0	168,3	26,2	142,1	238,4	212,2	n. a.	n. a.	n. a.
FV2-13 Holz,3f (Passivhaus)	01:00	369,2	325,1	19,9	305,2	327,3	307,4	n. a.	0,5	n. a.
<b>Temperaturniveau 3</b>										
FV2-12 Holz,3 f (Passivhaus)	00:52	519,7	410,8	22,3	388,5	369,2	346,9	n. a.	2,0	n. a.

Man erkennt, dass mit zunehmender Wärmebelastung die 1. Rissbildung früher eintritt.

Beim Temperaturniveau 1 tritt die 1. Rissbildung im Mittel bei 1 min 50 s auf.

Beim Temperaturniveau 2 tritt die 1. Rissbildung im Mittel bei 1 min 7 s auf und bei Temperaturniveau 3 nach 52 s.

Man erkennt dass, die erste Rissbildung sehr früh eintritt. Dies korrespondiert auch mit den zulässigen Betriebstemperaturen für Verglasungen, siehe die ausführliche Beschreibung in Abschnitt 3.3.1.

Die erste Rissbildung sagt jedoch noch nichts darüber aus, wie lange die Scheiben im Endeffekt im Fenster auch im gerissenen Zustand einen relativ dichten Raumabschluss bilden und verhindern, dass zündfähige Brandpyrolyseprodukte abströmen können. Hierdurch ergibt sich eine Gefährdung der Feuerwehreinsatz- und Rettungskräfte durch die gefährlichen Brandphänomene Rollover und Backdraft. Dies ist bei der rechnerischen Beschreibung des Versagens von Verglasungen unbedingt zu berücksichtigen.

Die nachfolgenden Schaubilder stellen die Ergebnisse aus Tabelle 7- 5 grafisch gegenüber.

Abbildung 7-5 zeigt die Zeiten bis zur ersten Rissbildung der Innenscheibe in den Fenstern,

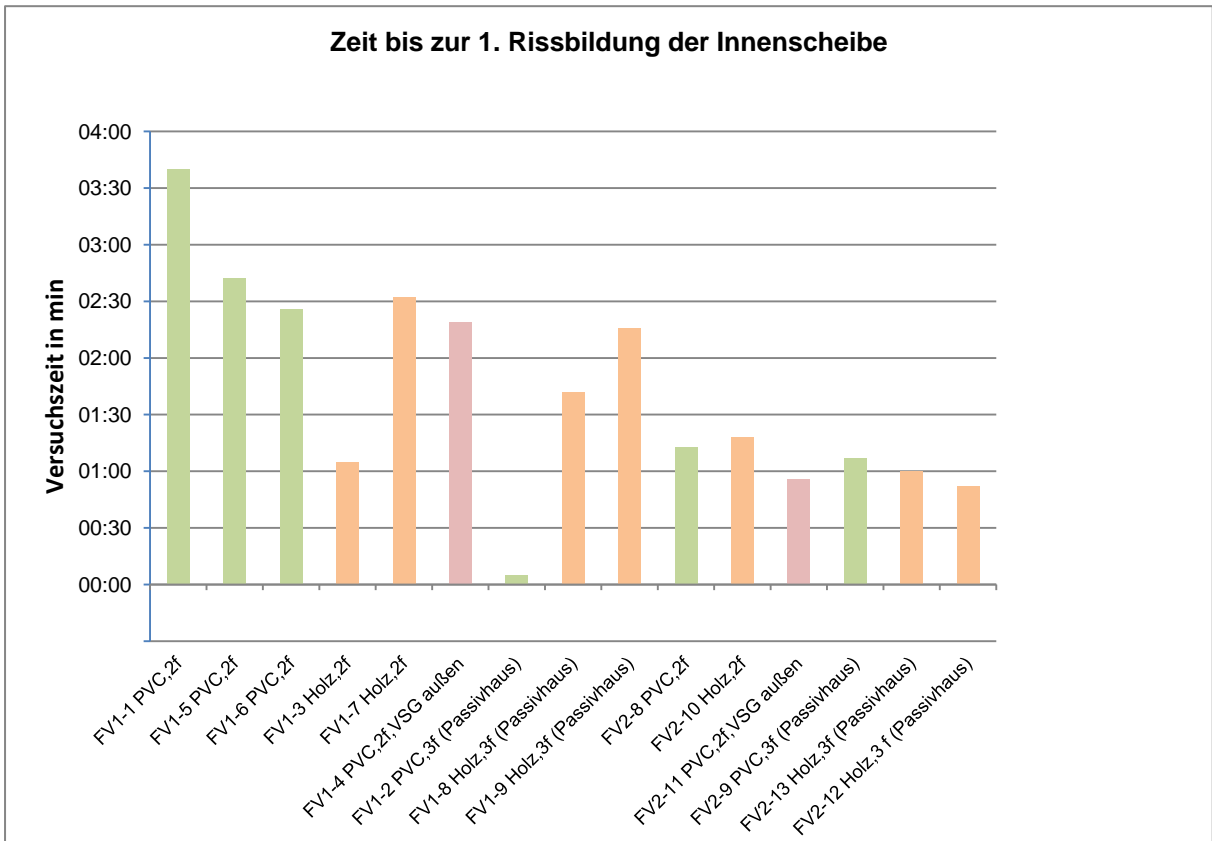


Abbildung 7-5: Zeiten bis zur ersten Rissbildung der wärmezugewandten Innenscheibe

Abbildung 7-6 zeigt die Temperaturen an den Messstellen TVGm, TRSo und TVGo bei der ersten Rissbildung in der wärmezugewandten Innenscheibe.

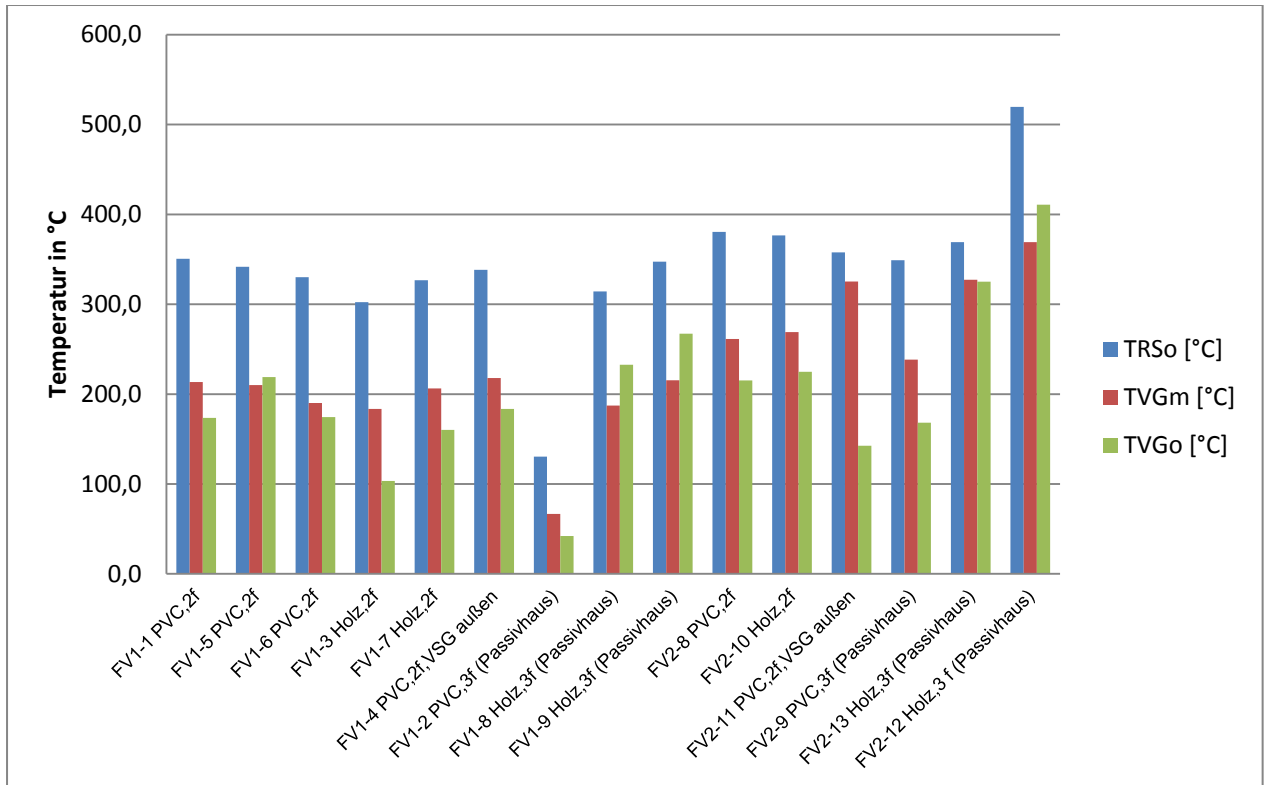


Abbildung 7-6: Temperaturen bei erster Rissbildung der wärmezugewandten Innenscheibe - Messstelle TVGm, TRSo und TVGo

Die Temperaturdifferenzen ( $\Delta T_o$ ) zwischen der Temperatur an dem vom Rahmen verdeckten Glasstück TVRo an der Fensteroberseite und der Temperatur der Glasoberseite TVGo werden in Abbildung 7-8 gezeigt.

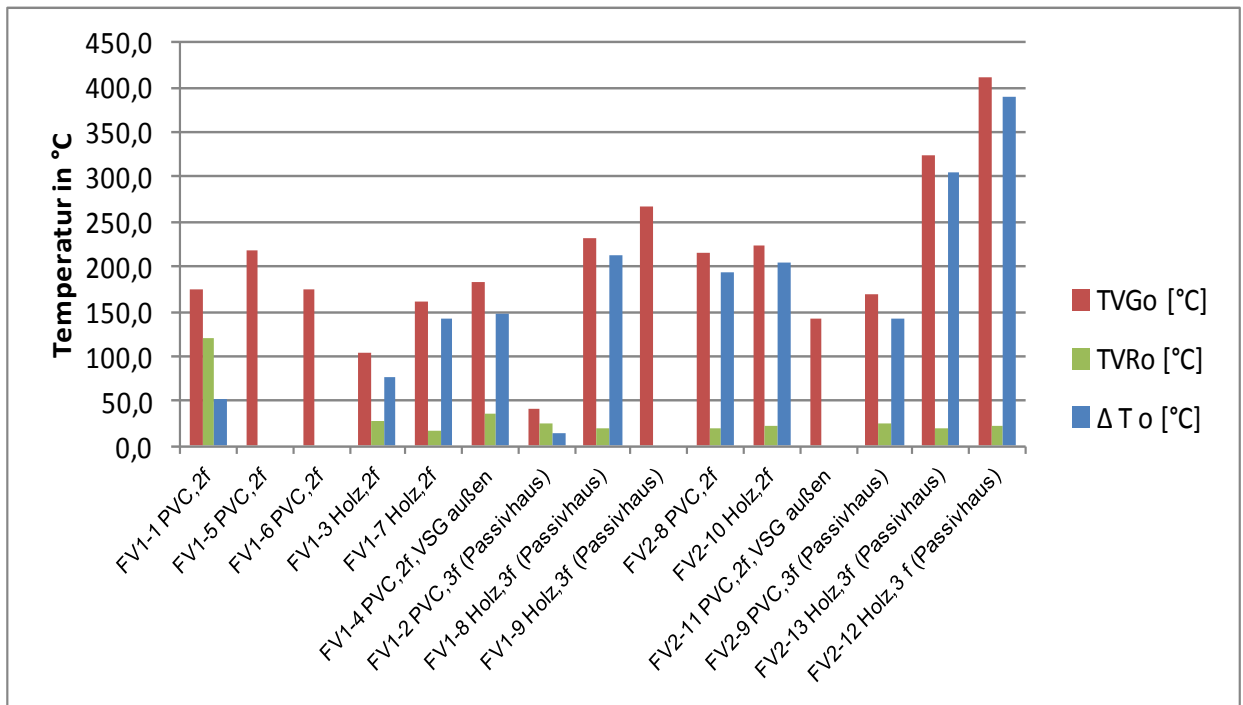


Abbildung 7-7: Gegenüberstellung TVRo, TVGo und der resultierenden Temperaturdifferenz  $\Delta T_o$  bei erster Rissbildung der wärmezugewandten Innenscheibe.

### 7.1.2 Fenster nach der thermischen Belastung - Schadensausmaß

Abhängig von der thermischen Belastung durch die unterschiedlichen Temperaturniveaus und abhängig von den individuellen Fensterkonstruktionen zeigten sich unterschiedliche Schädigungen an den untersuchten Fenstern.

In den Bildern werden der Zustand der Fenster vor und nach der thermischen Belastung, die Zeit des 1. Risses sowie der Brandrauch- und Flammendurchtritt qualitativ aufgezeigt. (siehe auch die Tabelle 6-2 und 7-5)

#### 7.1.2.1 Versuchsserie 1 (Temperaturniveau 1: niedrig)

Die nachfolgenden Abbildungen 7-8 bis 7-16 zeigen die Fenster der Versuchsserie 1 mit niedriger thermischer Belastung.



## Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV1-1, PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung

### Temperaturniveau 1 (niedrig)



Rückseite  
(zur Wärmestrahlerwand)



Rückseite  
(zur Wärmestrahlerwand)

1. Riss Innenscheibe: 3 min 40 s  
Kein nennenswerter Brandrauch- und Flammendurchtritt durch die Außenseite der Verglasung während der Versuchsdauer von 1 h



Abbildung 7-8: Versuch FV1-1 - PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch

## Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV1-5 PVC-R., 2 fach Verglasung

### Temperaturniveau 1 (niedrig)



Rückseite  
(zur Wärmestrahlerwand)



Rückseite (oben) und Vorderseite (unten)

1. Riss Innenscheibe: 2 min 42 s  
Kein nennenswerter Brandrauch- und Flammendurchtritt durch die Außenseite der Verglasung während der Versuchsdauer von 1 h



Abbildung 7-9: Versuch FV1-5 - PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch

## Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV1-6 PVC-R., 2 fach Verglasung

### Temperaturniveau 1 (niedrig)



Rückseite  
(zur Wärmestrahlerwand)



Rückseite  
(zur Wärmestrahlerwand)

1. Riss Innenscheibe: 2 min 26 s

Kein nennenswerter Brandrauch- und Flammendurchtritt durch die Außenseite der Verglasung während der Versuchsdauer von 1 h



Abbildung 7-10: Versuch FV1-6 - PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch

## Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV1-3 Holz-R., 2 fach Verglasung

### Temperaturniveau 1 (niedrig)



Rückseite  
(zur Wärmestrahlerwand)



Rückseite (oben) und Vorderseite (unten)

1. Riss Innenscheibe: 1 min 5 s

Kein nennenswerter Brandrauch- und Flammendurchtritt durch die Außenseite der Verglasung während der Versuchsdauer von 1 h



Abbildung 7-11: Versuch FV1-3 - Holz-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch



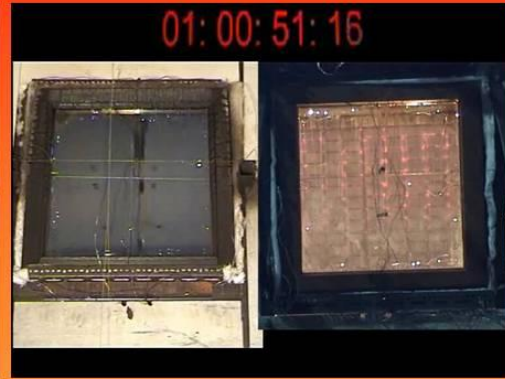
## Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV1-7 Holz-R., 2 fach Verglasung

Temperaturniveau 1 (niedrig)



Vorderseite



Rückseite (links) und Vorderseite (rechts)

1. Riss Innenscheibe: 2 min 32 s

Kein nennenswerter Brandrauch- und Flammendurchtritt durch die Außenseite der Verglasung während der Versuchsdauer von 1 h



Abbildung 7-12: Versuch FV1-7 - Holz-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch

## Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV1-4 PVC-R., 2 fach Verglasung, äußere Sch.: VSG

Temperaturniveau 1 (niedrig)



Rückseite  
(zur Wärmestrahlerwand)



Rückseite (oben) und Vorderseite(unten)

1. Riss Innenscheibe: 2 min 19 s

Kein nennenswerter Brandrauch- und Flammendurchtritt durch die Außenseite der Verglasung während der Versuchsdauer von 1 h

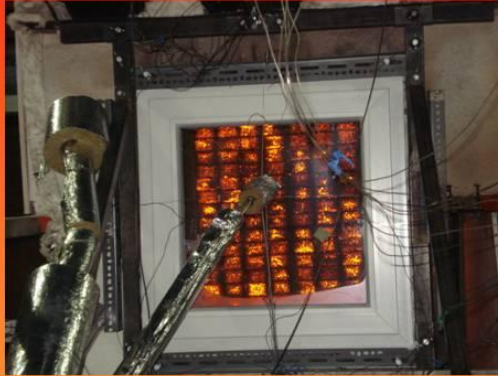


Abbildung 7-13: Versuch FV1-4 - PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG (Widerstandsklasse RC2 (früher WK 2)) – Fenster vor und nach dem Versuch

### Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV1-2, PVC-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus)

Temperaturniveau 1 (niedrig)



Vorderseite



Rückseite  
(zur Wärmestrahlerwand)

1. Riss Innenscheibe: 5 s  
Kein nennenswerter Brandrauch- und Flammendurchtritt durch die Außenseite der Verglasung während der Versuchsdauer von 1 h



Abbildung 7-14: Versuch FV1-2 - PVC-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Fenster vor und nach dem Versuch

### Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV1-8 Holz-R., weiß lackiert, 3 fach Verglasung (Passivhaus)

Temperaturniveau 1 (niedrig)



Vorderseite



Vorderseite

1. Riss Innenscheibe: 1 min 42 s  
Kein nennenswerter Brandrauch- und Flammendurchtritt durch die Außenseite der Verglasung während der Versuchsdauer von 1 h



Abbildung 7-15: Versuch FV1-8 - Holz-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Fenster vor und nach dem Versuch

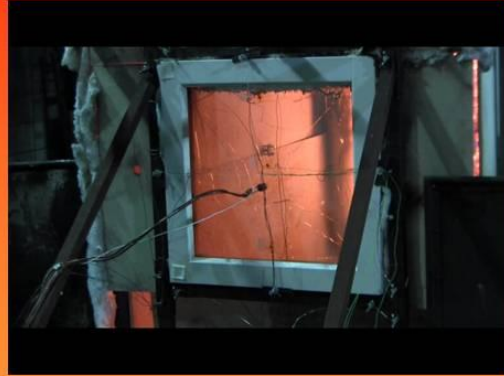
## Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV1-9 Holz-R., weiß lackiert, 3 fach Verglasung (Passivhaus)

Temperaturniveau 1 (niedrig)



Vorderseite



Vorderseite

1. Riss Innenscheibe: 2 min 16 s

Kein nennenswerter Brandrauch- und Flammendurchtritt durch die Außenseite der Verglasung während der Versuchsdauer von 1 h



Abbildung 7-16: Versuch FV1-9 - Holz-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Fenster vor und nach dem Versuch

### 7.1.2.2 Versuchsserie 2 (Temperaturniveau 2: mittel)

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Zeiten bis zum Zerfall der inneren Scheibe (wärmezugewandte Seite), der mittleren Scheibe bei den Passivhausfenstern sowie den Zerfall der äußeren Scheibe.

Tabelle 7-6: Zerfall der inneren Scheibe (wärmezugewandte Seite)

Temperaturniveau 2	Zeit
FV2-8 PVC,2f	6 min 4 s
FV2-10 Holz,2f	ca. 57 min Flammdurchtritt im linken und rechten Rahmenbereich, Verglasung hierbei größtenteils noch intakt (Scheiben zerfallen nach Zurückfahren des Gestells bei Versuchsende)
FV2-11 PVC,2f,VSG außen (RC 2, früher WK 2)	10 min 33 s
FV2-9 PVC,3f (Passivhaus)	43 min 52 s (alle 3 Scheiben zersprangen plötzlich ohne vorherige Anzeichen zeitgleich)
FV2-13 Holz,3f (Passivhaus)	keine Zerstörung während der Versuchsdauer von 60 min
Temperaturniveau 3	
FV2-12 Holz,3 f (Passivhaus)	9 min 4 s

Tabelle 7-7: Zerfall der mittleren Scheibe bei den Passivhausfenstern

Temperaturniveau 2	Zeit
FV2-9 PVC,3f (Passivhaus)	43 min 52 s (alle 3 Scheiben zersprangen plötzlich ohne vorherige Anzeichen zeitgleich)
FV2-13 Holz,3f (Passivhaus)	keine Zerstörung während der Versuchsdauer von 60 min
Temperaturniveau 3	
FV2-12 Holz,3 f (Passivhaus)	21 min 44 s

Tabelle 7-8: Zerfall der äußeren Scheibe

Temperaturniveau 2	Zeit
FV2-8 PVC,2f	31 min 42 s
FV2-10 Holz,2f	ca. 57 min Flammdurchtritt im linken und rechten Rahmenbereich, Verglasung hierbei größtenteils noch intakt (Scheiben zerfallen nach Zurückfahren des Gestells bei Versuchsende)
FV2-11 PVC,2f,VSG außen (RC 2, früher WK 2)	26 min 22 s
FV2-9 PVC,3f (Passivhaus)	43 min 52 s (alle 3 Scheiben zersprangen plötzlich ohne vorherige Anzeichen zeitgleich)
FV2-13 Holz,3f (Passivhaus)	keine Zerstörung während der Versuchsdauer von 60 min
Temperaturniveau 3	
FV2-12 Holz,3 f (Passivhaus)	30 min

Die nachfolgenden Abbildungen 7-17 bis 7-21 zeigen die Fenster der Versuchserie 2 mit mittlerer thermischer Belastung.



## Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV2-8 PVC-R, 2 fach Verglasung

Temperaturniveau 2 (mittel)



Vorderseite



Vorderseite

1. Riss Innenscheibe: 1 min 13 s, Außenscheibe zerstört nach 31 min 42 s



Abbildung 7-17: Versuch FV2-8 - PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch

## Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV2-10 Holz-R, 2 fach Verglasung

Temperaturniveau 2 (mittel)



Rückseite (links) und Vorderseite(rechts)



Vorderseite

1. Riss Innenscheibe: 1 min 18 s,  
Flammdurchtritt im linken und rechten Rahmenbereich nach ca. 57 min, Verglasung hierbei größtenteils noch intakt,  
Versuchsende: Scheiben zerfallen nach Zurückfahren des Gestells, Flammdurchtritt auch im oberen Rahmenbereich



Abbildung 7-18: Versuch FV2-10 - Holz-Rahmen, 2 fach Verglasung – Fenster vor und nach dem Versuch



### Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV2-11 PVC-R, 2 fach Verglasung, äußere Sch. :VSG

#### Temperaturniveau 2 (mittel)



Vorderseite



Rückseite  
(zur Wärmestrahlerwand)

1. Riss Innenscheibe: 56 s, Außenscheibe zerstört nach 26 min 22 s

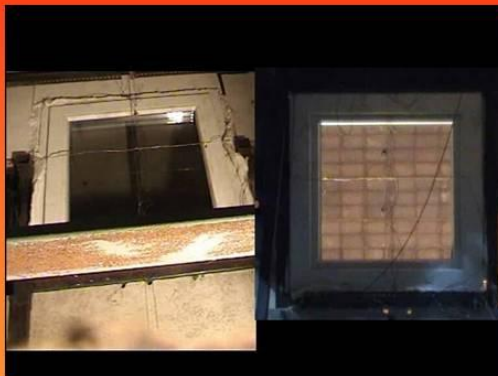


Abbildung 7-19: Versuch FV2-11 - PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG (Widerstandsklasse RC2 (früher WK 2)) – Fenster vor und nach dem Versuch

### Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV2-9 PVC-R, 3 fach Verglasung (Passivhaus)

#### Temperaturniveau 2 (mittel)



Rückseite (links) und Vorderseite (rechts)



Vorderseite

1. Riss Innenscheibe: 1 min 7 s, Außenscheibe zerstört nach 43 min 52 s



Abbildung 7-20: Versuch FV2-9 - PVC-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Fenster vor und nach dem Versuch



Abbildung 7-21: FV2-9 PVC,3f (Passivhaus): Platzen aller drei Scheiben der Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung zeitgleich

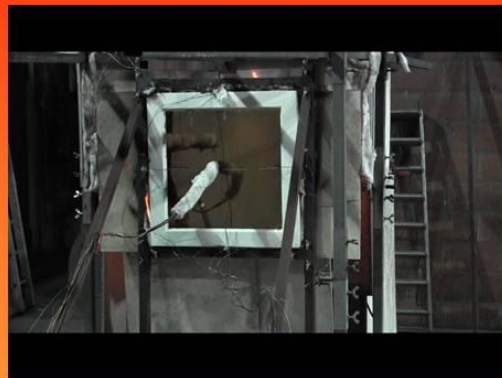
### Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV2-13 Holz-R, weiß lackiert, 3 fach Verglasung (Passivhaus)

Temperaturniveau 2 (mittel)



Vorderseite



Vorderseite

1. Riss Innenscheibe: 1 min, Außenscheibe nicht zerstört während der Versuchsdauer von 1 h



Abbildung 7-22: Versuch FV2-13 - Holz-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Fenster vor und nach dem Versuch

### 7.1.2.3 Versuchsserie 3 (Temperaturniveau 3: hoch)

Die nachfolgenden Abbildungen 7-23 und 7-24 zeigen das Fenster der Versuchsserie 3 mit hoher thermischer Belastung.

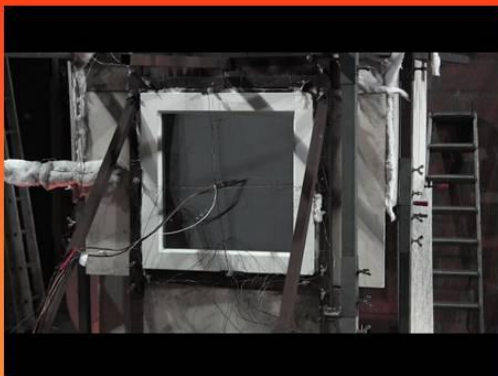


Abbildung 7-23: Versuch FV2-13 - Holz-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Versuchszeit: ca. 30 min

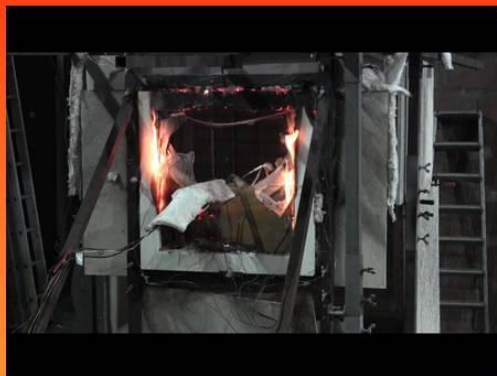
#### Fenster **vor** und **nach** dem Versuch

Versuch: FV2-12 Holz-R, weiß lackiert, 3 fach Verglasung (Passivhaus)

**Temperaturniveau 3 (hoch)**



Vorderseite



Vorderseite

1. Riss Innenscheibe: 52 s, **Außenscheibe zerstört nach 30 min**



Abbildung 7-24: Versuch FV2-13 - Holz-Rahmen, 3 fach Verglasung (Passivhaus) – Fenster vor und nach dem Versuch

## 7.2 Zusammenfassung der wesentlichen Versuchsergebnisse zum Verhalten von Fenstern bei Brandbeanspruchung

Bei den Versuchen wurden folgende Fenster gemäß Tabelle 7-9 einer thermischen Belastung unterzogen.

Tabelle 7-9: Fensterversuche - Zusammenstellung

Fensterart		Temperaturniveau		
Rahmen	Verglasung	1 (niedrig)	2 (mittel)	3 (hoch)
<b>PVC</b>	2-fach	3	1	
<b>Holz</b>	2-fach	2	1	
<b>PVC</b>	2-fach, außen VSG (RC2, früher WK II)	1	1	
<b>PVC</b>	3-fach („Passiv- haus“)	1	1	
<b>Holz</b>	3-fach („Passiv- haus“)	2	1	1

Wie bereits erwähnt, tritt die erste Rissbildung bei den verwendeten Fenstern sehr früh ein. Die erste Rissbildung sagt jedoch noch nichts darüber aus, wie lange die Scheiben im Endeffekt im Fenster auch im gerissenen Zustand einen relativ dichten Raumabschluss bilden und verhindern, dass zündfähige Brandpyrolyseprodukte abströmen können. Hierdurch ergibt sich eine Gefährdung der Feuerwehreinsatz- und Rettungskräfte durch die gefährlichen Brandphänomene Rollover und Backdraft.

Bei der rechnerischen Beschreibung des Versagens von Verglasungen ist daher der erst derjenige Zeitpunkt zu berücksichtigen, bei dem das Fenster durch Versagen eine Öffnung weitgehend vollständig frei gibt. Entscheidend sind hierbei nicht nur die Werkstoffkenngrößen des Glases wie z.B. zulässige Betriebstemperaturen für das Glas, sondern das Versagen der Verglasung auch in Wechselwirkung mit den Eigenschaften des Rahmens (Größe, Material, Dichtungen, etc.) und der Einbausituation.

Tabelle 7-10 zeigt die gemittelten Werte der Versagenszeiten der Fenster in [min:s].  
bei den unterschiedlichen thermischen Belastungen.

Hierbei bedeuten die Abkürzungen

Z = Zerstörung

TZ = teilweise Zerstörung

NZ= nicht zerstört



Tabelle 7-10: Versagenszeiten der Fenster

Fensterart			Temperaturniveau		
			Z = Zerstörung TZ = teilweise Zerstörung NZ = nicht zerstört		
Rahmen	Verglasung		1 (niedrig)	2 (mittel)	3 (hoch)
PVC	2-fach	Innenscheibe 1. Riss	2:56	1:13	
		<b>Außenscheibe</b>	NZ	Z: 31:42	
Holz	2-fach	Innenscheibe 1. Riss	1:49	1:18	
		<b>Außenscheibe</b>	NZ	<b>TZ: 60:00</b>	
PVC	2-fach außen VSG (RC2, früher WK II)	Innenscheibe 1. Riss	2:19	0:56	
		<b>Außenscheibe</b>	NZ	Z: 26:22	
PVC	3-fach („Passiv- haus“)	Innenscheibe 1. Riss	0:05	1:07	
		<b>Außenscheibe</b>	NZ	Z: 43:52	
Holz	3-fach („Passiv- haus“)	Innenscheibe 1. Riss	1:59	1:00	0:52
		<b>Außenscheibe</b>	NZ	<b>NZ: &gt; 60:00</b>	<b>Z: 30:00</b>

In der Versuchsreihe 1 behielten sämtliche Scheiben ihre Stabilität. Sie zerfielen erst nach Abschalten der Wärmestrahlgwand.

Die Temperaturen aus Versuchsreihe 1 reichen nicht, um Scheiben heutiger Bauweise zu zerstören.

Dies bedeutet, dass bei geringer Wärmeentwicklung z.B. einem Schwelbrand bei einem Gebäude moderner Bauweise nicht davon auszugehen ist, dass die geschlossenen Fenster als „automatischer“ Rauchabzug zur Verfügung stehen.

Im Falle von „nicht zerstört“ werden keine zündfähigen Brandrauchpyrolyseprodukte durch das Fenster an die Umgebung abgeführt und es kann daher zu kritischen Brandphänomenen Rollover bzw. Rauchdurchzündung und Backdraft mit einer entsprechend hohen Gefährdung der Feuerwehreinsatz- und Rettungskräfte insbesondere beim Innenangriff kommen.

Die Versuche belegten einen deutlichen Einfluss des Rahmenmaterials auf die Standzeiten der Verglasung.

Wie die Versuche außerdem gezeigt haben, halten die Außenscheiben bei Fenstern mit Holzrahmen sowohl mit einer 2-fach als auch einer 3-fach Verglasung einer höheren Temperaturbeanspruchung länger stand und erhöhen daher durch die Verhinderung des Rauch- und Wärmeabzuges die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Rollovers oder Backdrafts (siehe Tabelle 7-10).

Die VSG - Verglasung mit PVC - Rahmen wurde schneller als die anderen Verglasungen komplett zerstört

Die Versuche belegten also einen deutlichen Einfluss des Rahmenmaterials auf die Standzeiten der Verglasung.

Es zeigte sich, dass die Scheiben in Holz – Rahmen deutlich länger der Wärmeeinwirkung widerstehen, zum Teil für mehr als 1 Stunde.



Abbildung 7-25: FV1-3 Holz,2f: Temperatureinwirkung auf den Holzrahmen nach 10 Minuten (Temperaturniveau 1)

Die Holzrahmen verkohlten im Gegensatz zu PVC-Rahmen nur in kleineren Teilbereichen und behielten dadurch ihre Stabilität.





Abbildung 7-26: FV2-10 Holz,2f – Fensterrahmen bei Versuchsende (Temperaturniveau 2)

Dies wird durch auch durch Abbildung 7 – 27 veranschaulicht. Der anliegende Maßstab zeigt, dass etwa 1,5 cm des Holzes verbrannt sind.

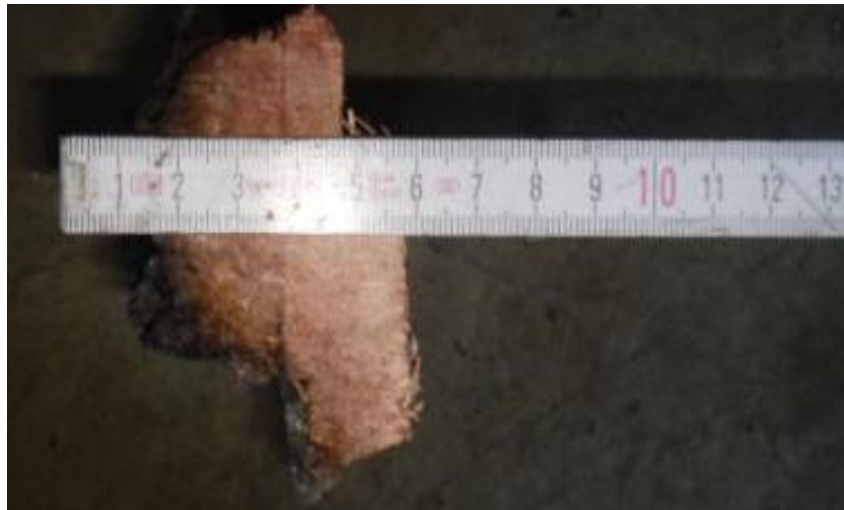


Abbildung 7-27: FV2-10 Holz,2f – Querschnitt des Holzrahmens nach Versuchsende (Temperaturniveau 2)



Abbildung 7-28: FV2- 8 PVC 2f – Fensterrahmen bei Versuchsende (Temperaturniveau 2)

In Abbildung 7-28 und in Abbildung 7-29 ist die deutliche Verformung des PVC-Rahmenprofils bei Versuchsende erkennbar.

Bei den PVC – Rahmen sind starke Temperatureinwirkungen schon nach unter 10 Minuten erkennbar. (Aufschmelzen und Aufschäumen von Rahmen, Schwarzfärbung durch Verkohlen).

Holzrahmen behalten gegenüber den PVC Rahmen nahezu ihre Form.



Abbildung 7-29: FV 1-4: Aufgeschnittener Rahmen (Temperaturniveau 1)

Ursächlich für die höhere Standfestigkeit der Wärmeschutzverglasung mit Holzrahmen gegenüber PVC sind die Eigenschaften des Werkstoffes Holz.

Holz verkohlt bei Brandeinwirkung an der Oberfläche. Die Holzkohleschicht bildet eine Schutzschicht, die den weiteren Abbrand des Holzes stark verzögert. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Holzes bleibt die Festigkeit und Tragfähigkeit der Bauteile verhältnismäßig lange erhalten. Ein weiterer Vorteil ist der Erhalt der vollen Tragfähigkeit im unverbrannten Kern des Holzes.

Holz hat gegenüber PVC einen wesentlich niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (siehe hierzu Tabelle 3-4 Lineare Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Materialien nach Wagner, E. /38/.

:

$$\alpha_{Holz} = \text{ca. } 5,4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_{PVC} = 78 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Durch die geringe thermische Längenänderung des Holzes werden im Brandfall Zwangskräfte auf benachbarte Bauteile vermieden.

Es zeigte sich weiterhin eine deutlich stärkere Rauchbildung bei den Versuchen, in denen Fenster mit PVC – Rahmen eingesetzt waren, als bei den Versuchen mit Holzrahmen.

Bei den Versuchen mit PVC – Rahmen wurden derart große Rauchmengen produziert, dass zu Versuchsende die Halle massiv verraucht war.

Ein Arbeiten war nur noch unter Atemschutz möglich.



Abbildung 7-30: Starke Verrauchung der Versuchshalle bei Versuchsende bei Versuch FV2-11 (PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG)

Bei den Holzrahmen war nahezu kein Rauch sichtbar.

Bei Realbränden wird dies allerdings auf Grund des ohnehin beim Brand entstehenden hohen Schadstoffpotentials der sonstigen Brandstoffe keine entscheidende Rolle spielen.

Besonderheiten ergaben sich beim Verbundsicherheitsglas des Fensters in Versuch FV2-11 (PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG).

Bedingt durch die Wärmeeinwirkung löste sich die *PVB* (Polyvinyl-Butyral-Kunststoff-Folie) und es bildeten sich nach etwa 6 Minuten Bläschen zwischen den Scheiben. Im weiteren Verlauf veränderten die Bläschen ihre Form und bildeten fingerartige Formen, so dass sie die Form einer Blume annahmen.

Dieses ist in Abbildung 7 – 31 erkennbar.



Abbildung 7-31: Blasen- und Fingerbildung der Folie bei Versuch FV2-11 (PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG).

Nachdem die gesamte Scheibenfläche von „Blumen“ bedeckt war, zerflossen diese nach und nach. Im Bereich der Risse verfärbte sich die geschmolzene Folie gelbbräunlich (siehe Abbildung 7- 32).



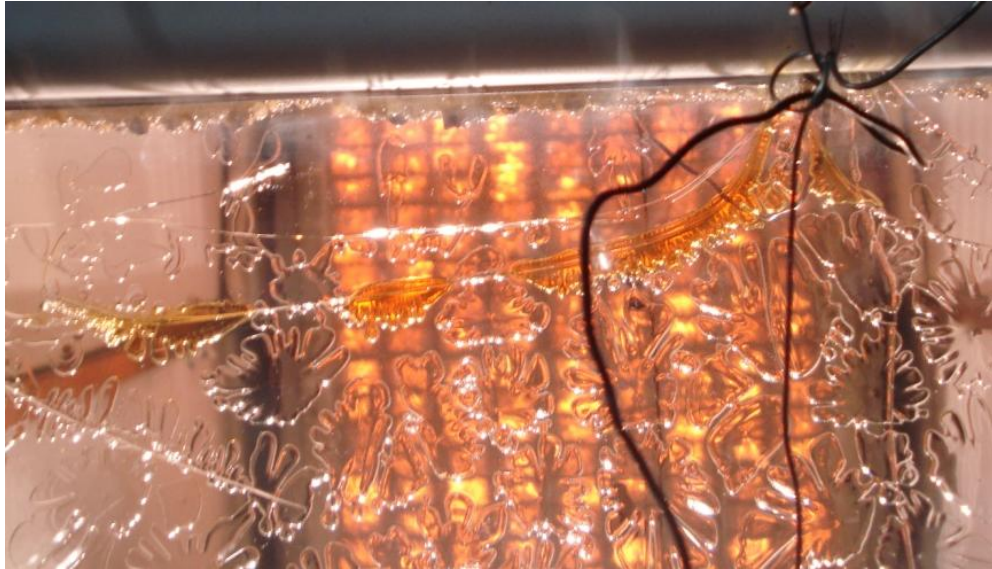


Abbildung 7-32: Verfärbung der geschmolzenen Folie an den Rissen (Versuch FV2-11 (PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG).

Aus diesen dunkelverfärbten Rissen traten zunächst in der Mitte der oberen Scheibenseite im weiteren Verlauf Flammen auf (siehe Abbildung 7–33).



Abbildung 7-33: Flammenbildung aus Rissen (Versuch FV2-11 (PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG).

Diese Flammenzungen schlagen kurze Zeit später bis zur Scheibenmitte. Die Scheibe selbst färbt sich durch die starke Rußbildung schwarz. Der PVC - Rahmen wird entzündet (siehe Abbildung 7-34)



Abbildung 7-34: Flammenzungen bis zur Scheibenmitte, Rahmen brennt (Versuch FV2-11 (PVC-Rahmen, 2 fach Verglasung, äußere Scheibe VSG).

## 8 Gewaltsames Öffnen von Fenstern

Fenster sind im Brandfall für die Einsatzkräfte der Feuerwehr in mehrerer Hinsicht von großer Bedeutung:

- Zugang zum Gebäude
- Fluchtweg für Kräfte im Innenangriff bei Gefahren
- Rettungsweg für Personen, die sich innerhalb des Gebäudes aufhalten
- Gezieltes Auslösen gefährlicher Brandphänomene um Gefahren für Einsatzkräfte abzuwenden
- Abzug von Rauch und Wärme

Jedoch weisen moderne Verglasungen gegenüber früheren Verglasungen mit Einscheiben-Verglasungen nicht nur, wie in den Versuchen nachgewiesen wurde, je nach Ausführung erheblich größere thermische Stabilitäten, sondern auch eine höhere mechanische Widerstandskraft auf.

Dies kann auch die im Brandfall eingesetzten Hilfskräfte überraschen, ging man bisher davon aus, dass Scheiben unter Brandbelastung, spätestens aber nach einem gezielten Axtschlag zerstört werden konnten.

Ein Beispiel für mögliche auftretende Probleme schildert ein Einsatzbericht der Berufsfeuerwehr Düsseldorf bei einem Brand eines Einfamilienhauses am 5. Januar 2001. Nach einer erfolgreichen Menschenrettung kam es bei der danach erfolgenden Bekämpfung eines ausgedehnten Dachstuhlbrandes zur Durchzündung im gesamten Bereich des Angriffs- bzw. Fluchtweges. Der Angriffstrupp wurde im Dachgeschoß abgeschnitten und durch die Flammen erheblich gefährdet. „Der Angriffstrupp versuchte mit der Feuerwehraxt nach DIN die Wärmeschutzverglasung des Fensters zu zerstören, was erst nach mehrmaligen sehr kräftigen Schlägen gelang, da die Feuerwehraxt immer an der Fensterfläche abrutschte und nicht genug Energie zur Zerstörung übertragen werden konnte.“ [Cimolino /5/]



Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit neben einer Literaturlauswertung das mechanische Zerstoren unterschiedlicher Verglasungen untersucht, um geeignete Werkzeuge und Taktiken aufzuzeigen.

## **8.1 Gefahren, Techniken und Taktiken**

Für die Einsatzkräfte sind die größten Gefahren bei der Zerstörung von Fensterscheiben:

- Herab fallende Glasscherben und Rahmenteile
- Abrutschen mit den verwendeten Werkzeugen
- Stichflammenbildung durch die plötzliche Sauerstoffzufuhr

Es gilt daher einige Regeln zu beachten, um auch solche Gefährdungen beherrschen zu können.

### **8.1.1 Schutzkleidung**

Grundvoraussetzung ist das Tragen der vollständigen Persönlichen Schutzausrüstung in Form des Feuerwehrschatzanzuges nach DIN EN 469, inklusive Helm, Schutzstiefeln und Gesichtsschutz in Form von Visier oder Schutzbrille. Bei Anwendungen, bei denen mit der Bildung von größeren Mengen feinen Glasstaubs zu rechnen ist, ist vorsorglich Mundschutz zu tragen. Vor Scheiben, aus denen nach ihrer Zerstörung heiße Rauchgase austreten können, sollte unter Atemschutz gearbeitet werden.

### **8.1.2 Handhabung der Werkzeuge**

Generell empfiehlt es sich bei Schlagwerkzeugen, den Kopf des Werkzeuges als tiefsten Punkt des Armes zu wählen, damit keine Scherben auf Arme und Hände fallen können. Außerdem sollte trotz Schutzbrille und / oder Visier niemals zur Scheibe geschaut werden, wenn von unterhalb der zu zerstörenden Scheibe gearbeitet wird.

### **8.1.3 Effizienter Ablauf einer Zugangsschaffung durch eine Scheibe**

Die effizienteste Möglichkeit Scheiben zu entfernen besteht in der in Abbildung 8 - 1 abgebildeten Vorgehensweise:

Das linke Bild zeigt die Vorgehensweise bei der gewaltsamen Öffnung von Sicherheitsverglasungen mit Handwerkzeugen. Das rechte Bild das Vorgehen bei der Ver-

wendung von motorbetriebenen Werkzeugen. Die Zahlen stehen für die Reihenfolge der Schläge, beziehungsweise der Schnitte.

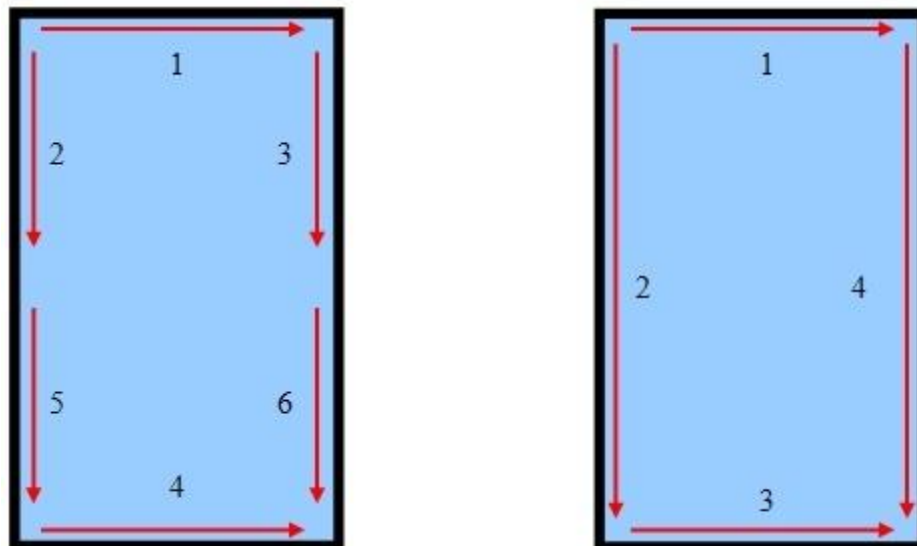


Abbildung 8-1: Gewaltames Öffnen von Sicherheitsverglasungen - Reihenfolge der Schneidvorgänge (Bild links: Einsatz von Handwerkzeugen, Bild rechts: Einsatz von motorbetriebenen Werkzeugen) nach Stone und Percher /31/

Gemein ist beiden Methoden, dass darauf zu achten ist, die Trennung der Scheibe nicht am unteren Rand zu beenden [Stone und Percher /31/].

## 8.2 Vergleich der Geräte und Verfahren

### 8.2.1 Versuchsbeschreibung und verwendete Werkzeuge

Im Anschluss an die Versuche zur thermischen Belastbarkeit wurden Versuche zur mechanischen Stabilität der Fenster durchgeführt. Für diese Versuche wurden die Fenster aus den Versuchen der Versuchsserie 1 (Temperaturniveau 1: niedrig) verwendet, deren äußere Scheibe jeweils intakt geblieben war, außerdem ein Fenster mit einer VSG Verglasung, sowie eine Verglasung mit 8 mm ESG Scheibe.

Die Versuche wurden mittels Video- und Digitalkamera dokumentiert.

Die Fenster wurden für die Versuche nicht eingespannt oder in eine Mauerwerksöffnung eingebaut, sondern lediglich an einer Wand fixiert.

Zum Einsatz kamen sowohl Handwerkzeuge, als auch motorbetriebene Geräte und Sonderwerkzeuge (siehe Abbildung 8-2).

Folgende Handwerkzeuge wurden bei den Versuchen eingesetzt:

- Nageleisen / Kuhfuß
- Schlosserhammer
- Maurerbeil

Aus der Gruppe der Kraftbetriebenen Geräte wurden die folgenden ausgewählt:

- Trennschleifer - Trennscheibe (Stein) 230 mm
- Meißelhammer mit verschiedenen Meißeln
- Säbelsäge (Reciprosäge) - Metallsägeblatt

Zudem wurde noch die Tauglichkeit der folgenden Werkzeuge zum Öffnen von Verglasungen untersucht:

- Hohlstrahlrohr
- Schneidbrenner

Das Ziel dieses Teils der Untersuchungen bestand darin, mit dieser Werkzeugauswahl zum einen zu den Geräten der Feuerwehr vergleichbare Werkzeugausstattung zu testen und zum anderen, alternative Öffnungstechniken und Geräte auf ihre Eignung zur Fensteröffnung hin zu überprüfen.



Abbildung 8-2: Verwendete Werkzeuge und PSA

### **8.2.2 Versuchsdurchführung**

Die einzelnen Verglasungsarten wurden entsprechend nachfolgender Tabelle 8-1 mit den vorgenannten Werkzeugen mechanisch beansprucht.

Tabelle 8-1: Verwendete Werkzeuge für Versuche

<b>Werkzeug</b>	<b>Wärmeschutz- glas</b>	<b>VSG - Verglasung</b>	<b>ESG - Verglasung</b>
Nageleisen	X	X	
Schlosserhammer	X	X	X
Maurerbeil	X	X	
Trennschleifer	X	X	
Meißelhammer (druckluftbetrie- ben)	X	X	
Säbelsäge	X	X	
Schneidbrenner	X		

Dabei ist zu beachten, dass ein „X“ für den Einsatz des entsprechenden Werkzeuges bei der entsprechenden Verglasungsart steht.

Das Hohlstrahlrohr wurde nur im Anschluss an die Fensterversuche zur thermischen Belastbarkeit eingesetzt. Mit ihm wurden zum einen Löscharbeiten an den brennenden Fensterrahmen durchgeführt und zum anderen überprüft, ob die Verglasungen eine rasche Abkühlung durch Wasser nach der hohen thermischen Belastung unbeschadet überstehen.

### **8.2.3 Versuchsauswertung**

#### **8.2.3.1 Wärmeschutzverglasung**

Es zeigte sich, dass die Verglasungen ohne Sicherheitsfunktion für die Werkzeuge kein großes Hindernis darstellen. Lediglich das Hohlstrahlrohr und der Schneidbrenner konnten nicht überzeugen.

Bei Einsatz des Schneidbrenners ergab sich statt des erwarteten Platzens der Scheibe auf Grund des großen Temperaturgefälles über der Scheibenoberfläche nur ein eingebrenntes Loch im Glas. Beim Wegnehmen der Brennerflamme traten jedoch sofort große Risse auf.



Abbildung 8-3: Rissbildung nach Wegnahme der Schneidbrennerflamme

Ebenso verhielt es sich beim Einsatz des Hohlstrahlrohres. Statt des Platzens durch die rasche Abkühlung auf den stark erhitzten Glasoberflächen, kam es lediglich zur Ausbildung eines sehr feinen Rissbildes über der gesamten Scheibenoberfläche.

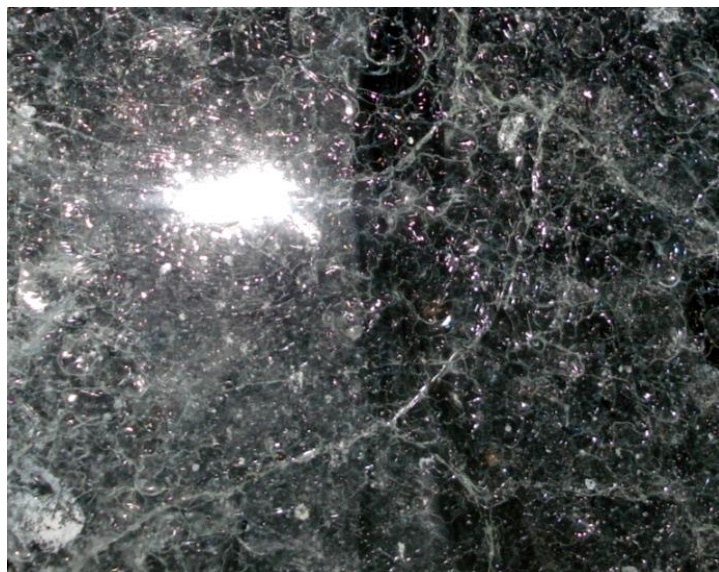


Abbildung 8-4: Feine Rissbildung nach schneller Abkühlung durch Hohlstrahlrohr

#### 8.2.3.2 Verbundsicherheitsglas

Das zur Verfügung stehende Fenster entsprach der Widerstandsklasse RC 2 (früher WK 2) und war aus einer VSG – Verglasung auf der Außenseite und einer Wärmeschutzverglasung auf der Innenseite zusammengesetzt.

Trotz erheblicher Kraftanstrengung zeigte sich beim Einsatz der Handwerkzeuge nur ein mäßiger Erfolg.

Problematisch stellte sich die Folie der VSG – Verglasung dar. Trotz Durchtrennung des Glases blieb die Scheibe im Rahmen dank ihrer Folie verankert. Dies hat zumindest einen erheblich höheren Zeitaufwand zur Folge, als beim Einsatz motor- oder druckluftbetriebener Werkzeuge.



Abbildung 8-5: Bruchbild - VSG Scheibe nach mehrmaligen Hammerschlägen

Sowohl Säbelsäge, als auch Trennschleifer hatten keine große Mühe mit der VSG Verglasung. Der Arbeitsfortschritt ging beim Trennschleifer allerdings schneller und einfacher von statten als mit der Säbelsäge.





Abbildung 8-6: Einsatz des Trennschleifers an VSG – Scheibe

Anzumerken ist, dass beide Geräte erhebliche Mengen feinen Glasstaubes produzieren, was das Tragen von Atemschutz – mindestens eines Mundschutzes – ebenso erforderlich macht, wie das Tragen eines Augenschutzes.

Der Meißelhammer war zunächst vergleichsweise ineffektiv wie die Handwerkzeuge. Mit seiner Hilfe ging das Zerstören des Glases zwar relativ zügig von statten, jedoch blieb die Folie noch mit dem Rahmen verbunden.

Daher musste nochmals der druckluftbetriebene Meißelhammer eingesetzt werden, um die Folie entlang des Rahmens zu durchtrennen. Da dabei keine großen Kraftanstrengungen des Anwenders notwendig waren und trotzdem die Scheibe schnell durchtrennt werden konnte, ist das Werkzeug dennoch für diese Zwecke geeignet.



Abbildung 8-7: Meißelhammer an VSG – Scheibe

Zudem ist es möglich, die Energieversorgung eines druckluftbetriebenen Meißelhammers mittels der bei den Feuerwehren üblicherweise eingesetzten Pressluftatmern herzustellen.

Denkbar wäre es auch, das Druckluftgerät an den Zweitanschluss eines Pressluftatmers des Angriffstrupps anzuschließen.

Allerdings ist hierbei zu beachten, dass das Gerät dann nicht mehr zum Eindringen in das Gebäude benutzt werden kann, da nicht mehr die volle Luftmenge und somit Einsatzzeit zur Verfügung steht. Vorteilhaft an dieser Lösung ist jedoch neben der schnellen Verfügbarkeit auch die Tatsache, dass die Einsatzkraft bei der Scheibenzerstörung selbst geschützt vor Atemgiften ist, wenn der Meißelhammer am Zweitanschluss angeschlossen ist.

Bei der Öffnung der VSG – Scheibe mit dem Meißelhammer war eine Druckabnahme aus der Pressluftatmerflasche von ca. 30 bar zu verzeichnen. Dies entspricht bei der verwendeten 6 l Atemluftflasche etwa einem Luftvolumen von 180 l, beziehungsweise 10 % des Gesamtvolumens.

Ein Arbeiten über tragbare Leitern im Obergeschoss erscheint mit einem längeren Meißel möglich, da keine großen Kräfte aufzuwenden sind und das Gerät mit einer Hand geführt werden kann.



Von Vorteil ist bei der Zerstörung von VSG Scheiben, dass diese in einem Stück aus dem Rahmen getrennt werden. Nahezu alle Splitter bleiben an der Folie haften.

### 8.2.3.3 Einscheiben-Sicherheitsglas

Mit Hilfe des Schlosserhammers sollte zunächst gezeigt werden, dass eine ESG - Verglasung nicht mittels stumpfer Schlagwerkzeuge zu zerstören ist.

Allerdings wurde beim fünften Schlag mit dem Schlosserhammer die ESG – Scheibe zerstört, so dass keine weiteren Versuche an diesem Scheibentyp mehr durchführbar waren.



Abbildung 8-8: ESG - Scheibe zerspringt beim fünften Hammerschlag

Vermutlich hat der Hammer mit der Kante oder einer Ecke des Hammerkopfes zuerst die Scheibe berührt und die Scheibe um die Auftreffstelle herum zersplittern lassen.

Bei früheren Untersuchungen an der FFB im Zusammenhang mit Doppelfassaden konnte eine ESG-Scheibe mit einem Fäustel nicht zerstört werden. Bei diesen früheren Untersuchungen wurde ebenfalls festgestellt, dass eine ESG-Scheibe mit einem Nothammer bzw. Federkörner leicht zu zerstören ist.

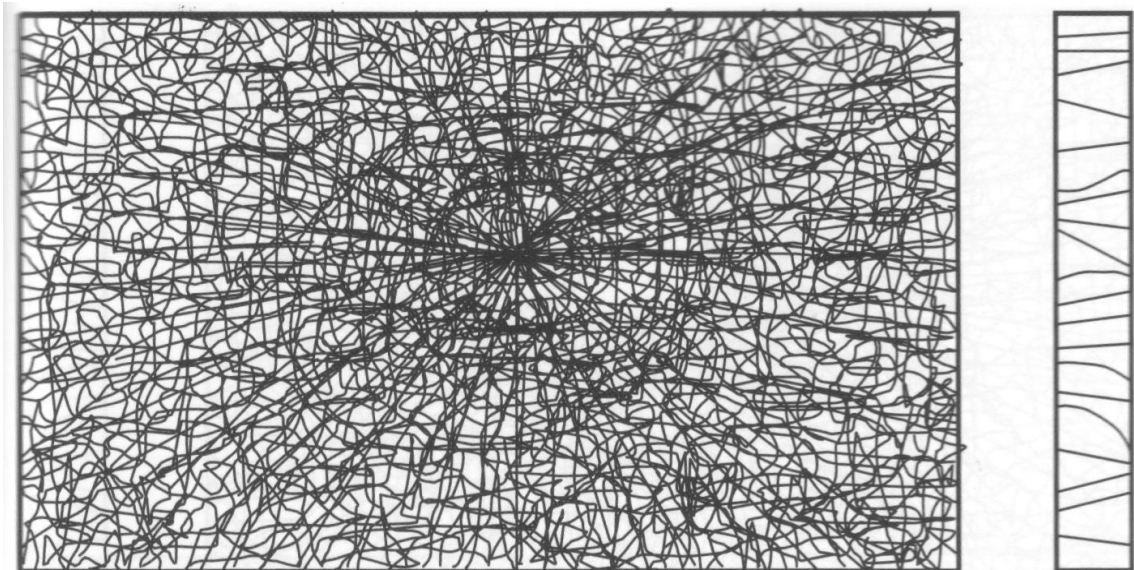


Abbildung 8-9: Schematische Darstellung: Bruchbild von ESG – Bild links: Scheibensicht, Bild rechts: Bruchquerschnitt [Wagner, E. /38/]

Mit dem Nageleisen wurden abschließend mit geringster Anstrengung die „Glasbrösel“ herausgetrennt.

Vorteil des Bruchverhaltens von ESG ist das Entstehen feinsten, stumpfer Glaskrümel. Somit bietet diese Glasart neben der höheren mechanischen Belastbarkeit auch den weiteren positiven Aspekt des Personenschutzes.

#### **8.2.4 Weitere Werkzeuge und Methoden zum mechanischen Zerstören von Verglasungen**

Wie die Untersuchungen im vorherigen Abschnitt gezeigt haben, stellen übliche aus Floatglas-Scheiben aufgebaute Fenster kein großes Hindernis für die Einsatzkräfte der Feuerwehr dar.

Anders stellt es sich hingegen bei Hochsicherheitsverglasungen, aufgebaut aus VSG und teilweise mehreren Folienschichten dar, wie sie z.B. in Juweliergeschäften; Staatsarchiven etc. eingesetzt werden, aber auch in entsprechenden Wohnlagen heute ebenfalls nicht selten in Wohnhäusern anzutreffen sind.

Den Einsatzkräften gelingt es teilweise erst nach langer Zeit in die Räumlichkeiten einzudringen und einen Löschangriff einzuleiten.

Nachfolgend werden einige Methoden oder Werkzeuge vorgestellt, die erfolgreich bei derartigen Einsatzlagen sein könnten, jedoch unter Umständen noch ihre Wirksamkeit durch Experimente bewiesen werden muss.

Zudem ist bei den nachfolgend beschriebenen Verfahren zu berücksichtigen, dass die entsprechenden Geräte und Materialien zum Teil sehr große Vorlauf- beziehungsweise Anfahrtszeiten haben.

#### 8.2.4.1 Herausbrechen der Verglasung aus dem Rahmen

Bei Hochsicherheitsverglasungen erscheint es wenig vielversprechend sich der Scheibe selbst zu widmen. Eine Möglichkeit bei Versagen üblicher Verfahren, ist die Scheibe aus dem Rahmen zu lösen.

Dabei ist zu beachten, dass dies zum Teil massive Schäden an der Gebäudestruktur nach sich ziehen kann.

Hierbei wäre zum Beispiel über die Möglichkeit des Einsatzes von hydraulischen Werkzeugen, die ursprünglich zum Öffnen von Türen vorgesehen sind, wie z.B.

- Hydraulik-Hebezeug Büffel, die in die Fensteröffnung eingespannt wird. (Abbildung 8-10)
- Hydraulischer Türöffner, um das Fenster im Rahmenbereich aufzuspreizen (Abbildung 8-11)

ggf. in modifizierter Form nachzudenken.



Abbildung 8-10: Hydraulik-Hebezeug Büffel (Bildquelle: Webseite der WEBER-Hydraulik GmbH, Göglingen, 2013)



Abbildung 8-11: Hydraulischer Türöffner (Bildquelle: Webseite der LUKAS Hydraulik GmbH, Erlangen, 2013)

#### 8.2.4.2 CCS-Cobra<sup>®</sup> – Cobra Cold Cutting System

Das CCS-Cobra<sup>®</sup> – Cobra Cold Cutting System - beruht auf der Beimischung eines Abrasivmittels in einen Hochdruckwasserstrahl (ca. 300 bar), womit das kalte Schneiden der meisten Materialien ermöglicht wird. So benötigt das System zum Durchdringen einer 12 mm Stahlplatte nach Angaben von [Illk /24/] 20 Sekunden. Für das Öffnen eine ICE – Glasscheibe auf einer Fläche von ca. 200 cm<sup>2</sup> vergehen ungefähr 60 Sekunden (siehe. [Zirgulev und Elger /44/])

Nach Durchdringen des Materials kann die Beigabe des Schneidmittels gestoppt werden und der Hochdruckwasserstrahl zum Löschen verwendet werden. Allerdings

ist dieses System in Deutschland bisher nur bei einigen wenigen Werkfeuerwehren anzutreffen.

#### 8.2.4.3 Öffnen von Verglasungen mit Explosivstoffen

Neben den bisher dargestellten Methoden zur Zerstörung von Verglasungen besteht die Möglichkeit der Öffnung mit Explosivstoffen durch einige spezialisierte Ortsverbände des Technischen Hilfswerks oder Sondereinsatzkräfte der Polizei.

Beim THW verfügen 48 der 668 Ortsverbände über eine Fachgruppe Sprengen (siehe. Angabe in Wikipedia zur Fachgruppe Sprengen (FGrSp), vom Januar 2013.

Das THW, die FFB sowie weitere Beteiligte führten orientierende Versuche zum Sprengen von Verglasungen zur Schaffung einer Öffnung in Verglasungen auf einem geeigneten Versuchsgelände des KIT durch.

Es wurden u.a. verschiedene VSG-Verglasungen, Passivhausfenster mit Dreifachverglasung untersucht.

Als Explosivstoffe kamen sowohl Sprengfolie, Sprengschnüre als auch eine Schneidladung zum Einsatz.

Die Ladungen wurden mit unterschiedlichen Methoden verdämmt.

Nach Wikipedia (Stand 22.1.2013) ist eine Verdämmt Ladung ein von einer festen Hülle eingeschlossener Explosivstoff.

Die Umhüllung kann z.B. aus Pappe, Metall, wassergefüllten Kunststoffschläuchen, Klebe- und Abdichtungsbändern oder anderen Materialien bestehen. Als Beispiel wird in Wikipedia (Stand 22.1.2013) der Kanonenschlag genannt, dessen Schwarzpulver ohne die Umhüllung durch das Papprohr auch ohne jegliche Knallwirkung abrennt. Aufgrund der Umhüllung durch ein dickes Papprohr hingegen kommt es zu einer Explosion, die zu einem Zerlegen des Papprohres führt, wodurch erst der mar-

kante Knall entsteht. Unter bestimmten Voraussetzungen kann es aber auch ohne Fremdeinschluss zu einer Verdämmung kommen. Man spricht hier von der sog. Eigenverdämmung, die eintritt, wenn eine größere Menge des Explosivstoffes verwendet wird. Hier kann bereits das Eigengewicht des Stoffes zu einer Verdämmung beim Abbrand und einer Explosion führen.

Bei den Versuchen hat sich herausgestellt, dass der Einsatz von Sprengstoff für die Schaffung einer Öffnung bei einem Brand wegen des ggf. hohen Schadens an der Bausubstanz und der dabei auftretenden hohen Gefahren durch Druck-, Schall- und Splitterwirkung für die Einsatzkräfte und Hausbewohner zu überdenken ist.

Des Weiteren bestehen aufgrund der geringen Dichte der entsprechenden Fachgruppen, der Problematik der Aufbewahrung und des Transports des Sprengstoffes sowie dem in aller Regel nicht hinreichend zeitnahen Eintreffen am Einsatzort bei einem Brand erhebliche Zweifel an der Realisierbarkeit dieser Methode.

Auf diese Untersuchungen soll daher in dieser Arbeit nicht näher im Detail eingegangen werden.

Die folgenden Abbildungen 8-12 – 8-22 zeigen qualitativ die Auswirkungen von Spreng- und Explosivstoffen auf Verglasungen.

Verglasung vor dem Versuch



Zündung



Verglasung nach dem Versuch



Abbildung 8-12: Versuch 1: Sprengung von VSG mit Sprengfolie







Abbildung 8-13: Versuch 2: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt

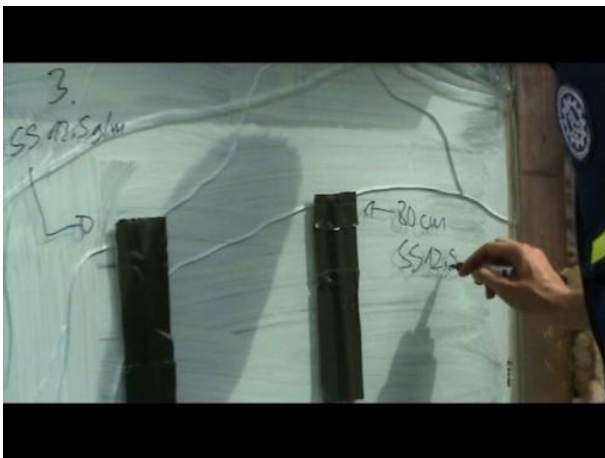


Abbildung 8-14: Versuch 3: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt







Abbildung 8-15: Versuch 4: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt





Abbildung 8-16: Versuch 5: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdammt

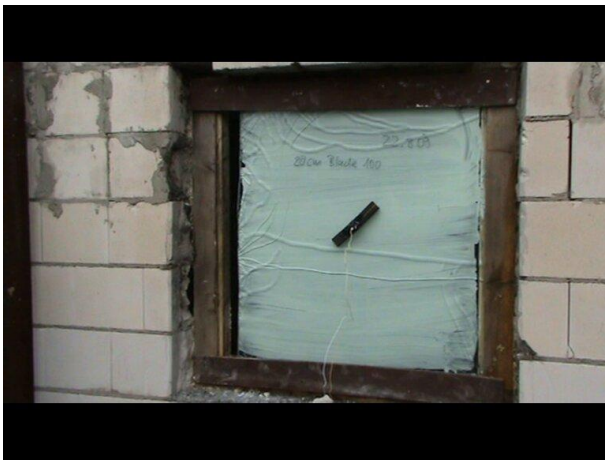


Abbildung 8-17: Versuch 6: Sprengung von VSG mit Schneidladung

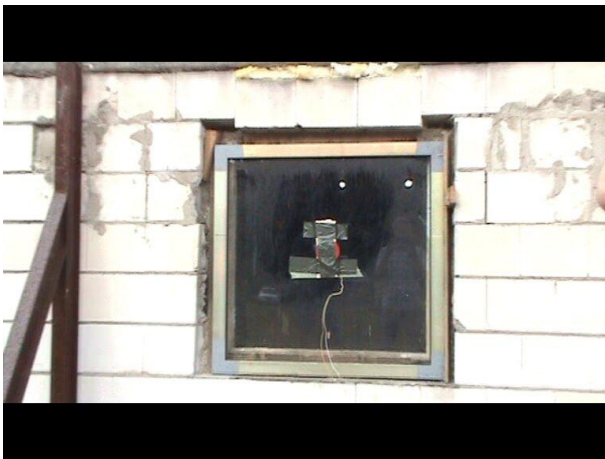


Abbildung 8-18: Versuch 7: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt





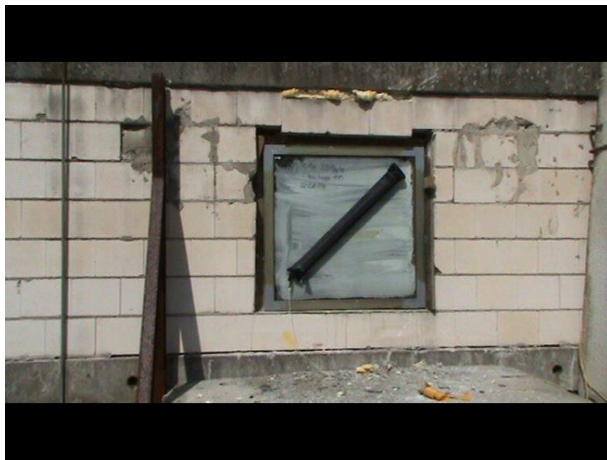


Abbildung 8-19: Versuch 8: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt



Abbildung 8-20: Versuch 9: Sprengung von VSG mit Sprengschnur, verdämmt



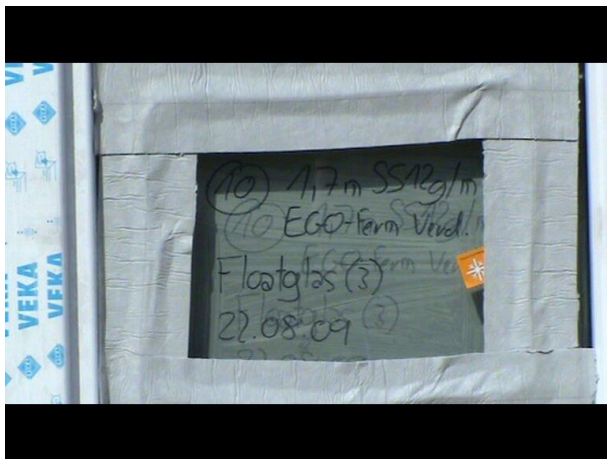


Abbildung 8-21: Versuch 10: Sprengung von Passivhausfenster (Floatglas, 3-fach) mit Sprengschnur, verdämmt



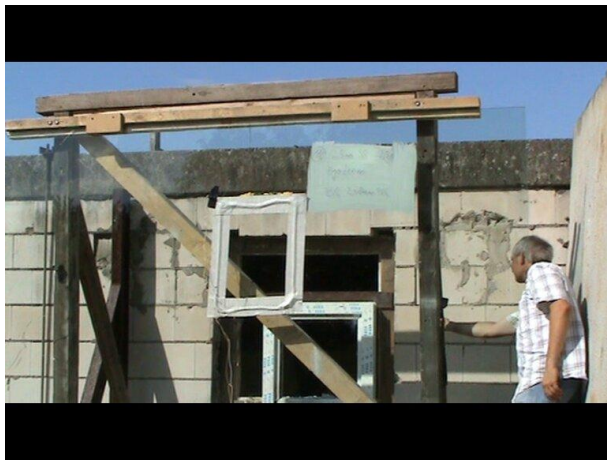


Abbildung 8-22: Versuch 11: Sprengung von VSG aus TVG (2-fach) mit Sprengschnur, verdämmt

### **8.3 Öffnen über Anlagentechnik oder konstruktive Schwachstellen**

Neben den bisher aufgeführten Werkzeugen scheinen auch einige technische Lösungen überlegenswert.

#### **8.3.1 Sollbruchstellen**

Denkbar sind Lösungen, bei denen in Obergeschossen einige wenige Fenster ähnlich zu Eisenbahnzügen mit Sollbruchstellen ausgerüstet werden. Zur Sicherstellung des Einbruchschutzes müssten diese Fenster jedoch mit einer Einbruchmeldeanlage ausgerüstet werden.

Die Fenster würden dabei aus ESG – Scheiben aufgebaut und würden zum Beispiel mit einem roten Punkt am Rahmen gekennzeichnet werden. Vergleiche dazu Abbildung 8 – 14.



Abbildung 8-23: Außenansicht - ICE Fenster mit Sollbruchstelle

#### **8.3.2 Konstruktive Schwächung der Fensterkonstruktion**

Der Einbau eines Körpers in den Scheibenzwischenraum (SZR), der unter Wärme- einwirkung schnell und stark sein Volumen vergrößert z.B. im unteren Verbundbereich, unter Umständen ließe sich dafür sogar der Abstandshalter von Isolierglas- schein nutzen – könnte weitere Ansatzpunkte bieten.

Zu beachten ist hierbei, dass zunächst Temperaturen ermittelt werden müssten, die bei einem Entstehungsbrand im SZR auftreten. Zu beachten ist hierbei, dass diese Temperaturen nicht auch bei starker Sonneneinstrahlung auf das Fenster erreicht werden dürfen und die Veränderungen keine gravierenden Nachteile in Hinblick auf Kosten und Wärmedämmung nach sich ziehen.

Weiterhin ist der Personenschutz aufgrund von herabfallenden Glasteilen auf vorbeilaufende Passanten zu berücksichtigen.

### **8.3.3 Öffnung über Anlagentechnik**

Eine andere Möglichkeit würde in einer anlagentechnischen Öffnung des Fensters bei Temperatur- oder Raucheinwirkung bestehen. Dies könnte einerseits über Rauchmelder- oder anlagengesteuerte Stellmotoren erfolgen.

In größeren Verwaltungsgebäuden sind meist Brandmeldeanlagen (BMA) vorhanden, die diese Funktion wahrnehmen könnten. Der in Zukunft zu erwartende vermehrte Einsatz von Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) im Wohnungsbau dürfte für die der stellmotorengestützte Öffnung ebenfalls realistische Realisierungsmöglichkeiten bieten, da die steuerungsgestützte Öffnung von Fenstern auch zur Komfortsteigerung der Bewohner genutzt werden könnte.

Die genannten Systeme dürften sich bei ohnehin vorhandener, entsprechender Anlagentechnik ohne allzu große Mehrkosten realisieren lassen.

Zudem ließen sich darüber auch Warn- und Alarmierungsmöglichkeiten für die Bewohner und die Feuerwehr verwirklichen.



## 8.4 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zum mechanischen Zerstören von Fenstern

Entsprechend Tabelle 8-2 wurde eine Wertung der Werkzeugauswahl zur mechanischen Zerstörung den verschiedenen Verglasungen vorgenommen.

Tabelle 8-2: Geeignete Werkzeuge für Verglasungen

Werkzeug	Wärmeschutzglas	VSG - Verglasung	ESG - Verglasung
Nageleisen	gut geeignet	bedingt geeignet	nicht geeignet
Schlosserhammer	gut geeignet	bedingt geeignet	nicht geeignet
Maurerbeil	gut geeignet	bedingt geeignet	nicht geeignet
Trennschleifer	bedingt geeignet	gut geeignet	bedingt geeignet
Meißelhammer	bedingt geeignet	gut geeignet	nicht geeignet
Säbelsäge	bedingt geeignet	gut geeignet	nicht geeignet
Schneidbrenner	nicht geeignet	nicht geeignet	nicht geeignet
Nothammer	nicht geeignet	nicht geeignet	gut geeignet
Federkörner	nicht geeignet	nicht geeignet	gut geeignet

Dabei ist zu beachten, dass Feuerwehrkräfte im Einsatzfalle ggf. nicht wissen, welche Verglasung in dem jeweiligen Fenster verbaut wurde. Daher ist es zu empfehlen zunächst mit den üblichen Schlagwerkzeugen wie Feuerwehraxt, Halligan-Tool und ähnlichem zu beginnen und erst bei deren Scheitern auf Werkzeuge wie den Trennschleifer auszuweichen.

Die Handwerkzeuge haben den Vorteil, dass sie ohne Zeitverzug zur Verfügung stehen. Außerdem stellen sie nach den Feuerwehrdienstvorschriften (FwDV) einen Teil der üblichen Ausstattung eines Feuerwehrtrupps im Brandfalle dar. Sie sind somit auch in der breiten Fläche anzutreffen.

Die motor- und druckluftbetriebenen Geräte haben deutliche Nachteile, was den Zeitanfang betrifft.

Sie müssen erst mit aufwändigen Anschaltprozeduren in Gang gebracht werden, wie z.B. bei benzingetriebenen Geräten, oder es muss eine Stromversorgung aufgebaut werden.

Zudem sind sie nicht überall bei Feuerwehren vorhanden, da sie erst auf Fahrzeugen zur Technischen Hilfeleistung oder großen Löschfahrzeugen Teil der Normbeladung sind.

Das Problem des Öffnens von Sicherheitsverglasungen in Obergeschossen, die nur mittels tragbaren Leitern und nicht mit der Drehleiter erreicht werden können, konnte nicht zufriedenstellend gelöst werden<sup>3</sup>.

Zwar ist der Einsatz eines pneumatisch betriebenen Meißelhammers und verlängerter Meißel denkbar, jedoch ist auch diese Lösung nicht ohne weitere Gefährdung handhabbar.

Es ist immer zu beachten, dass je näher die Feuerwehreinsetzungskraft sich im Fensterbereich zur mechanischen Zerstörung aufhält, die Gefährdung durch eine Rauchgasdurchzündung oder Backdraft steigt.

Allerdings ist auch davon auszugehen, dass für Gebäude, die auch in den Obergeschossen über einbruchhemmende Verglasung verfügen, auch die finanziellen Mittel für aufwändige Brandschutzlösungen, wie Brandmeldeanlage mit Schlüsseltresor oder Löschanlagen zur Verfügung stehen sollten.

Verglasungen aus Verbundglas bzw. einbruchhemmende Verglasungen erfordern insbesondere in Obergeschossen besondere Methoden. Einige mögliche Methoden wurden diskutiert, müssen aber im Hinblick auf Wirkungsweise und Personenschutz beurteilt werden.

---

<sup>3</sup> Entsprechend Unfallverhütungsvorschrift Feuerwehr ist das Arbeiten mit Trennschleifern auf tragbaren Leitern verboten.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde sowohl theoretisch als auch experimentell das thermisch und das mechanisch bedingte Versagen von Fenstern und Verglasungen unter besonderer Berücksichtigung ihrer Anwendung bei modernen Bauweisen wie z.B. Niedrigenergie-, Passiv- und Nullenergiehäusern untersucht.

Von besonderem Interesse ist auch die Beantwortung der Fragestellung, wie beim Feuerwehreinsatz bei mechanisch stabilen Verglasungen die Schaffung von Öffnungen für den gezielten Abzug von zündfähigem und toxischem Brandrauch erreicht werden kann.

Bei entsprechender Wärmebelastung setzte die Rissbildung bei den in den Versuchen untersuchten verwendeten Fenstern sehr früh ein.

Der frühe Zeitpunkt für den ersten Riss sagt jedoch noch nichts darüber aus, wie lange insgesamt die Scheiben im Fenster auch im gerissenen Zustand einen relativ dichten Raumabschluss bilden und verhindern, dass zündfähige Brandpyrolyseprodukte abströmen können.

Bei der rechnerischen Beschreibung des Versagens von Verglasungen ist daher der effektive Zeitpunkt zu berücksichtigen, bei dem das Fenster eine Öffnung frei gibt. Entscheidend sind hierbei nicht nur die Werkstoffkenngrößen des Glases wie z.B. zulässige Betriebstemperaturen für das Glas, sondern das Versagen der Verglasung in Zusammenhang mit den Eigenschaften des Rahmens (Größe, Material, Dichtungen, etc.) und der Einbausituation.

Im Vergleich verschiedener Fensterrahmenarten halten die Außenscheiben bei Fenstern mit Holzrahmen sowohl bei 2-fach als auch 3-fach Verglasung einer höheren Temperaturbeanspruchung länger stand und erhöhen daher durch die Verhinderung des Rauch- und Wärmeabzuges die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Roll-overs oder Backdrafts.

Mit Versuchen zur mechanischen Widerstandskraft von Verglasungen konnte gezeigt werden, dass Feuerwehreinsatzkräfte mit den ihnen üblicherweise zur Verfügung

stehenden Mitteln in der Lage sind, mehrfach verglaste Fenster aus Floatglas wie z.B. Passivhausfenster zu öffnen. Das Öffnen von Fenstern mit Verbund- und Verbundsicherheitsgläsern erfordert hingegen einen im Vergleich beträchtlichen Aufwand. Dies gilt insbesondere für einbruchhemmende Verglasungen in Obergeschossen.

Die Luftdichtheit des Gebäudes kann zu einer verspäteten Branderkennung von außen führen. Dies verursacht wiederum lange Brandentwicklungszeiträume (z.B. langandauernde Schwelbrände) mit entsprechender Gefährdungserhöhung. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, die Brandmeldung auch außerhalb des Gebäudes anzuzeigen.

## 10 Literaturverzeichnis

<p>/1/ Kunkelmann, J., Brein, D.:</p>	<p>Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise Teil 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brände in Gebäuden moderner Bauweise</li> <li>• Gebäudekonstruktion</li> <li>• Gebäudetechnik in Gebäuden moderner Bauweise</li> <li>• Flashover / Rollover / Backdraft</li> <li>• Mobile Löschsysteme (Auswahl)</li> <li>• Erkennungsmerkmale für die Feuerwehr</li> </ul> <p>Forschungsbericht Nr. 154 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2010) <a href="http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/392.php">http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/392.php</a></p>
<p>/2/ Wiesner, G.:</p>	<p>Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise. Verhalten von Verglasungen beim Zerstören durch thermische Einwirkung und Feuerwehreinsatz Bachelorarbeit, Hochschule Magdeburg-Stendal (FH), Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik; Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), 2009 (unveröffentlicht)</p>
<p>/3/ Brein, D., Seeger, P.G.:</p>	<p>Fassadenbrandversuche mit einem schwerentflamm- baren und einem nichtbrennbaren Wärmeverbund- system. Vfdb-Zeitschrift, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart 1988</p>
<p>/4/ BAUHAUS:</p>	<p>Das Fenster für Ihr Zuhause. Prospekt der BAUHAUS GmbH &amp; Co. KG, Mannheim, 2008</p>

/5/ Cimolino, U.:	Wohnhausbrand mit Duchzündung in Düsseldorf am 5.1.2001 <a href="http://www.drehleiter.info/php/downloads/ALB-Stairway-to-safety.pdf">http://www.drehleiter.info/php/downloads/ALB-Stairway-to-safety.pdf</a>
/6/ DIN IEC 584 Teil 2.	Thermopaare - Grenzabweichungen der Thermospannungen identisch mit IEC 584-2:1982 (Stand 1989) Deutsche Fassung HD 446.2 SZ: 1990. Juni 1992.
/7/ Endhardt, M., et al.:	Das Passivhaus bei Neubau und Sanierung - Bauen für die Zukunft. www.leibi.de, 2008
/8/ WschV.:	Wärmeschutzverordnung 1977, 1982, 1995 Am 1. Febr. 2002 durch Energieeinsparverordnung (EnEV) abgelöst <a href="http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeschutzverordnung">http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeschutzverordnung</a>
/9/ EnEV	Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV) EnEV, Ausfertigungsdatum: 2002, 2004, 2007 Stand: Geändert durch Art. 1 V v. 29.4.2009 I 954 <a href="http://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/index.html">http://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/index.html</a>
/10/ DIN 4108-6	Wärmeschutz un Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2003
/11/ DIN V 18599-2 [2011]	Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2011

/12/ DIN 1946-6	Raumluftechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2009
/13/ Fahrenkrog, H. H.	Glas am Bau - Produktion und Einsatz. Grafenau : expert verlag, 1982.
/14/ DIN 1946-6	Raumluftechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2009
/15/ Feist, W.:	Das Niedrigenergiehaus - Neuer Standard für energiebewußtes Bauen. 5. überarbeitete Auflage. Heidelberg: C.F. Müller Verlag, Hüthig GmbH, 1998. Passivhaus-Fenster. Darmstadt: s.n., 1998.
/16/ PHI	Passivhaus Institut, Darmstadt, 2012 <a href="http://www.passiv.de/">http://www.passiv.de/</a> Konstruktionshandbuch für Passivhäuser (Forschungsbericht, gefördert vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung): Aktenzeichen: B15-800198-15 <a href="http://www.passiv.de/downloads/05_teil1_konstruktionshandbuch.pdf">http://www.passiv.de/downloads/05_teil1_konstruktionshandbuch.pdf</a>
/17/ Gabriel, I. Ladener, H.:	Vom Altbau zum Niedrigenergie + Passivhaus - Gebäudesanierung, Neue Energiestandards, Planung und Baupraxis. Staufen : ökobuch, 2008.
/18/ Grimm, F. B.:	Energieeffizientes Bauen mit Glas: Grundlagen, Gestaltung, Beispiele. Callwey: München, 2004.

/19/ Grobe, C.: [2002]	Passivhäuser - planen und bauen. München : Verlag Georg D. W. Callwey GmbH & Co KG, 2002.
/20/ Hassani, S. K.S., Shields, T. J., Silcock, G. W.	Thermal Fracture of Window Glazing: Performance of Glazing in Fire. Journal of Applied Fire Science. 1994-1995, 1995, Volume 4, Number 4.
/21/ Shields, T. J., Silcock, G. W.H.; Hassani, S. K. S.:	The behavior of double glazing in an enclosure fire. Journal of Applied Fire Science. 1997-1998, Volume 7 Number 3.
/22/ Klassen, M., S., et al. [2006]	Transmission Through and Breakage of Multi-Pane Glazing Due to Radiant Exposure. Fire Technology. 2006, Bd. 42, 2 April.
/23/ Huber, J., Müller, G., Oberländer, S:	Das Niedrigenergiehaus: Ein Handbuch mit Planungsregeln zum Passivhaus. Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH, 1996.
/24/ Illk, A.:	Wasserschuss durch Wände. Die löschende Schlange Cobra . Brennpunkt. 2004, 6.
/25/ Kunkelmann, J.:	Forschungsbericht Nr. 130 - Flashover / Backdraft - Ursachen, Auswirkungen, mögliche Gegenmaßnahmen. Karlsruhe : Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), 2003.
/26/ Pech, A., Kolbitsch, A.	Wände. Wien: Springer-Verlag, 2005.
/27/ Pech, A., Pommer, G., Zeininger, J.:	Fenster. Wien : Springer-Verlag, 2005.
/28/ Pregizer, D.:	Grundlagen und Bau eines Passivhauses. Heidelberg : C.F. Müller Verlag , Hüthing GmbH, 2002.
/29/ Royer, K.:	Iowa Rate of Flow for Fire Control. Fire Engineering. 1995, 9.



/30/ Sommer, A. W.:	Passivhäuser - Planung-Konstruktion-Details-Beispiele. Köln : Verlagsgesellschaft Rudolf Müller , 2008.
/31/ Stone, H., Percher, M.:	Firefighter Ingress / Escape Procedures and Training for Security Window Systems. San Francisco: Hinman Consulting Engineers, Inc., 2005. <a href="http://www.nfpa.org/assets/files/PDF/Member%20Sections/Final_Report_Package.pdf">http://www.nfpa.org/assets/files/PDF/Member%20Sections/Final_Report_Package.pdf</a>
/32/ DIBt	Technische Bausbestimmungen Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin 2013 <a href="http://www.dibt.de">http://www.dibt.de</a>
/33/ VEGLA	Technisches Handbuch – Glas am Bau, Vereinigte Glaswerke GmbH, Aachen 1999
/34/ Interpane	Gestalten mit Glas, Interpane Glas Industrie AG, 8. Auflage, Lauenförde 2011
/35/ SANCO	SANCO Glasbuch 2010, 4. Auflage, Glas Trösch GmbH, Nördlingen 2010
/36/ Pilkington	Basisgläser 2012 / 2013 Pilkington Deutschland AG, Gladbeck, 2012 / 2013
/37/ Pilkington	Brandschutz Glashandbuch, Pilkington Deutschland AG, Gelsenkirchen, 2012
/38/ Wagner, E.:	Glasschäden - Oberflächenbeschädigungen; Glasbrüche in Theorie und Praxis. Hofmann-Verlag, 3. Auflage, Schorndorf, 2008 Holzmann Medien GmbH, 4. Auflage, Bad Wörishofen, 2012

/39/ Wagner, A.:	Energieeffiziente Fenster und Verglasung. Berlin: Solarpraxis Verl., 2007. 3., vollständig überarb. Aufl., ISBN 978-3-934595-61-3
/40/ Wikipedia:	Begriff: Fachgruppe Sprengen <a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Fachgruppe_Sprengen">http://de.wikipedia.org/wiki/Fachgruppe_Sprengen</a> , 2013
/41/ Widetschek, O.:	Brandschutz - Quo vadis Tagungsband, Internationales 8. Aprilsymposium, S. 16, Brandschutzforum Austria, Graz 2007
/42/ Wimmer, M.:	Auf Wärmedämmende Fassade Blaulicht 04/2010, S. 13
/43/ Feuerwehr Leonberg:	Einsatzbericht: "Person stirbt bei Wohnungsbrand" 17.03.2009 Feuerwehr Leonberg, 2009. <a href="http://www.feuerwehr-leonberg.de/einsatz/einsatzDetail.php?missionid=839">http://www.feuerwehr-leonberg.de/einsatz/einsatzDetail.php?missionid=839</a>
/44/ Zirculev, M., Elger, U.:	Kalt Schneiden und löschen mit >>Cobra<<. Brandschutz - Deutsche Feuerwehr Zeitung. 5/2005, S. 347 – 350
/45/ Stahn, D.:	Wärmespannungen in großflächigen Verglasungen, Glastechn. Ber. 50 (1977), Heft 7, S. 149 – 158
/46/ McCaffrey, B. J., Heskestad, G.:	A Robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application, Combustion and Flame 26, American Elsevier Publishing Company, 1976
/47/ FLIR	FLIR Systems, Benutzerhandbuch FLIR T6xx Series, Rev. a 540, <a href="http://www.flir.com">http://www.flir.com</a> , 2011  FLIR T620 / T640 Spezifikationen <a href="http://www.flir.com/cs/emea/de/view/?id=41967">http://www.flir.com/cs/emea/de/view/?id=41967</a>

/48/ Testo	Testo GmbH & Co (2005), IR_Fibel_d.qxd, Leitfaden zur Infrarot Messtechnik ( <a href="http://www.bausv.de/thermographie/IR_Fibel.pdf">http://www.bausv.de/thermographie/IR_Fibel.pdf</a> ), 2005 und <a href="http://www.testo.com">http://www.testo.com</a> , 2012
/49/ Infratec	Infratec GmbH (2004), Einführung in Theorie und Praxis der Infrarot- Thermografie, <a href="http://www.thermografie.co.at/files/infratec.pdf">www.thermografie.co.at/files/infratec.pdf</a> , 2004
/50/ VdS 2851	Berührungslose Temperaturmessung (Thermografie) - Hinweise für die Praxis ( <a href="http://vds.de/fileadmin/vds_publicationen/vds_2851_web.pdf">http://vds.de/fileadmin/vds_publicationen/vds_2851_web.pdf</a> ), Köln, 2011
/51/ DIN EN 469	Schutzkleidung für die Feuerwehr – Leistungsanforderungen für Schutzkleidung für die Brandbekämpfung; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2007

## **H i n w e i s**

Die bisher veröffentlichten Forschungsberichte können auf den Homepages der

**Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

**<http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/>**

und des

**Instituts der Feuerwehr Sachsen-Anhalt in Heyrothsberge**

**<http://www.sachsen-anhalt.de/LPSA/index.php?id=25361>**

eingesehen werden.