

**Technische Universität Wien**

Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

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

**ENTWICKLUNG VON  
WANDARTIGEN VERKLEBTEN  
HOLZ-GLAS-VERBUNDELEMENTEN  
UND BEURTEILUNG DES  
TRAGVERHALTENS ALS AUSSTEIFUNGSSCHEIBE**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades  
an der Technischen Universität Wien

betreut von

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

eingereicht von

Dipl.-Ing. Thomas Edl

Wien, September 2008

---



## Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter an der Holzforschung Austria in Wien. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Kompetenzzentrum Holzindustrie K<sub>ind</sub>“ wurden die Experimente an den Kleinproben und den großformatigen Prototypen durchgeführt.

Meinen Dank möchte ich Prof. Winter aussprechen, der für diese Arbeit wichtige Impulse gesetzt hat und das Fachthema „Verklebung von Holz und Glas“ an der TU-Wien fördert und forciert. Für die Begutachtung dieser Arbeit gilt mein besonderer Dank.

Für die Durchführung der Zweitbegutachtung möchte ich mich bei Prof. Andreas Kolbitsch besonders bedanken.

Mein weiterer Dank gilt Dipl. (HTL) Ing. Peter Schober für die Realisierung der praktischen Versuche, Prof. Peter Niedermaier und Dr. Klaus Kreher für die fachliche Unterstützung, Ing. Rupert Fitl und Klaus Mantsch für die Mithilfe am Projekt sowie den Kollegen der Holzforschung Austria für deren Unterstützung.

Bei den Firmen SIKA, OTTOCHEMIE, ECKELT GLAS und KAPO bedanke ich mich für die Beteiligung an dieser Forschungsarbeit.

Besonderer Dank gilt auch meinen Eltern und Großeltern, sowie meinem Bruder Michael.

Ohne die Geduld und Unterstützung meiner Freundin Irene wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ihr gilt ein ganz persönliches „Dankeschön“!



## Kurzfassung

Das Verkleben von Holz und Glas hat sich in den letzten Jahren zu einer zukunftssträchtigen Technologie entwickelt. In diversen Forschungsprojekten namhafter Institutionen wurden Grundlagen zum Thema erforscht und mögliche Entwicklungsrichtungen vorgeschlagen. Praktische Umsetzungen finden bereits im Holzfensterbau statt. Auch im Bereich Structural-Glazing-Fassaden wird sich Holz als Alternative zu Stahl und Aluminium etablieren.

Bei diesen Anwendungsbereichen beschränken sich die statischen Anforderungen an die Verklebung letztendlich auf das Aufnehmen von Windsog- und Winddruckkräften, sowie allenfalls auf das Abtragen des Eigengewichts der Glasscheibe. Die Möglichkeit die aussteifende Wirkung von Glas in Scheibenebene zu aktivieren wird geklebten Holz-Glas-Verbundkonstruktionen im Allgemeinen zurzeit noch nicht zugesprochen.

Ein striktes Entkoppeln von Hülle und Tragstruktur ist die gängige Lösung dieses Umstandes. Das bedeutet, dass wesentliche mechanisch-technologische Eigenschaften des Glases ungenutzt bleiben. Die Problematik liegt in der Schwierigkeit, diese gezielt zu nutzen und in das Tragsystem zu integrieren. Dazu ist es notwendig die Koppelung (Klebung), die Hülle (Glas) und die Tragstruktur (Holz) in deren Wechselwirkung zu erfassen und diese konstruktiv als wirksames Ganzes umzusetzen.

In dieser Arbeit wird nun zum einen der Weg aus der Grundlagenforschung der elastischen Verklebung von Glas und Holz in die praxistaugliche Anwendung von Holz-Glas-Verbundelementen geführt und zum anderen das Tragverhalten derartiger Konstruktionen beurteilt und aufgezeigt. Belastungsversuche an Kleinproben geben Aufschluss über die Eignung verschiedener Klebstofftypen. Es werden verschiedene Konstruktionsvarianten hinsichtlich ihrer bauphysikalischen, statischen und montagetechnisch-baupraktischen Eigenschaften bewertet. Belastungsversuche an großformatigen Prototypen geben Aufschluss über das Verformungs- und Tragverhalten von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen sowie über den Einfluss von verschiedenen Konstruktionslösungen. Ein Beitrag zur sicheren Bemessung von Holz-Glas-Verbundelementen in Form von Betrachtungen bemessungsrelevanter Faktoren und Versagensanalysen fasst die gewonnenen Erkenntnisse für eine mögliche Entwicklung eines Bemessungskonzeptes zusammen.

Am Ende steht ein Vorschlag für ein praxistaugliches Holz-Glas-Verbundelement mit statisch aussteifender Wirksamkeit für den Holzrahmen- und Fassadenbau.



## **Abstract**

Gluing together of wood and glass has developed during the last years to a future-laden technology. In various research projects of well known institutions the scientific basis was investigated on this subject and possible directions for future developments were suggested. In the field of wooden window constructions this technology already has made the first steps into practice. Also in the area of Structural-Glazing-Facades wood will set up as an alternative to steel and aluminium.

At last in these fields of application the static requirements for gluing limit themselves to accommodate only wind suction and wind compression, as well as carrying the dead weight of the windowpane. To activate the possibility of glass to actually brace a construction is not entrusted to timber-glass-bond-constructions at the moment.

Strict separating of the building envelope and the support structure is the current solution for this situation. This means that essential mechanical-technological qualities of glass remain unused. The reason for this is the difficulty to utilise these features and to integrate them into the structure. So it is necessary to grasp the inevitably interaction between the buildings envelope (glass), the supporting structure (timber) and their connection (bond) to turn it to an effective whole.

In this work on the one hand the way is pointed out from the basic research of the elastic bond between glass and wood to the application-oriented timber-glass-bond-constructions and on the other hand the behaviour and performance of such constructions is shown and judged. Different construction types are compared concerning their construction-physics, static and practical qualities. Stress tests were carried out on full scale prototypes to show the deformation and load-bearing characteristics of timber-glass-bond-constructions as well as to indicate the influence of different construction solutions. A contribution to the safe dimensioning of bracing timber-glass-bond-constructions in terms of considerations of variable factors relevant for calculation and failure analyses summarizes the knowledge won in the course of this work for a future development of a design and dimension concept.

At the end a patented design is shown of a practical timber-glass-bond-element able to brace timber frame constructions and facades.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>3</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>5</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1 Problemstellung</b> .....	<b>17</b>
1.1.1 Architektonische Aspekte .....	18
1.1.2 Technologische Aspekte .....	18
1.1.3 Wirtschaftliche Aspekte .....	19
<b>1.2 Aufgabenstellung</b> .....	<b>19</b>
<b>1.3 Abgrenzung</b> .....	<b>19</b>
<b>1.4 Inhaltlicher Überblick</b> .....	<b>19</b>
1.4.1 Geeignete Klebstoffe finden .....	20
1.4.2 Konstruktionssysteme entwickeln und analysieren .....	21
1.4.3 Experimentelle Untersuchungen von Prototypen .....	21
1.4.4 Beitrag zur Beurteilung des statischen Tragverhaltens .....	21
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1 Ausgangsstoffe</b> .....	<b>22</b>
2.1.1 Glas .....	22
2.1.1.1 Eigenschaften von Glas.....	22
2.1.1.2 Herstellung .....	23

2.1.1.3	Glastypen .....	23
2.1.2	Holz .....	25
2.1.2.1	Eigenschaften von Holz.....	25
2.1.2.2	Holzarten .....	25
2.1.2.3	Signifikanz für die Holz-Glas-Verklebung .....	26
2.1.3	Klebstoffe .....	27
2.1.3.1	Einteilung der Klebstoffe.....	27
2.1.3.2	Klebstofftypen.....	28
2.1.3.3	Definitionen von Fachbegriffen.....	29
2.1.3.4	Grundlagen der elastischen Klebung .....	29
<b>2.2</b>	<b>Gebäudeaussteifung.....</b>	<b>34</b>
2.2.1	Horizontale Einwirkungen.....	34
2.2.1.1	Wind .....	34
2.2.1.2	Erdbeben .....	34
2.2.1.3	Zwängungen und Imperfektionen .....	35
<b>2.3</b>	<b>Aussteifende Wandscheiben in Holztafelbauweise .....</b>	<b>35</b>
<b>2.4</b>	<b>Aussteifende Wandscheiben in Holz-Glas-Verbundbauweise .....</b>	<b>37</b>
2.4.1	Nachweismodell nach HAMM .....	37
2.4.1.1	Konstruktion.....	37
2.4.1.2	Versagensmechanismus .....	38
2.4.1.3	Nachweisführung.....	38
2.4.2	Nachweismodell nach NIEDERMAIER .....	39
2.4.2.1	Konstruktion.....	39
2.4.2.2	Versagensmechanismus .....	40
2.4.2.3	Nachweisführung.....	40
<b>3</b>	<b>Geeignete Klebstoffe für den Holz-Glas-Verbund.....</b>	<b>42</b>
<b>3.1</b>	<b>Vorgehensweise.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2</b>	<b>Vorauswahl der Klebstoffe.....</b>	<b>43</b>
<b>3.3</b>	<b>Herstellung der Probekörper .....</b>	<b>44</b>
3.3.1	Geometrie.....	45
3.3.2	Holz .....	46
3.3.3	Glas .....	47
3.3.4	Klebstoffe .....	47
3.3.4.1	Klebstoff auf Silikonbasis.....	47
3.3.4.2	Klebstoff auf Polyurethanbasis .....	48
3.3.4.3	Klebstoff auf Acrylatbasis .....	49
3.3.5	Applikationswerkzeuge.....	50
3.3.6	Probekörperbezeichnung .....	51

<b>3.4</b>	<b>Versuchsmethodik</b> .....	<b>51</b>
3.4.1	Versuchsaufbau .....	53
3.4.1.1	Zugversuche Z.....	53
3.4.1.2	Schubversuche SL- längs zur Klebefuge .....	53
3.4.1.3	Schubversuche SQ- quer zur Klebefuge .....	54
3.4.1.4	Komplikationen bei der Versuchsdurchführung.....	54
3.4.2	Bruchlastversuche .....	55
3.4.2.1	Versuchsreihe „Klebstoff“ .....	55
3.4.2.2	Versuchsreihe „Fugengeometrie“ .....	56
3.4.3	Klimabelastungsversuche .....	57
3.4.3.1	Klimazyklusversuche .....	58
3.4.3.2	Wasserlagerungsversuche .....	58
<b>3.5</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>58</b>
3.5.1	Bruchlastversuche .....	58
3.5.1.1	Silikon-Klebstoff.....	58
3.5.1.2	PU-Klebstoff .....	59
3.5.1.3	Acrylat-Klebstoff .....	61
3.5.2	Klimabelastungsversuche .....	63
3.5.2.1	Klimazyklusversuche .....	63
3.5.2.2	Wasserlagerungsversuche .....	64
<b>3.6</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>64</b>
3.6.1	Zusammenfassung Versuchsreihe „Klebstoff“ .....	64
3.6.1.1	Zusammenfassung Versuchsreihe „Fugengeometrie“ .....	66
3.6.2	Prozessanalyse Klimabelastungsversuche .....	67
3.6.3	Vergleich der Eignung der Klebstoffe .....	68
3.6.3.1	Die Wahl des Klebstoffes .....	68
3.6.3.2	Silikonklebstoff.....	68
3.6.3.3	PU-Klebstoff .....	68
3.6.3.4	Acrylatklebstoff .....	68
<b>4</b>	<b>Analyse von Konstruktionssystemen</b> .....	<b>69</b>
<b>4.1</b>	<b>Vorgehensweise</b> .....	<b>69</b>
<b>4.2</b>	<b>Diskussion möglicher Konstruktionssysteme</b> .....	<b>70</b>
4.2.1	Konstruktionskriterien .....	70
4.2.1.1	Statik.....	70
4.2.1.2	Bauphysik .....	71
4.2.1.3	Praktische Umsetzbarkeit.....	72
4.2.2	Konstruktionsmittel .....	72
4.2.2.1	Glas .....	72

4.2.2.2	Klebstoff.....	73
4.2.2.3	mechanische Befestigung .....	73
4.2.2.4	Koppelrahmen .....	74
4.2.2.5	Tragstruktur (Pfosten / Riegel) .....	74
4.2.3	Variantenmatrix .....	74
4.2.3.1	Systeme mit Standardisoliertglas .....	75
4.2.3.2	Systeme mit Stufenfalzglas – innere Scheibe geklebt.....	76
4.2.3.3	Systeme mit Stufenfalzglas – äußere Scheibe geklebt .....	76
<b>4.3</b>	<b>Detailbetrachtung von Konstruktionssystemen .....</b>	<b>77</b>
4.3.1	Konstruktionssystem V1 A .....	78
4.3.1.1	Statik.....	78
4.3.1.2	Bauphysik.....	78
4.3.1.3	Baupraktische Umsetzbarkeit.....	79
4.3.2	Konstruktionssystem V1 B .....	80
4.3.2.1	Statik.....	80
4.3.2.2	Bauphysik.....	80
4.3.2.3	Baupraktische Umsetzbarkeit.....	81
4.3.3	Konstruktionssystem V2 .....	82
4.3.3.1	Statik.....	82
4.3.3.2	Bauphysik .....	82
4.3.3.3	Baupraktische Umsetzbarkeit.....	83
4.3.4	Konstruktionssystem V3.....	84
4.3.4.1	Statik.....	84
4.3.4.2	Bauphysik.....	84
4.3.4.3	Baupraktische Umsetzbarkeit.....	85
4.3.5	Konstruktionssystem V4.....	86
4.3.5.1	Statik.....	86
4.3.5.2	Bauphysik.....	86
4.3.5.3	Baupraktische Umsetzbarkeit.....	87
4.3.6	Konstruktionssystem V5.....	88
4.3.6.1	Statik.....	88
4.3.6.2	Bauphysik.....	88
4.3.6.3	Baupraktische Umsetzbarkeit.....	89
4.3.7	Konstruktionssystem V6.....	90
4.3.7.1	Statik.....	90
4.3.7.2	Bauphysik.....	90
4.3.7.3	Baupraktische Umsetzbarkeit.....	91
4.3.8	Konstruktionssystem V7 .....	92

4.3.8.1	Statik.....	92
4.3.8.2	Bauphysik.....	92
4.3.8.3	Baupraktische Umsetzbarkeit.....	93
4.3.9	Konstruktionssystem V8.....	94
4.3.9.1	Statik.....	94
4.3.9.2	Bauphysik.....	94
4.3.9.3	Baupraktische Umsetzbarkeit.....	95
4.3.10	Konstruktionssystem V9 – Stufenfalzglas, semi-elastisch verklebt, von außen verschraubt .....	96
4.3.10.1	Statik.....	96
4.3.10.2	Bauphysik.....	96
4.3.10.3	Baupraktische Umsetzbarkeit.....	97
4.3.11	Konstruktionssystem V10.....	98
4.3.11.1	Statik.....	98
4.3.11.2	Bauphysik.....	98
4.3.11.3	Baupraktische Umsetzbarkeit.....	99
<b>4.4</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>100</b>
4.4.1	Konstruktionskriterien.....	100
4.4.1.1	Statik.....	100
4.4.1.2	Bauphysik.....	101
4.4.2	Baupraktische Umsetzbarkeit.....	102
<b>4.5</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>102</b>
4.5.1	Geeignete Varianten für den Projektteil „Experimentelle Untersuchungen an Prototypen“.....	102
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen an Prototypen.....</b>	<b>104</b>
<b>5.1</b>	<b>Vorgehensweise.....</b>	<b>104</b>
<b>5.2</b>	<b>Konstruktion der Prototypen.....</b>	<b>106</b>
5.2.1	Prototyp P1 – Koppelrahmen auf Aluprofil .....	107
5.2.2	Prototyp P2 – Koppelrahmen an Sperrholzsteg .....	107
5.2.3	Prototyp P3 – Koppelrahmen flach, von außen verschraubt.....	108
5.2.4	Prototyp P4 – Koppelrahmen flach, von außen verschraubt.....	108
5.2.5	Prototyp P5 – Koppelrahmen schräg verschraubt.....	109
5.2.6	Prototyp P6 – Koppelrahmen schräg verschraubt.....	109
<b>5.3</b>	<b>Herstellung der Prototypen.....</b>	<b>110</b>
5.3.1	Hauptrahmen.....	110
5.3.2	Holz-Glas-Verbundelement .....	110
5.3.3	Toleranzmaße der Prototypen.....	113
<b>5.4</b>	<b>Montage der Prototypen.....</b>	<b>114</b>

<b>5.5</b>	<b>Versuchsanordnung .....</b>	<b>117</b>
5.5.1	Versuchsaufbau .....	118
5.5.2	Vorgehensweise Vorversuch.....	122
5.5.3	Vorgehensweise Bruchversuch.....	122
<b>5.6</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>124</b>
5.6.1	Prototyp P1 – Koppelrahmen auf Aluprofil .....	124
5.6.1.1	Vorversuch .....	124
5.6.1.2	Bruchversuch.....	125
5.6.2	Prototyp P2 – Koppelrahmen an Sperrholzsteg .....	127
5.6.2.1	Vorversuch .....	127
5.6.2.2	Bruchversuch.....	128
5.6.3	Prototyp P3 – Koppelrahmen flach, von außen verschraubt.....	131
5.6.3.1	Vorversuch .....	131
5.6.3.2	Bruchversuch.....	132
5.6.4	Prototyp P4 – Koppelrahmen flach, von außen verschraubt.....	136
5.6.4.1	Vorversuch .....	136
5.6.4.2	Bruchversuch.....	137
5.6.5	Prototyp P5 – Koppelrahmen schräg verschraubt.....	140
5.6.5.1	Vorversuch .....	140
5.6.5.2	Bruchversuch.....	141
5.6.6	Prototyp P6 – Koppelrahmen schräg verschraubt.....	144
5.6.6.1	Vorversuch .....	144
5.6.6.2	Bruchversuch.....	145
<b>5.7</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>148</b>
5.7.1	Umsetzbarkeit der Prototypen in die Baupraxis .....	148
5.7.2	Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen der Prototypen .....	149
5.7.2.1	Bleibende Verformungen.....	149
5.7.2.2	Verformungsmechanismus.....	149
5.7.2.3	Versagensmechanismus .....	152
<b>6</b>	<b>Beitrag zur sicheren Bemessung von Holz-Glas-Verbund-Wandscheiben .....</b>	<b>155</b>
<b>6.1</b>	<b>Versagenskriterien.....</b>	<b>155</b>
6.1.1	Tragfähigkeit.....	155
6.1.2	Gebrauchstauglichkeit.....	156
<b>6.2</b>	<b>Versagensmechanismen .....</b>	<b>158</b>
6.2.1	Aussteifungsebene - Glasscheibe.....	158
6.2.2	Äußere Lagerungsebene – Klebefuge .....	158
6.2.3	Innere Lagerungsebene – Verschraubung.....	159

6.2.4	Koppelrahmen .....	160
6.2.5	Hauptrahmen.....	161
<b>6.3</b>	<b>Bemessung.....</b>	<b>161</b>
6.3.1	Sicherheitskonzepte .....	161
6.3.1.1	Deterministischer Ansatz.....	162
6.3.1.2	Probabilistischer Ansatz .....	163
6.3.1.3	Semiprobabilistischer Ansatz .....	163
6.3.2	Versagenswahrscheinlichkeit von HGV-Gebäudeaussteifungen .....	164
6.3.3	Versagenswahrscheinlichkeit der wesentlichen HGV-Konstruktionsmittel .....	167
6.3.3.1	Versagensmodell Glasscheibe .....	167
6.3.3.2	Versagensmodell Klebefuge.....	168
6.3.3.3	Versagensmodell Verbindungsmittel.....	169
6.3.4	Materialwiderstände .....	170
6.3.5	Einwirkungen.....	171
6.3.5.1	Bemessungswert für den Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	172
6.3.5.2	Bemessungswert für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	172
6.3.6	Ansätze für mögliche Bemessungsstrategien für HGV-Elemente .....	173
6.3.6.1	Definition der Bemessungswerte zufolge tatsächlicher Materialkennwerte .....	173
6.3.6.2	Definition der Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite für kombinierte Aussteifungssysteme.....	173
<b>7</b>	<b>Ergebnis und Ausblicke .....</b>	<b>175</b>
<b>7.1</b>	<b>Ergebnis.....</b>	<b>175</b>
7.1.1	Geklebter Verbund von Holz und Glas.....	175
7.1.2	Konstruktive Aspekte.....	176
7.1.3	Belastungsverhalten.....	176
7.1.4	Konstruktive Umsetzung .....	177
7.1.5	Bemessungskonzept.....	177
<b>7.2</b>	<b>Ausblick und Empfehlungen.....</b>	<b>178</b>
7.2.1	Klebstoffe .....	178
7.2.2	Konstruktion .....	178
7.2.3	Anwendung in der Baupraxis .....	179
7.2.4	Anwendung als Schubfeld im Biegeträger .....	179
7.2.5	Bemessungskonzept.....	179
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>181</b>
<b>9</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>184</b>

<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>186</b>
<b>11</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>191</b>
	<b>Anhang A - Detailergebnisse der Bruchlastversuche .....</b>	<b>193</b>
<b>A 1</b>	<b>Versuchsreihe „Klebstoff“ .....</b>	<b>193</b>
A 1.1	Tabellarische Zusammenfassung .....	193
A 1.2	Durchschnittliches Bruchverhalten .....	197
<b>A 2</b>	<b>Versuchsreihe „Fugengeometrie“ .....</b>	<b>199</b>
A 2.1	Tabellarische Zusammenfassung .....	199
A 2.2	Durchschnittliches Bruchverhalten .....	201
	<b>Anhang B - Maßabweichungen der Prototypen .....</b>	<b>203</b>
<b>B 1</b>	<b>Prototyp P1 .....</b>	<b>203</b>
<b>B 2</b>	<b>Prototyp P2 .....</b>	<b>203</b>
<b>B 3</b>	<b>Prototyp P3 .....</b>	<b>204</b>
<b>B 4</b>	<b>Prototyp P4 .....</b>	<b>204</b>
<b>B 5</b>	<b>Prototyp P5 .....</b>	<b>205</b>
<b>B 6</b>	<b>Prototyp P6 .....</b>	<b>205</b>
	<b>Anhang C – Pläne der Prototypen.....</b>	<b>207</b>
	<b>Anhang D - Patentschrift.....</b>	<b>221</b>
<b>D 1</b>	<b>Titel der Erfindung .....</b>	<b>221</b>
<b>D 2</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>221</b>
<b>D 3</b>	<b>Beschreibung .....</b>	<b>222</b>
<b>D 4</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>222</b>
<b>D 5</b>	<b>Aufgabe der Erfindung .....</b>	<b>223</b>
<b>D 6</b>	<b>Lösung der Aufgabe .....</b>	<b>223</b>
<b>D 7</b>	<b>Effekte der Erfindung.....</b>	<b>223</b>
<b>D 8</b>	<b>Aufzählung und Kurzbeschreibung der Zeichnungsfiguren.....</b>	<b>225</b>
<b>D 9</b>	<b>Figurenbeschreibung .....</b>	<b>225</b>
	<b>Lebenslauf / CV.....</b>	<b>237</b>

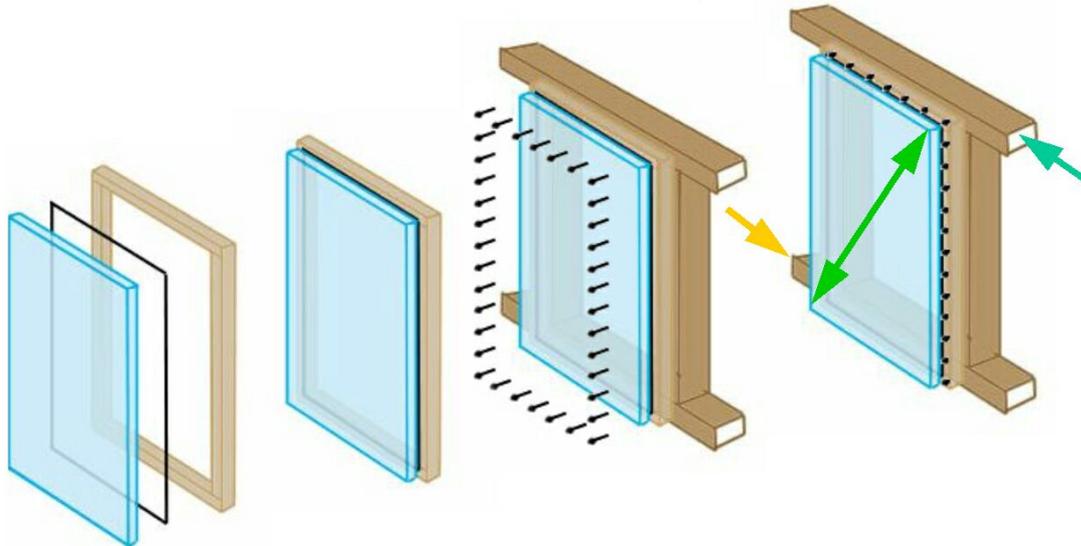
# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Spricht man von Statik im Hochbau, so denkt man zunächst an die Bemessung von Stützen und Balken oder etwa an Fachwerke oder Dachstühle. Diese tragenden Elemente werden sorgfältig dimensioniert, um eine ausreichende Sicherheit gegen Bruch oder übermäßige Verformungen zu gewährleisten. Ein anderes – wesentliches – Kapitel der Hochbaustatik stellt die Aussteifung von Gebäuden dar. Nur die richtige Positionierung und Ausbildung von Wand- und Deckenscheiben kann dem Gebäude die nötige Stabilität verleihen um Wind und Erdbeben, also horizontalen Belastungen, Widerstand zu bieten. Vor allem bei leichten Bauweisen wie dem Holzbau ist die Gebäudeaussteifung ein wesentlicher Aspekt.

Ein technologisch neuer Ansatz zur Aussteifung von Wintergärten, großen Glasfassaden und Holzskelettbauten besteht in der Aktivierung des statischen Potentials von Glas. Ein wesentlicher Punkt beim statischen Einsatz von Glas ist die Art der Lasteinleitung. Bei punktuellen Lasteinleitungen bilden sich örtlich Spannungskonzentrationen, welche den mechanischen Eigenschaften von Glas nicht entgegenkommen. Realisiert man eine „schonende“ Lasteintragung in den spröden Werkstoff sind höhere Belastungen möglich, ein Einsatz im Holzhausbau ist denkbar. Holz und Glas im statisch wirksamen Verbund durch elastische Klebung bieten die Möglichkeit einer derartigen Lasteinleitung und optimalen Nutzung der mechanisch-technologischen Glaseigenschaften.

Glas als Aussteifungselement wird bereits sehr erfolgreich in der Automobilindustrie eingesetzt. Für die Verwendung als statisch wirksames Element im Bauwesen existieren derzeit bis auf vereinzelte bauaufsichtlich zugelassene Sonderlösungen oder Bauwerke mit behördlicher Genehmigung im Einzelfall noch keine praxistauglichen Konstruktionen.



**Abbildung 1: Prinzip der Aussteifung mit Holz-Glas-Verbundelementen nach einer ausgewählten Konstruktionslösung**

In einem Projekt zum Thema „Holzglasverbundkonstruktionen“ (in Folge HGK genannt) wurden vom ift Rosenheim und der Technischen Universität München erste Grundlagen zur Aussteifung mit Glas im Fassaden- und Wintergartenbau erarbeitet (NIEDERMAIER, P. (2002)). Die Ergebnisse haben gezeigt, dass Holzglasverbundelemente für die Aussteifung von filigranen Holzkonstruktionen geeignet sind. Zur praktischen Umsetzung sind jedoch noch weiterführende Untersuchungen, insbesondere im Bereich der baupraktischen Anwendung, notwendig.

Bisher war es grundsätzlich nicht möglich, Glasfassaden oder Fixverglasungen eine „tragende“ Rolle zuzusprechen. Allerdings zeigten viel versprechende Forschungsprojekte und vereinzelte Demonstrationsbauwerke der letzten Jahre das enorme Potential von tragenden Glasbauteilen. Wo bisher Windverbände, mineralische Wände oder Wandscheiben aus Holzwerkstoffplatten zur Gebäudeaussteifung notwendig waren, könnten in Zukunft statisch wirksame Glasfassaden oder Glaswandelemente diese Aufgabe übernehmen.

### 1.1.1 Architektonische Aspekte

Moderne Architektur hat meist das Bestreben zu „entmaterialisieren“. Oft spricht man von Transparenz und Leichtigkeit, von „Zurücknehmen“ der Tragstruktur und Betonen der Form. Glas als tragendes Konstruktionselement bietet hierbei Architekten und Ingenieuren besondere Möglichkeiten der Gestaltung. Deutlich ist die Tendenz zu immer größeren Glasflächen im Hausbau zu erkennen – der Anteil an statisch in Rechnung zu stellenden Wandscheiben wird immer geringer. Um diesem Trend zu begegnen gilt es Verglasungssysteme zu etablieren, die zum einen den architektonischen Ansprüchen genügen und zum anderen eine statische Funktion übernehmen.

### 1.1.2 Technologische Aspekte

Glas kann sehr hohe Druckkräfte aufnehmen, die Beanspruchbarkeit auf Zug ist eher bescheiden. Letztlich sind die meisten Glasbrüche auf Zugmechanismen im Glas

zurückzuführen. Will man sich die Druckfestigkeit von Glas zu Nutze machen, ist die Art der Lasteinleitung wohl das Kriterium für die Belastbarkeit. Durch elastische Verklebung kann eine „schonende“ Lasteintragung erfolgen – Spannungsspitzen werden vermieden.

Eine sinnvolle baupraktische Umsetzung ist natürlich nur möglich, wenn eine geeignete Konstruktionslösung gefunden ist. Eine wirtschaftliche Herstellbarkeit und Montierbarkeit der verklebten Glaselemente ist dabei genauso wesentlich wie die nachträgliche Austauschbarkeit bei Glasbruch.

### **1.1.3 Wirtschaftliche Aspekte**

Selbst das einfachste Floatglas hat mehr zu bieten als Transparenz. Die außergewöhnlichen statischen Eigenschaften sind immer vorhanden, bleiben aber ungenutzt. Wieso sollte man sich diese ohnehin vorhandenen Eigenschaften des Glases nicht zu Nutze machen - die aussteifende Wirkung gezielt einsetzen? Auf umständliche und kostspielige, zusätzliche Aussteifungsmaßnahmen könnte verzichtet werden, der Werkstoff Glas wird besser ausgenutzt.

## **1.2 Aufgabenstellung**

Ziel ist es, baupraktisch umsetzbare Konstruktionslösungen für wandartig verklebte Holz-Glas-Verbundelemente zu finden, welche als Basis für weiterführende Entwicklungen dienen können. Die Leistungsfähigkeit dieser statisch wirksamen Verbundelemente soll aufgezeigt werden und das Tragverhalten als Aussteifungsscheibe beurteilt werden. Beteiligte Projektpartner aus der Wirtschaft sollen an neue Technologien geführt werden (Klebstoff – Holz – Glas) um den Praxisbezug dieser wissenschaftlichen Arbeit zu unterstreichen. .

## **1.3 Abgrenzung**

Die Thematik der Klebung von Holz und Glas soll in Form von Orientierungsversuchen erfolgen. Ein Anspruch auf statistisch gesicherte Ergebnisse wird auf Grund der geringen Proben- und Prototypenanzahl nicht bestehen. Die Themen Brandschutz, Schallschutz, statische Bemessung, das Langzeitverhalten der Klebefugen und mechanische Auswirkungen auf den Randverbund von Isolierglasscheiben werden nicht untersucht. Der Beitrag zur sicheren Bemessung von Holz-Glas-Verbundelementen bleibt auf die Grundlagen eines möglichen Sicherheitskonzeptes beschränkt und befasst sich hier mit der allgemeinen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanschauung.

## **1.4 Inhaltlicher Überblick**

Zu Beginn des Projektes wurden in einem Arbeitsgespräch unter Beteiligung von Univ. Prof. Winter (TU – Wien), Univ. Prof. Kreuzinger (TU – München), Prof. Niedermaier (FH – Rosenheim) und Dipl.-(HTL) Ing. Peter Schober (Holzforschung Austria) folgende Themenschwerpunkte abgestimmt:

- Geeignete Klebstoffe für den Holz-Glas-Verbund
- Analyse von Konstruktionssystemen
- Experimentelle Untersuchungen an Prototypen
- Beitrag zur Beurteilung des statischen Tragverhaltens

Die Projektdurchführung erfolgt durch die HFA unter Einbeziehung von Herrn Univ. Prof. Winter und Herrn Prof. Niedermaier als wissenschaftlicher Beirat.

Die vorliegende Arbeit setzt auf die Ergebnisse eines ift-Projektes von Prof. Niedermaier auf (NIEDERMAIER, P. (2002)), in dem die Grundidee darin lag, Fassadenelement zu entwickeln, welches statisch wirksam zB. einen Wintergarten aussteifen könnte. Es wurden die Grundlagen zum Thema elastische Verklebung von Holz und Glas erfasst und ein erster Konstruktionsvorschlag gemacht. Auf diesen Erkenntnissen wird hier aufgebaut, wobei eine Weiterführung des Themas Holz-Glas-Verbund in die Baupraxis erfolgen wird. Es sollen dabei sowohl bauphysikalische Aspekte (Einsatz von Isolierglas) als auch die Herstellbarkeit und Montierbarkeit im Detail betrachtet werden. Das Thema Konstruktionslösung wird neu aufgerollt um innovative Lösungen für die Praxis zu finden, welche auch umsetzbar sein werden. Untersuchungen an großformatigen Prototypen mit unterschiedlichen Konstruktionsweisen runden das Projekt ab und sollen die Leistungsfähigkeit der Systeme zeigen.

#### 1.4.1 Geeignete Klebstoffe finden

Zunächst sollen geeignete Klebstoffe für die Verbindung von Holz und Glas gefunden werden. Dazu wird deren Eignung für diesen speziellen Einsatzzweck an Hand von Versuchen mit Kleinproben festgestellt. Es werden spezifische Parameter ausgewertet und verglichen um die Klebstoffsysteme bewerten zu können.

Derzeit besteht lediglich ein Europäisches Zulassungsverfahren für Structural-Glazing-Silikonklebstoffe – die ETAG 002. Darin werden die Anforderungen an die Verklebung von Glas auf Metall behandelt. Eine statische Wirksamkeit der Klebefuge wird für Windsog und Winddruck, sowie für das Abtragen des Eigengewichtes der Glasscheibe vorgesehen – die Aussteifungsthematik wird nicht behandelt. Es fehlt also an einer erweiternden Formulierung des Anwendungsbereiches sowie an der Einbindung des Werkstoffes Holz. Einen Beitrag zu diesen Themen wird diese Arbeit liefern.



**Abbildung 2: Probekörper für die Bruchversuche und Klimabelastungsversuche**

#### **1.4.2 Konstruktionssysteme entwickeln und analysieren**

Da es sich bei verklebten Holz-Glas-Verbundelementen um eine neuartige Konstruktionstechnologie gilt es verschiedene Konstruktionsmöglichkeiten zu analysieren und geeignete Lösungen aufzuzeigen. Die Methodik der Verschraubung der Elemente auf Pfosten und Riegel, die Auswirkung der Verbundbauweise auf das Wärme- und Feuchtigkeitsverhalten oder der Umgang mit unvermeidlichen Bautoleranzen sind wesentliche Punkte bei der Betrachtung verschiedener Konstruktionsvarianten.

#### **1.4.3 Experimentelle Untersuchungen von Prototypen**

Versuche an großformatigen Prototypen werden das Potential von verklebten Holz-Glas-Verbundelementen aufzeigen und deren grundsätzliche Eignung zur Aussteifung verdeutlichen. Neben der statischen Leistungsfähigkeit gelten allerdings auch die Herstellung und die Montage der Verbundelemente als relevant für die Akzeptanz in der Baupraxis. Auch diese Themen werden in dieser Arbeit beleuchtet um abzuschätzen, ob sich die verklebten Systeme auf der Baustelle bewähren werden.

#### **1.4.4 Beitrag zur Beurteilung des statischen Tragverhaltens**

Um die Anwendung von Holz-Glas-Verbundelementen im Hinblick auf die Nachweisführung anzudeuten werden die Themen Sicherheit und Zuverlässigkeit im Rahmen einer Versagensmodellbetrachtung analysiert. Dies soll als Beitrag und Anstoß zu einer Erstellung eines statischen Nachweisverfahrens gesehen werden, in welchem die Erfahrungen aus den Prototypenversuchen einfließen sollen.

## **2 Stand der Technik**

### **2.1 Ausgangsstoffe**

#### **2.1.1 Glas**

##### **2.1.1.1 Eigenschaften von Glas**

Glas ist eine amorphe, das heißt im Wesentlichen nicht kristalline Substanz. Gewöhnlich wird Glas durch Schmelzen erzeugt. Thermodynamisch wird Glas als gefrorene, unterkühlte Flüssigkeit bezeichnet. Diese Definition gilt für alle Substanzen, die geschmolzen und entsprechend schnell abgekühlt werden. Das bedeutet, dass sich bei der Erstarrung der Schmelze zum Glas zwar Kristallkeime bilden, für den Kristallisationsprozess jedoch nicht genügend Zeit verbleibt. Das erstarrende Glas ist schnell zu fest, um noch eine Kristallbildung zu erlauben. Die Transformationstemperatur, das ist der Übergangsbereich zwischen Schmelze und Feststoff, liegt bei vielen Glasarten um 600 °C. Trotz des nicht definierten Schmelzpunkts ist Glas ein Festkörper.

Eine wesentliche Eigenschaft von Glas ist die Durchsichtigkeit. Die optischen Eigenschaften sind so vielfältig wie die Anzahl der Gläser. Neben klaren Gläsern, die in einem breiten Band für Licht durchlässig sind, kann man durch Zugabe von speziellen Materialien zur Schmelze die Durchlässigkeit blockieren. Zum Beispiel kann man optisch klare Gläser für Infrarotes Licht undurchdringbar machen, die Wärmestrahlung ist blockiert. Die bekannteste Steuerung der Durchlässigkeit ist die Färbung. Andererseits gibt es undurchsichtiges Glas, das schon aufgrund seiner Hauptkomponenten oder der Zugabe von Trübungsmitteln opak ist.

Gebrauchsglas hat eine Dichte von ca. 2,5 g/cm<sup>3</sup>. Die mechanischen Eigenschaften variieren sehr stark. Die Bruchfestigkeit wird wesentlich von der Abkühlgeschwindigkeit bestimmt. Glas ist weitgehend resistent gegen Chemikalien. Eine Ausnahme ist Flusssäure, sie löst das Siliziumdioxid und wandelt es zu Hexafluorokieselsäure. Im Allgemeinen hat Glas einen hohen elektrischen Widerstand.

### 2.1.1.2 Herstellung

Für die Herstellung von Kalk-Natron-Glas, das ca. 90 % der produzierten Glasmenge ausmacht, werden folgende Rohstoffe eingesetzt:

- **Quarzsand** als fast reiner  $\text{SiO}_2$ -Träger zur Netzwerkbildung. Wichtig ist, dass der Sand einen geringen (<0,05 %) Anteil an  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  besitzt, da sonst bei Weißglas störende Grünfärbungen auftreten.
- **Soda** ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) dient als Natriumoxydträger, das Netzwerkwandler und als Flussmittel dient und den Schmelzpunkt des  $\text{SiO}_2$  senkt. In der Schmelze wird Kohlensäure frei und löst sich als Gas aus dem Glas. Natrium kann auch als Nitrat oder Sulfat der Schmelze zugeführt werden.
- **Pottasche** ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) liefert Kaliumoxid für die Schmelze, das wie Natriumoxid als Netzwerkwandler und Flussmittel dient.
- **Feldspat** ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) trägt neben  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Na}_2\text{O}$  Tonerde ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in das Gemenge ein. Diese führt zu einer Erhöhung der Glashärte.
- **Kalk** dient als Netzwerkwandler und erhöht die Festigkeit der Gläser. Reines  $\text{CaO}$  hat einen zu hohen Schmelzpunkt, so dass  $\text{CaCO}_3$  eingesetzt wird. Bei der Schmelze wandelt es sich zu Kohlendioxid und Kalziumoxid.  $\text{CaO}$  erhöht in mäßiger Zugabe (10-15%) die Härte.
- **Dolomit** ist ein Träger für  $\text{CaO}$  und  $\text{MgO}$ . Magnesiumoxid hat ähnliche Eigenschaften wie Kalziumoxid auf die Schmelze.
- **Altglas** oder Eigenscherven aus dem Produktionsbruch werden ebenfalls dem Rohstoffgemenge beigefügt, Altglas aus dem Glasrecycling allerdings nur in der Behälterglasindustrie, wo ihr Anteil bis über 90 % betragen kann. Neben eingespartem Rohstoff macht sich dies im geringeren Energieverbrauch bemerkbar, da Scherven leichter schmelzen als das Rohstoffgemenge. Probleme beim Altglasrecycling sind eine schlechte Farbtrennung, Fremdbestandteile wie Metalle, Keramik oder Spezialgläser. Die Fremdstoffe verursachen Glasfehler durch nicht vollständiges Aufschmelzen und Schäden in der Glasschmelzwanne, da sich Metalle in den feuerfesten Boden einfressen.
- Für Spezialgläser kommen auch **Mennige**, **Borax**, **Bariumkarbonat** und andere **seltene Erden** zum Einsatz.

### 2.1.1.3 Glastypen

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

- **Floatglas** ist Flachglas, welches im Floatprozess, oder auch Floatglasverfahren, hergestellt wurde. Das Verfahren wird seit den 1960ern industriell angewandt und liefert derzeit etwa 95 % des gesamten Flachglases aller Anwendungsbereiche wie Fensterglas, Autoscheiben und Spiegel.
- **Vorgespanntes Glas** oder auch Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) ist ein Glas, bei dem durch Wärmebehandlung gezielt mechanische Spannungen im Material erzeugt und dadurch die Bruchfestigkeit gegenüber mechanischer oder thermischer Beanspruchung erhöht wird. Das Glas wird dabei in einem Ofen erwärmt und dann schnell abgekühlt. Durch dieses Abschrecken erstarrt die Oberfläche und die äußeren Abmessungen des Bauteiles ändern sich nun nur noch vergleichsweise wenig. Der wärmere Kern zieht sich jedoch im weiteren Abkühlprozess noch stärker zusammen. Dadurch entsteht ein permanentes Spannungsfeld im Bauteil. Die Glasscheibe steht somit an ihren Oberflächen unter Druckspannung, im Inneren

hingegen unter Zugspannung – dazwischen verläuft eine neutrale Phase. Durch diese eingefrorene Vorspannung kann das Glas deutlich höhere Zugbelastungen kompensieren als nicht behandeltes Glas. Da die Druckfestigkeit bei Gläsern die Zugfestigkeit deutlich überwiegt, stellt dies insgesamt eine Verbesserung dar. Eine so behandelte Glasscheibe kann jedoch anschließend nicht mehr – wie bei unbehandeltem Glas möglich – geschnitten oder gebrochen werden. Im Falle von Glasbruch zerfällt das Bauteil in kleine Krümel. Vorgespanntes Glas findet überall dort Anwendung, wo an Glas erhöhte mechanische oder sicherheitstechnische Anforderungen gestellt werden. In seltenen Fällen kann es durch Nickelsulfideinschlüsse zum Spontanbruch bei vorgespanntem Glas kommen. Durch einen sog. Heat-Soak-Test (Heißlagerungstest) kann dies weitgehend verhindert werden. Das bereits vorgespannte Glas wird auf 280°C aufgeheizt und diese Temperatur für mindestens 4 Stunden gehalten. Dieses Glas trägt dann die Bezeichnung ESG-H.



Abbildung 3: Bruchbild von vorgespanntem Glas

- **Teilvorgespanntes Glas** wird wie vorgespanntes Glas einem thermischen Härtingsprozess unterzogen. Der Abkühlvorgang vollzieht sich jedoch langsamer. Dadurch kommt es zu geringeren Spannungsunterschieden im Glas. Die Biegefestigkeit liegt zwischen Floatglas und vorgespanntem Glas. Im Bruchfall entstehen Risse, die radial vom Bruchzentrum zu den Scheibenrändern verlaufen.

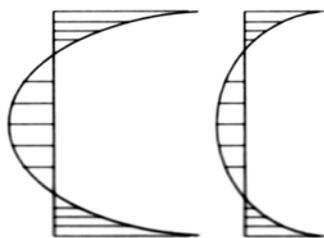
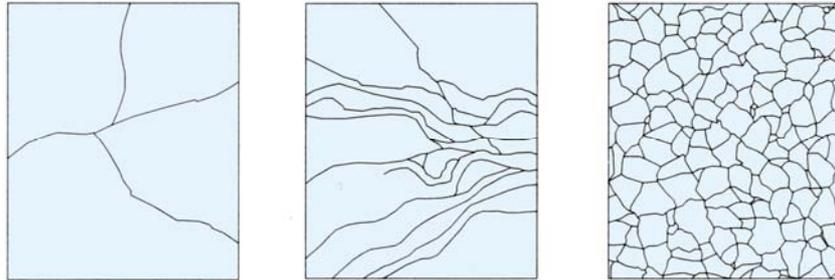


Abbildung 4: Spannungsverteilung entlang der Glasscheibendicke von vorgespanntem (links) und teilvorgespanntem Glas (rechts)

- **Verbundglas** ist der Sammelbegriff für ein Laminat mit mindestens einer Glasscheibe, das durch eine klebfähige Zwischenschicht aus Kunststoff, z.B. durch ein Gießharz oder eine hochreißfeste, zähelastische, thermoplastische Verbundfolie, mit einer anderen Glasscheibe verbunden ist. Die bei den meisten Anwendungen im Bau- und Fahrzeugbereich zum Einsatz kommende Verbundfolie besteht aus Polyvinylbutyral, abgekürzt PVB. Andere gebräuchliche Zwischenschichtmaterialien sind Ethylvinylacetat (EVA), Polyacrylat (PA), Polymethylmethacrylat (PMMA), Polyurethan (PUR), etc. Je nach Anzahl, Art und Dicke der verwendeten Glasscheiben und Zwischenlagen werden Verbundgläser als Sicherheitsglas,

Schallschutzglas, Alarmglas, Brandschutzglas, durchschusshemmendes Glas usw. eingesetzt. Besonders widerstandsfähige Verglasungen ergeben sich durch die Kombination von Glasscheiben mit einer oder mehreren Scheiben aus Polycarbonat.



**Abbildung 5: Bruchbild von Floatglas, teilvorgespanntem Glas und vorgespanntem Glas (v.l.n.r.)**

## 2.1.2 Holz

### 2.1.2.1 Eigenschaften von Holz

#### 2.1.2.2 Holzarten

Holz kann in drei wesentliche Holzarten eingeteilt werden:

- **Nadelholz:** Entwicklungsgeschichtlich sind Nadelhölzer älter als Laubhölzer und haben einen einfacheren anatomischen Zellaufbau. Sie sind durch zwei Zellarten charakterisiert - Tracheiden und Parenchymzellen.

**Tracheiden:** Langgestreckte (prosenchymatische) an den Enden spitz zulaufende Zellen, die nur mit Luft oder Wasser gefüllt sind. Sie haben einen Anteil von 90-100 % der Holzsubstanz. Über so genannte Tüpfelpaare bzw Hoftüpfel erfolgt der Wasseraustausch zwischen den Zellen. In radialer Richtung sorgen die Holzstrahlen (Quertracheiden) für den Wassertransport. Sie haben einen Anteil von 4-12 % an der gesamten Holzsubstanz.

**Parenchymzellen:** Meist rechteckige Zellen, die die Leitung von Nähr- und Wuchsstoffen sowie die Speicherung von Stärke und Fetten übernehmen. In radialer Richtung bilden sie ebenfalls Holzstrahlen und umgeben die Harzkanäle, hier spricht man dann auch von Epithelzellen. Diese Epithelzellen produzieren das Harz, welches sie in den Harzkanal ausscheiden. Auch Nadelbäume, die keine Harzkanäle besitzen (z.B. Tanne), können so im Falle einer Verwundung traumatische Harzkanäle bilden. Die Nadelbäume Fichte, Lärche, Kiefer und Douglasie besitzen Harzkanäle, Eibe, Tanne und Wacholder nicht.

- **Laubholz:** Die Zellen von Laubholz sind wesentlich differenzierter als die von Nadelholz. Man kann sie in drei funktionale Gruppen einteilen – Leitgewebe, Festigungsgewebe und Speichergewebe.

**Leitgewebe:** Gefäße (Tracheen), Gefäßtracheiden, vasizentrische Tracheiden. Die beiden letzteren sind Zwischenstufen in der Entwicklung von der Tracheide zum Gefäß.

**Festigungsgewebe:** Libroformfasern, Fasertracheiden

**Speichergewebe:** Holzstrahlenparenchymzellen, Längsparenchymzellen, Epithelzellen

Charakteristisch für Laubhölzer sind die in Nadelhölzern nicht vorhandenen Tracheen. Sie sind oft mit bloßem Auge als kleine Löcher im Holzquerschnitt und als Rillen im Tangentialschnitt zu erkennen. Man unterscheidet je nach Anordnung der Tracheen zwischen ringporigen Hölzern (z.B. Eiche, Edelkastanie, Esche, Robinie, Ulme ...), halbringporigen Hölzern (z.B. Nussbaum, Kirsche ...) und zerstreutporigen Hölzern (z.B. Birke, Erle, Linde, Pappel, Rotbuche, Weide ...).

- **Tropenholz:** Der Begriff Tropenholz ist eher unpräzise und nicht alternativ zu Laub- oder Nadelholz zu verstehen. Er bezeichnet aus mitteleuropäischer Sicht die in den tropischen oder subtropischen Regionen der Erde wachsenden Holzarten. Viele tropische Hölzer zeichnen sich durch vorteilhafte mechanische Eigenschaften und höhere Beständigkeit gegen Bewitterung, Insekten- oder Pilzbefall aus. Oftmals wird auch die Farbe oder Maserung als ansprechend empfunden. Beispiele: Mahagoni, Teak, Balsaholz, Bangkirai, Bongossi, Abachi, Framiere

### 2.1.2.3 Signifikanz für die Holz-Glas-Verklebung

Wesentlich beim Klebeprozess ist die Beschaffenheit der Holzoberfläche. Je nach Art der mechanischen Holzbearbeitung weist die Holzoberfläche eine unterschiedliche Struktur auf. Grundsätzlich sollte die Oberflächenrauigkeit so gering wie möglich sein. Sägerauhe Schnittkanten sind für den Einsatz elastischer Klebstoffe nicht geeignet. Wird das Holz geschliffen so kann eine scheinbar glatte Fläche erzeugt werden. Durch den Schleifprozess werden jedoch die Holzfasern, je nach Rauigkeit des Schleifwerkzeuges, gerissen. Unter dem Mikroskop betrachtet erkennt man die ausgefranste Struktur der Holzfasern. Feingehobelte Ware kann in Abhängigkeit des Hobelwerkzeuges sehr gute, geschnittene Oberflächen liefern. Durch Finieren, welches eine besonders hochwertige Form des Hobelns darstellt, werden optimale, glatte Flächen erzeugt.

Bei der Verwendung elastischer Klebstoffe sind mit geschliffenen und gehobelten Hölzern gute Ergebnisse zu erzielen. Die zuverlässigsten Verklebungen sind mit finierten Oberflächen zu erreichen

## 2.1.3 Klebstoffe

### 2.1.3.1 Einteilung der Klebstoffe

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

- **Einteilung nach der chemischen Basis:** Es werden zwei wesentliche Gruppen unterschieden – Klebstoffe, die auf organischen Verbindungen basieren und solche die auf anorganischen Verbindungen basieren. Die organischen Klebstoffe sind dabei die weitaus größere Gruppe und unterteilen sich weiters in Klebstoffe mit natürlicher Basis und Klebstoffe mit künstlicher Basis. Silikone stellen eine Mischgruppe dar, da sie sowohl Verbindungen mit organischen und anorganischen Merkmalen aufweisen.

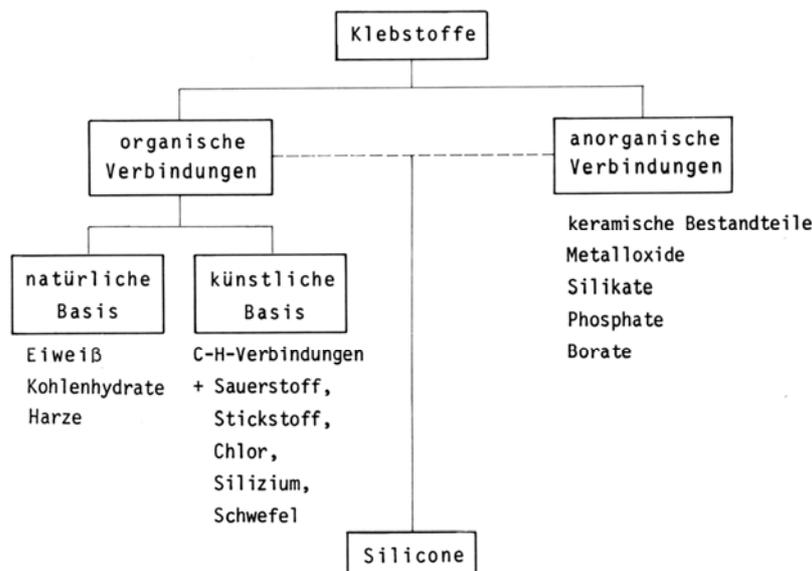


Abbildung 6: Einteilung nach der chemischen Basis (HABENICHT, G. (1990))

Nach HABENICHT, G. (1990) ergeben sich als wesentliche Unterscheidungskriterien zunächst die unterschiedlichen Klebefestigkeiten und Alterungsbeständigkeiten innerhalb der organischen Verbindungen, die bei Klebstoffen auf künstlicher Basis wesentlich höhere Werte aufweisen. Des Weiteren gelten die Verarbeitungs- und Anwendungstemperaturen als charakteristisch. Klebstoffe auf organischer Basis werden im Vergleich zu den anorganischen Verbindungen bei niedrigen Temperaturen verarbeitet und besitzen nur eine begrenzte thermische Beständigkeit.

- **Einteilung nach dem Abbinde Mechanismus:** Dabei erfolgt die Einteilung nach dem Molekülzustand zu Beginn des Klebens.

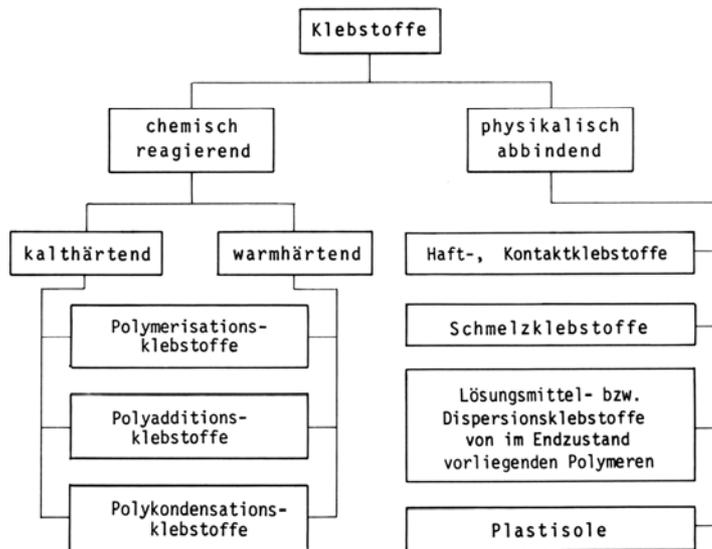


Abbildung 7: Einteilung nach dem Abbindemechanismus (HABENICHT, G. (1990))

Bei chemisch reagierenden Systemen liegen reaktionsbereite Monomer- bzw. Prepolymermoleküle gleicher oder verschiedener Art vor, welche miteinander zu einer polymeren Klebeschicht reagieren. Diese Reaktion kann zeit- und/oder temperaturabhängig verlaufen.

Physikalisch abbindende Systeme bestehen bereits aus fertigen Polymerverbindungen. Diese werden beispielsweise durch Lösungsmittelsysteme oder erhöhte Temperaturen in einen benetzungsfähigen Zustand gebracht. Eine chemische Reaktion findet also nicht statt.

### 2.1.3.2 Klebstofftypen

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

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

Wesentliche Eigenschaften von Silikonklebstoffen sind:

- Hohe Temperaturbeständigkeit
- Sehr hohe Flexibilität bei tiefen Temperaturen
- Hervorragende Witterungsbeständigkeit
- Gute Beständigkeit gegenüber schwachen Säuren und Basen
- **Polyurethane** leiten sich von der Isocyan säure ab. Diese gilt als äußerst reaktionsfreudig und addiert sehr leicht Verbindungen, welche über ein aktives (bewegliches) Wasserstoffatom verfügen. Bei Einkomponentensystemen handelt es sich um feuchtigkeitsvernetzende Systeme wobei die vorvernetzten Prepolymere mit dem Wasserstoff aus der Luftfeuchtigkeit zu Polymeren reagieren.

Zweikomponentensysteme bestehen aus niedrigmolekularen Polyisocyanaten und Polyolen.

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

### 2.1.3.3 Definitionen von Fachbegriffen

**Monomere** (griech. mono "ein, einzel" meros "Teil") sind niedermolekulare, reaktionsfähige Moleküle, die sich zu molekularen Ketten oder Netzen, zu unverzweigten oder verzweigten Polymeren, zusammenschließen können.

Ein **Polymer** (altgriech.: poly, viel; meros, Teil) ist eine chemische Verbindung, die aus Ketten- oder verzweigten Molekülen (Makromolekülen) besteht, die aus gleichen oder gleichartigen Einheiten (den so genannten Monomeren) bestehen. Das Adjektiv polymer bedeutet entsprechend aus vielen gleichen Teilen aufgebaut.

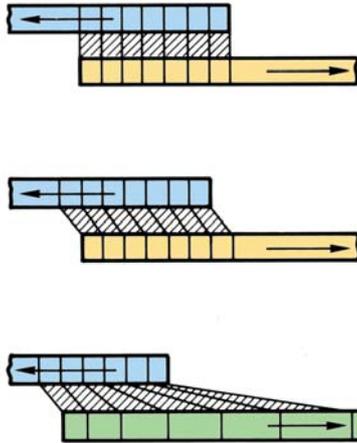
Die **Polymerisation** ist eine chemische Reaktion, bei der Monomere, meist ungesättigte organische Verbindungen, unter Einfluss von Katalysatoren und bei Auflösung der Mehrfachbindung zu Polymeren (Moleküle mit langen Ketten, bestehend aus miteinander verbundenen Monomeren) reagieren. Dabei unterscheidet man zwischen Homo-Polymerisation, bei der nur eine Monomerart umgesetzt wird, und Co-Polymerisation, bei der zwei oder mehr verschiedene Monomere zur Reaktion gebracht werden. Die Produkte der Polymerisation nennt man Polymerisate.

Bei der **Polyaddition** werden verschiedenartige Moleküle mit mindestens zwei funktionellen Gruppen unter Übertragung von Protonen (von einer Gruppe zur anderen) verknüpft. Die Polyaddition verläuft ähnlich der Polykondensation in Stufen, jedoch entstehen keine niedermolekularen Nebenprodukte, wie z.B. Wasser.

Eine **Polykondensationsreaktion** ist eine stufenweise über stabile, aber weiterhin reaktionsfähige Zwischenprodukte ablaufende Kondensationsreaktion, bei der aus Monomeren unter Abspaltung einfach gebauter Moleküle (meist Wasser) Polymere gebildet werden. Im Gegensatz zu den anderen Arten der Polymergewinnung (Polymerisation und Polyaddition), werden bei der Polykondensation ein oder mehrere Nebenprodukte frei (Wasser, Ammoniak, Alkohole, Chlorwasserstoff usw.), welche kontinuierlich abgeführt werden müssen.

### 2.1.3.4 Grundlagen der elastischen Klebung

Im Gegensatz zu starren Klebeverbindungen verformen sich elastische Klebeverbindungen bei Belastung charakteristisch. Dieser Effekt kann durchaus erwünscht sein, so z.B. zur Dämpfung von Schwingungen oder zum Ausgleich unterschiedlicher Wärmeausdehnungen oder Steifigkeiten der Substrate.



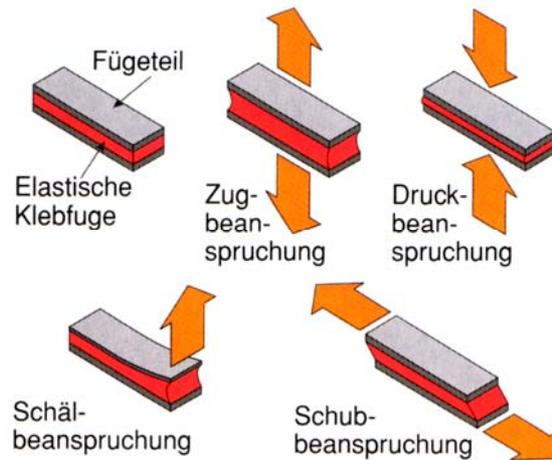
- oben: einfache Überlappung ohne Beanspruchung  
 mittig: gleichmäßige Verformung bei gleichen Werkstoffen  
 unten: ungleiche Verformung bei unterschiedlich steifen Werkstoffen

**Abbildung 8: Verformungsverhalten bei der Verklebung unterschiedlicher Werkstoffe**

Die Klebefestigkeit der elastischen Bauklebstoffe liegt je nach Klebstoffart bei ca. 0,6 bis 2,0 N/mm<sup>2</sup>. Sie wird in der Regel als Bruchspannung im Zugscherversuch (EN 1465) bestimmt. Die absolute Verschiebung der Fügeteile bis zum Bruch beträgt bei 2 bis 3 mm Klebstoffdicke je nach Klebstofftyp zwischen 5 und 15 mm. Die Bruchdehnung im Zugversuch nach DIN 53504 liegt je nach Klebstofftyp bei 400 bis 1000%. Dieses Spannungs-Dehnungs-Verhalten erlaubt es, Kräfte zu übertragen und Spannungen großflächig zu verteilen.

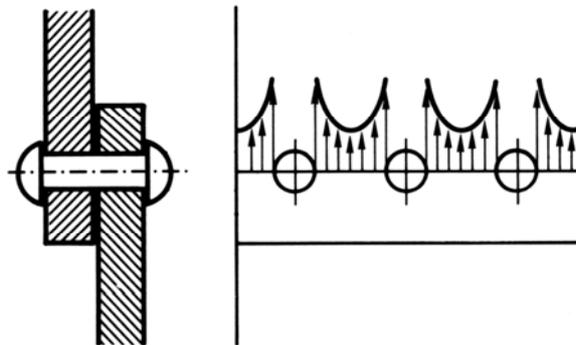
Vorraussetzung für die optimale Funktion einer Klebung ist die richtige konstruktive Ausbildung der Verbindungsstelle. Je nach Anwendung wird der entsprechende Klebstofftyp gewählt und danach die Klebefläche, Klebefugendicke, Belastungsrichtung, etc konstruktiv angepasst. Als wesentliche Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit der Verklebung gelten:

- die Belastungsart,
- die Belastungsrichtung,
- die Belastungsdauer,
- die bauphysikalische Belastung (UV-Licht, Feuchte,...),
- der Klebeprozess selbst,
- die konstruktive Gestaltung der Klebefuge



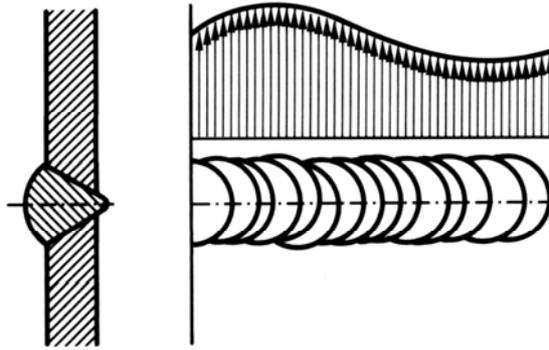
**Abbildung 9: Grundformen der Klebefugenbelastung (HEINZMANN, R., KOCH, S., THIELEMANN, H.C., WOLF (2001))**

Ein wesentlicher Vorteil von Klebungen im Vergleich zu traditionellen Fügemethoden ist der homogene Spannungsverlauf zwischen den Fügeteilen. Je steifer der Klebstoff dabei ist, desto direkter laufen die Spannungen von einem Fügeteil in den anderen. Der Querschnitt, durch den die Spannungen fließen kann konstruktiv so gewählt werden, dass Störungen im Kraftfluss minimal bleiben. Spannungsspitzen werden dabei nur durch Unstetigkeiten oder etwaiger Fehlstellen hervorgerufen. Elastische Klebstoffe sind in der Lage, je nach Klebschichtdicke, derartige Spannungsunregelmäßigkeiten auszugleichen. Betrachtet man beispielsweise das Spannungsbild einer Niet- oder Schraubverbindung zeigt sich, dass die Kräfte punktuell übertragen werden – Spannungsspitzen bilden sich aus.



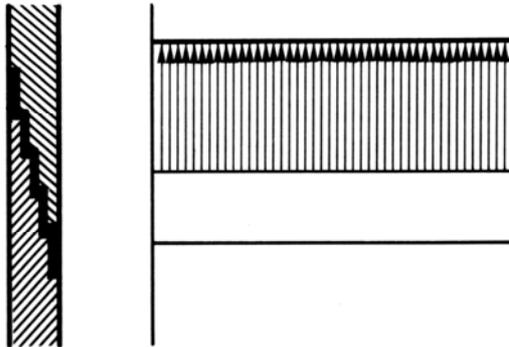
**Abbildung 10: Spannungsverlauf entlang einer Nietreihe (SCHINDELLI-BIDINELLI, E., GUTHERZ, W. (1988))**

Eine Schweißverbindung zeigt einen wesentlich homogenen Spannungsverlauf. Bedingt durch den Wärmeeintrag und den Arbeitsprozess ist in Abhängigkeit der Schweißnahtausführung auch mit Spannungsschwankungen zu rechnen.



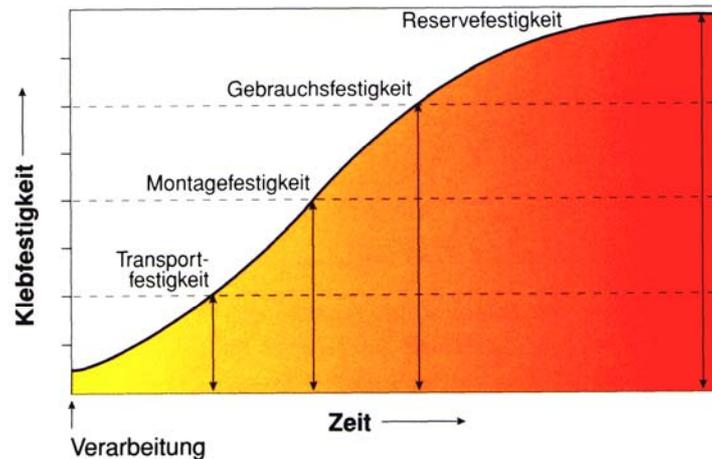
**Abbildung 11: Spannungsverlauf entlang einer Schweißnaht (SCHINDELLI-BIDINELLI E., GUTHERZ, W. (1988))**

Wird eine Klebeverbindung konstruktiv richtig ausgeführt so sind mit geringster Einflussnahme auf die Fügeteile selbst Spannungsübertragungen mit geringsten Schwankungen möglich.



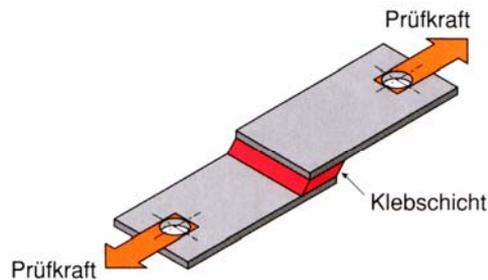
**Abbildung 12: Spannungsverlauf entlang einer geschäfteten Klebung (SCHINDELLI-BIDINELLI, E., GUTHERZ, W. (1988))**

Im Gegensatz zu mechanischen Verbindungen erreichen Klebeverbindungen ihre Endfestigkeit nicht sofort, sondern nach einer gewissen Aushärtungszeit. Bis zum vollständigen Erreichen der der Endfestigkeit steigt die Klebstofffestigkeit je nach Klebstofftyp rasch oder langsam an. Für industrielle Anwendungen wird der Erhärtungsprozess bei modernen Klebstoffen „eingestellt“ - der Klebstoff kann an die Klebeaufgabe chemisch angepasst werden.



**Abbildung 13: Festigkeitsaufbau von Klebungen (HEINZMANN, R., KOCH, S., THIELEMANN, H.C., WOLF (2001))**

Die Festigkeit eines Klebstoffes wird meist mit seiner Zugscherfestigkeit angegeben. Diese wird unter definierten Randbedingungen mit dem Zugscherversuch ermittelt. Die im Versuch unter Laborbedingungen ermittelte Zugscherfestigkeit muss mit Abminderungsfaktoren verringert werden, um Einflüsse wie fertigungstechnische Prozessschwankungen, Gebrauchstemperaturen, Beanspruchungsdauer, Belastungsart, ... zu berücksichtigen.



**Abbildung 14: Schema des Zugscherversuches (HEINZMANN, R., KOCH, S., THIELEMANN, H.C., WOLF (2001))**

Die ökologische Bilanz rund um einen Arbeitsprozess sowie die Risiken für Mensch und Umwelt sind in heutiger Zeit wichtige Kriterien. Das Kleben ist in der Regel eine lärmfreie und staubfreie Methode Bauteile zusammenzufügen. Der Fügeprozess selbst kommt auch meistens ohne Zuführen von Energie aus. Jedoch gilt es zu beachten, dass Klebstoffe und/oder etwaige Vorbehandlungsmittel flüchtige oder auch gesundheitsgefährdende Stoffe enthalten können. Bei Einhaltung entsprechender Arbeitstechniken und Sicherheitsvorschriften können diese sehr gut kontrolliert werden.

Die gesetzlichen Bestimmungen zum Umgang mit Klebstoffen sind vielfältig und international unterschiedlich geregelt. Im Wesentlichen beziehen sich die Vorschriften auf folgende Bereiche:

- Lagerung und Transport
- Verarbeitung
- Anwendung des Fertigprodukts
- Entsorgung

Durch den Gesetzgeber wird der Klebstoffhersteller in der Regel verpflichtet, ein Sicherheitsdatenblatt zu erstellen und dem Anwender vorzulegen. Die Inhalte sind in EU-Ländern normativ geregelt.

## 2.2 Gebäudeaussteifung

Aussteifungssysteme in Hochbauten haben eine wesentliche Aufgabe – sie müssen horizontale Einwirkungen aufnehmen und sicher in das Fundament leiten. Je nach Bauweise des Gebäudes unterscheidet man die Art der Gebäudeaussteifung. Bei Hochbauten in Massivbauweise reicht in der Regel die aussteifende Wirkung der gemauerten oder monolithisch betonierten Wandscheiben aus, um der Konstruktion die notwendige Stabilität zu geben. Bei Schottenbauweise erfolgt die Orientierung der wenigen Wandscheiben in Richtung der horizontalen Hauptbeanspruchungsrichtung. Beanspruchungen aus anderen Richtungen werden z.B. durch einen massiven Kern wie ein Treppenhaus aufgenommen. Die Skelettbauweise richtet sich mit ihrem Tragwerk hauptsächlich auf die vertikale Lastabtragung. Horizontale Einwirkungen müssen gezielt durch Verbände resp. Ausfachungen oder scheibenartige Füllungen der vertikalen Tragstruktur aufgenommen werden.

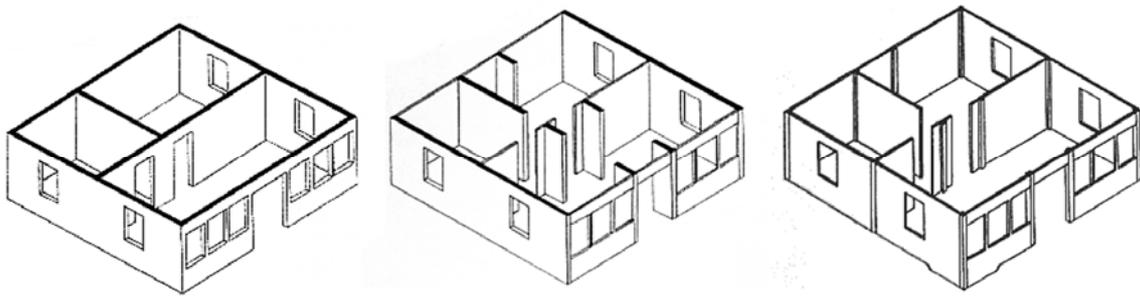


Abbildung 15: Schematische Darstellung typischer Bauweisen im Hochbau (KOLBITSCH, A. (2000))

### 2.2.1 Horizontale Einwirkungen

#### 2.2.1.1 Wind

Wind wirkt hinsichtlich der statischen Nachweisführung zum einen global auf das gesamte Gebäude und zum anderen lokal auf einen bestimmten Teil des Bauwerkes. Die rechnerische Erfassung der Windlast erfolgt als statische Ersatzlast. Maßgebend für die Größe der Ersatzlast sind die geografische Lage, die Höhe, die Form und die Umgebung des Gebäudes.

#### 2.2.1.2 Erdbeben

Erdbeben wirken als dynamische Belastungen auf das Gebäude. Durch das horizontale Bewegen des Bodens verursacht die Trägheit der Massen entlang der Gebäudehöhe

horizontale Kräfte in der Gebäudestruktur. Diese dynamischen Kräfte werden durch statische Ersatzkräfte dargestellt.

### 2.2.1.3 Zwängungen und Imperfektionen

Zwängungen entstehen in der Regel durch Bewegungen im Baugrund, Temperaturänderungen und Schwindverhalten von Baustoffen. Als Imperfektionen gelten Schiefstellungen von vertikalen Tragelementen, ungewollte Krümmungen in Tragwerksteilen oder mangelhafte Knotenanschlüsse. Beide Mechanismen verursachen sozusagen horizontale „Eigenspannungen“ im Gebäudetragwerk.

## 2.3 Aussteifende Wandscheiben in Holztafelbauweise

Im Holzrahmenbau werden zur Aussteifung von Gebäuden Wandscheiben in Holztafelbauweise verwendet. Dabei wird eine großformatige Holzwerkstoffplatte auf die tragende Pfosten-Riegel-Konstruktion aufgebracht. Als Verbindungsmittel werden in der Regel Nägel oder Klammern verwendet, fallweise wird die Platte auch auf die Konstruktion geleimt. Hauptanwendungsgebiet für diese Konstruktionselemente ist der klassische zimmermannsmäßige Holzrahmenbau sowie der Fertighausbau.

Die Berechnung derartiger Wandscheiben ist normativ sehr gut erfasst. Die Nachweisführung für Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für verschiedene Plattenwerkstoffen und Verbindungsmitteln wird in den einschlägigen Normen für Ein-Raster- und Mehr-Raster-Wandscheiben angegeben.

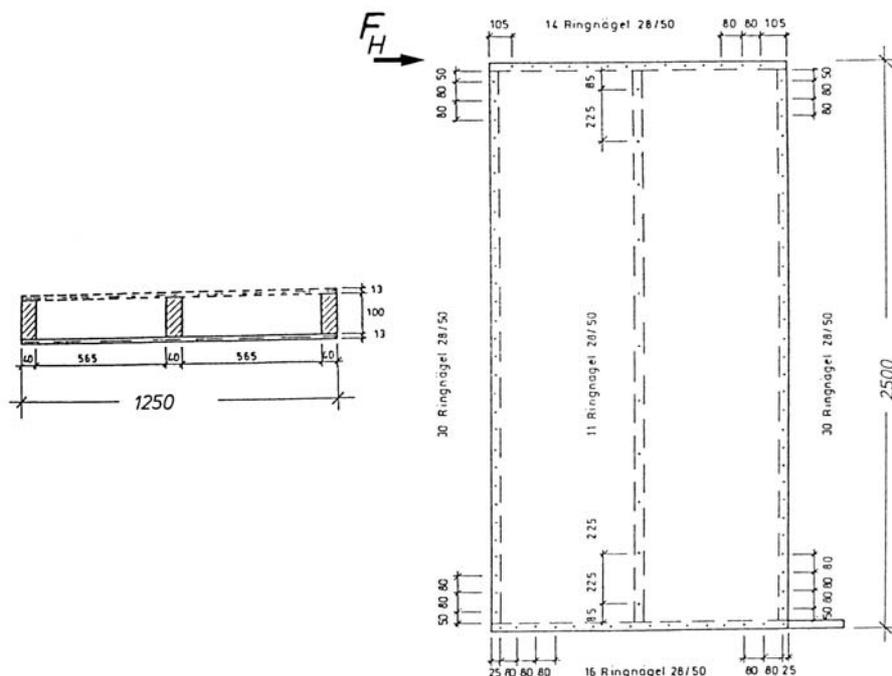


Abbildung 16: Ein-Raster-Wandscheibe nach DIN 1052

Das Tragverhalten wird in der Literatur hinreichend beschrieben. Die Wandscheibe verformt sich unter einer Horizontallast an der Kopfschwelle nicht wie ein Kragarm. Vielmehr tritt in Abhängigkeit der Verbindungsmittelsteifigkeit eine ausgeprägte Starrkörperverschiebung resp. -verdrehung der Beplankung auf. Ausschlaggebend für die Verdrehung ist dabei das

Versatzmoment (Horizontalkraft  $F_H$  mal Scheibenhöhe  $h$ ). Die horizontale Verschiebung der Beplankung relativ zur unbeweglichen Fußschwelle wird durch die Horizontalbelastung  $F_H$  hervorgerufen.

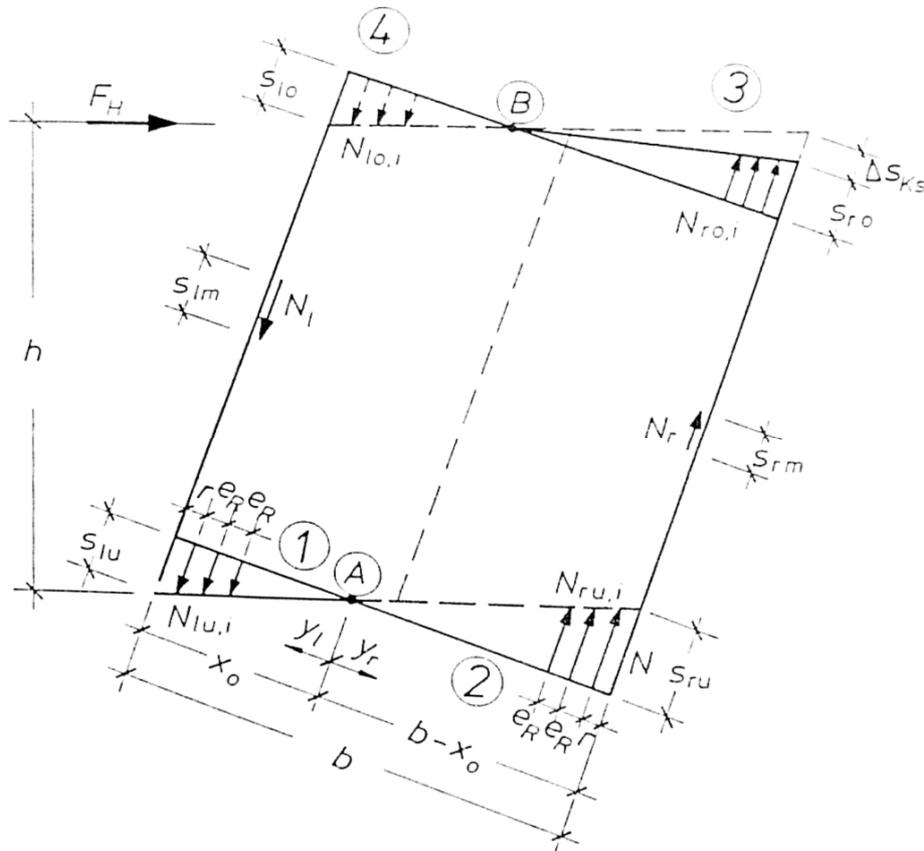


Abbildung 17: Verformung einer durch Schub beanspruchten Beplankung (RASCHPER, N. (1990))

Für die Betrachtung der Gesamtverformung kann die Schubverformung in der Platte selbst vernachlässigt werden. Es wird also bereits in der Holztafelbauweise die Platte mit unendlicher Steifigkeit angesehen.

Auf Grund des Verformungsverhaltens ist leicht festzustellen, dass ein Teil der Fußschwelle unter Sohldruckspannungen steht, der übrige Teil würde ohne hinreichende Zugverankerung abheben. Mit zunehmender Horizontalkraft und breiterem Format der Wandscheibe wäre der Bereich der Sohlpressung nun größer. Die Verbindungsmittel zwischen Platte und Fußschwelle verhalten sich analog und übertragen im Bereich der Sohlpressung die größten Vertikalkräfte. Die Horizontalkräfte verlaufen entlang der Schwelle konstant.

Hinsichtlich der Belastung der Verbindungsmittel kann aus der Literatur qualitativ zusammengefasst werden:

- Der horizontale Schub in den Verbindungsmitteln in Kopf und Fußschwelle ist konstant.
- Der vertikale Schub in den Verbindungsmitteln in der Fußschwelle ist im Bereich der Sohlpressung am größten, mit dem Maximum unter dem Druckstiel.
- Außerhalb des Sohlpressbereiches der Fußschwelle richtet sich die Schubspannung nach oben, wobei je nach Biegesteifigkeit der Schwelle, Nachgiebigkeit der Zugverankerung des Zugstieles und Format der Wandscheibe die Spannung Null werden kann.

- Der vertikale Schub in den Verbindungsmitteln in der Kopfschwelle verhält sich analog zur Fußschwelle mit Ausprägung über dem Druckstiel.
- In den Stielen tritt Schub in den Verbindungsmitteln nur in Längsrichtung auf (RASCHPER, N. (1990), HENRICI, D. (1983)).

## 2.4 Aussteifende Wandscheiben in Holz-Glas-Verbundbauweise

Für die Aussteifung von Gebäuden mit geklebten Holz-Glas-Wandscheiben sollen an dieser Stelle die Nachweiskonzepte von HAMM, J. (2000) und NIEDERMAIER, P. (2002) erläutert werden. Die Darstellung von HAMM, J. (2000) geht dabei nicht wesentlich ins Detail und erfolgt in Anlehnung an den Holzrahmenbau. NIEDERMAIER, P. (2002) untersucht die Nachweisführung erstmals im Detail.

### 2.4.1 Nachweismodell nach HAMM

#### 2.4.1.1 Konstruktion

HAMM klebt auf eine 6mm dicke Floatglasscheibe im Format 2,0m x 2,0m rundum entlang der Scheibenkante einen Rahmen aus Furnierschichtholz mit einem Querschnitt von 2,5cm x 5cm. Als Klebstoff wurde ein warm härtender Einkomponenten-Reaktionsklebstoff auf Polyurethanbasis mit hoher Steifigkeit verwendet. Das Furnierschichtholz wurde mit der schmalen Seite auf die Glasscheibe geklebt. Genaue Angaben zur Klebefugengeometrie wurden nicht gemacht. Die Konstruktion wurde auf größtmögliche Ausnutzung der Materialeigenschaften resp. Festigkeit des Klebstoffes und des Glases ausgerichtet.

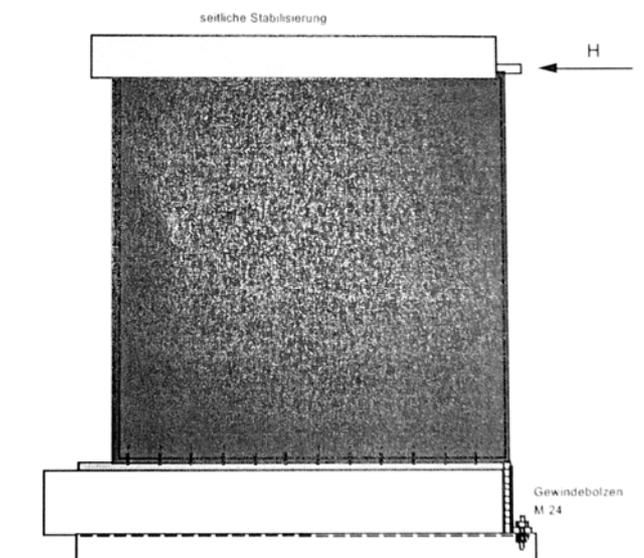


Abbildung 18: Konstruktion nach HAMM, J. (2000)

### 2.4.1.2 Versagensmechanismus

HAMM beobachtet das Beulverhalten der Glasscheibe, stellt aber fest, dass bei den untersuchten Scheibengeometrien kein Versagen durch Beulen auftritt und die Beulgefahr im Allgemeinen im Vergleich zu den anderen Versagensmechanismen als gering einzustufen ist. Er stellt fest, dass die Zugverankerung für den Versagensmechanismus entscheidend ist. Bei steifer Zugverankerung des auf Zug belasteten Randstieles bilden sich direkt in der Scheibenecke bereits hohe Zugspannungen im Glas aus. Da der Klebstoff steif ist kann auch keine Verteilung entlang der Scheibenkanten erfolgen. Es bleibt bei einer Spannungskonzentration in der Zugbelasteten Ecke. Dabei führen die Zugspannungsspitzen bei entsprechender Belastung zum Bruch der Glasscheibe. Weitere Spannungskonzentrationen stellt HAMM im Bereich der Lasteinleitung fest.

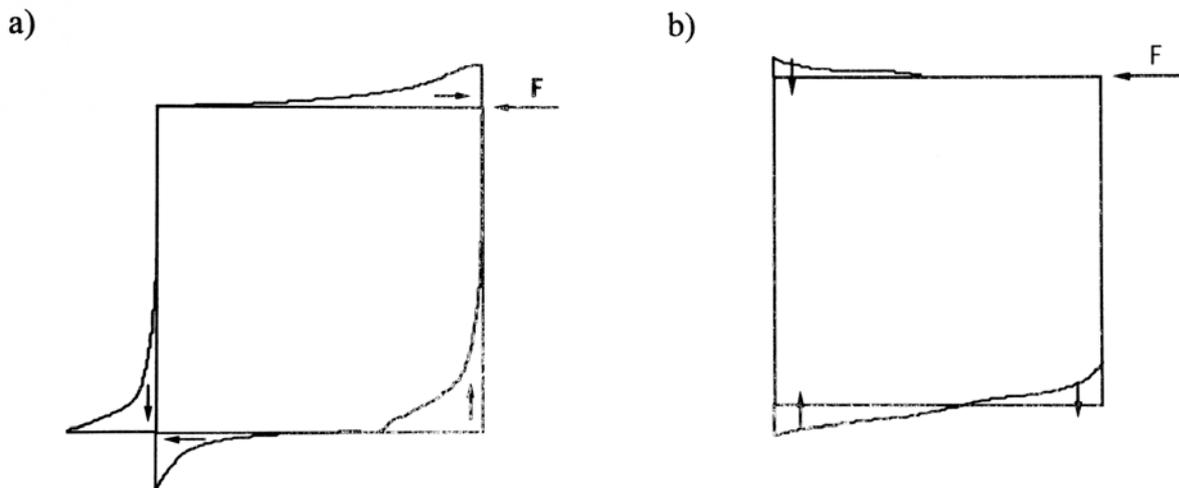


Abbildung 19: Qualitative Kraftverläufe in der Klebefuge nach HAMM, J. (2000)  
a) Normalkräfte, b) Querkräfte

HAMM beschreibt das Lagerungsverhalten der Fußschwelle analog den Ausführungen in RASCHPER, N. (1990). Im druckbelasteten Teil der Schwelle bildet sich die Sohlpressung in Abhängigkeit des Scheibenformates und der Klebstoffsteifigkeit aus. Bei RASCHPER und HENRICI wird angegeben, dass in den Randstielen nur eine Übertragung von Längskräften erfolgt. Es treten keine relevanten Querkräfte auf. HAMM übernimmt diese Anschauung aus der Holzrahmenbauweise für die geklebten Glasscheiben.

### 2.4.1.3 Nachweisführung

Nach CZIESIELSKI kann im Holzrahmenbau für die Bemessung von Wandscheiben mit einem Format von  $0,7 < l/h < 2,0$  das Ersatzstabverfahren angewendet werden. Dabei wird der Scheibe eine Ersatzdruckdiagonale eingeschrieben. Die Schnittgrößen der Ersatzfachwerksstäbe können trivial ermittelt werden. Der Tragfähigkeitsnachweis erfolgt durch den Knicknachweis der Ersatzdruckdiagonalen und Spannungsnachweisen der Rahmenstäbe.

HAMM bezieht sich bei seinem Bemessungsansatz auf dieses Fachwerkanalogieverfahren. Dabei setzt er die Ersatzdruckstrebe mit der Ersatzbreite  $b_D$  in die Glasfläche. Die Breite dieser Strebe wird mit

$$b_D = \min \begin{cases} 0,4 \cdot l \\ 0,4 \cdot h \end{cases} \quad (1)$$

mit

$b_D$	Ersatzbreite
$h$	Höhe der Wandscheibe
$l$	Länge der Wandscheibe

empfohlen.

Eine Untersuchung der Dehnung der Ersatzdruckdiagonalen zeigt, dass diese im Sinne der Gebrauchstauglichkeit nicht relevant sei.

Hinsichtlich des Nachweismodells wird festgestellt:

- Bei kleinen Lasten bildet sich in der Glasscheibe eine markante Druckstrebe aus. Bei großen Lasten wird die Druckstrebe breiter.
- Die Verformung der Glasscheibe kann vernachlässigt werden.
- Eine Versagensgefahr der Glasscheibe durch Beulen konnte nicht beobachtet werden.
- HAMM, J. (2000) empfiehlt das Ausbeulen der Druckdiagonalen allenfalls als umseitig gelagerten Plattenstreifen nach PETERSEN, C. (1992) zu berechnen.
- Eine steife Verklebung und eine starre Zugverankerung rufen Zugspannungsspitzen in der Glasscheibenecke beim Auflager hervor und in Folge Tragfähigkeitsversagen durch Zugbruch im Glas.
- HAMM, J. (2000) empfiehlt eine weichere Zugverankerung um die Spannungskonzentration aus dem Auflagerbereich entlang dem zugbelasteten Stiel besser zu verteilen.

## 2.4.2 Nachweismodell nach NIEDERMAIER

### 2.4.2.1 Konstruktion

Die konstruktive Lösung des Holz-Glas-Verbundelementes von NIEDERMAIER, P. (2002) beruht im Gegensatz zu HAMM, J. (2000) auf der Trennung der Aussteifungseinheit vom Haupttragwerk. NIEDERMAIER klebt mit elastischen Klebstoffen auf großformatige Glasscheiben schmale Holzleisten entlang der Glaskante. Damit ergibt sich die sogenannte Aussteifungseinheit. Diese wird in Folge an die Haupttragkonstruktion geschraubt. Zur Koppelung von Aussteifungseinheit und Haupttragkonstruktion wird an die Stiele und Schwellen ein Aluminium-T-Profil geschraubt, welches zur Aufnahme der Aussteifungseinheit dient. Diese Konstruktionsweise wird im Holz-Glas-Fassaden- und Wintergartenbau angewendet.

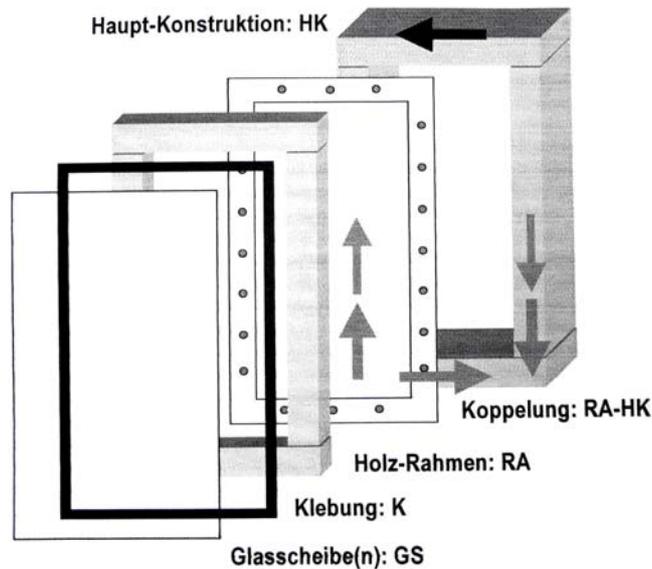


Abbildung 20: Konstruktion nach NIEDERMAIER, P. (2002)

### 2.4.2.2 Versagensmechanismus

NIEDERMAIER verwendet elastische Klebstoffe. Somit wird eine geringere Gesamtsteifigkeit der Konstruktion in Kauf genommen wodurch als Versagenskriterium hierbei die Gebrauchstauglichkeit als maßgebend auftritt. Hinsichtlich Schubsteifigkeit und Tragfähigkeit zeigte der verwendete Klebstoff, dass die maximal zulässige Verformung der gesamten Aussteifungskonstruktion noch im ideal elastischen Bereich erreicht wird. Damit wird, in Abhängigkeit des Elementformates, die Glasbruchwahrscheinlichkeit erheblich verringert. Durch die Elastizität des Klebstoffes wird die Zugspannungskonzentration im Glas im Bereich der Zugverankerung besser verteilt.

### 2.4.2.3 Nachweisführung

Als Versagenskriterium für diesen elastisch verklebten HGV-Elementtyp definiert NIEDERMAIER die Gebrauchstauglichkeit mit einer zulässigen Verschiebung der Kopfschwelle von  $h/500$ stel nach DIN 1052.

Zur Ermittlung der maximal zulässigen Horizontalkraft  $F_{H,max}$  wird eine Ersatz-Gesamtfedersteifigkeit als Summe aus Einzelfedersteifigkeiten der Systemkomponenten angesetzt.

$$F_{H,max} = \frac{u_{zul}}{\sum \frac{1}{C_{jj}}} \quad (2)$$

mit

$F_{H,max}$  maximal zulässigen Horizontalkraft

$u_{zul}$  maximal zulässige Verschiebung

und  $C_{jj}$  als

$C_{AE}^*$  Federsteifigkeit der Aussteifungseinheit

Als Komponenten der Aussteifungseinheit gelten hierbei die Glassteifigkeit  $C^*_{GS}$ , die Steifigkeit der Klebefuge  $C^{\circ}_{AE}$  und die Steifigkeit der Eckausbildung der Koppelrahmen- und Hauptkonstruktionsstöße  $C^*_{E:KR, HK}$ . Es besteht auch die Möglichkeit eine gebrochene Glasscheibe, je nach Bruchgrad, als abgeminderte Glassteifigkeit  $C^*_{GS}$  anzusetzen.

- $C^*_{SB}$  Federsteifigkeit der Stabglieder zufolge Schubbiegung  
Es wird der Einfluss der Biegesteifigkeit der Koppelrahmen- und Hauptkonstruktionsstäbe beschrieben.
- $C^*_{VB}$  Federsteifigkeit der Verbindungsmittlebene  
Die Verbindungsmittlebene wird als Funktion der Materialeigenschaften, Anzahl und Verteilung der Verbindungsmittel angegeben.

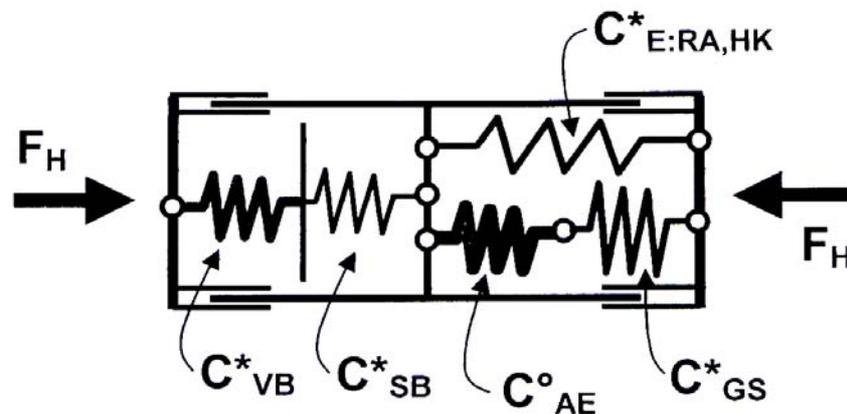


Abbildung 21: Ersatzfedermodell nach NIEDERMAIER, P. (2002)

Hinsichtlich des Nachweismodells wird festgestellt:

- Das Trag- und Verformungsverhalten wird hauptsächlich durch die Materialeigenschaften des Klebstoffes beeinflusst.
- Mit größer werdendem Versatzmoment  $M = F_{H, \max} \cdot h$  nimmt der Einfluss der Biegesteifigkeit der Stabglieder zu.
- Die Berechnungsansätze sollen auf den linear elastischen Bereich beschränkt bleiben.
- Das Glasscheibeneigengewicht soll durch die Hauptkonstruktion mechanisch abgetragen werden.
- Horizontallasten zufolge Schiefstellung sind gegenüber  $F_{H, \text{zul}}$  additiv zu berücksichtigen.
- Der Versatz der Wirkungsebene der Aussteifungseinheit zur Ebene der Hauptkonstruktion wird nicht berücksichtigt. Diese Exzentrizität verursacht insbesondere in den Eckbereichen der Aussteifungseinheit Zug- bzw. Druckspannungen senkrecht auf die Klebefuge.
- Einflüsse aus konstruktionsbedingten Gegebenheiten wurden im Berechnungsmodell für entbehrlich gehalten.

### **3 Geeignete Klebstoffe für den Holz-Glas-Verbund**

Die Grundlagen zur Verklebung von Holz und Glas wurden in einigen Forschungsarbeiten bereits behandelt. So wurden durch HAMM, J. (2000) Versuche an Druckscherproben durchgeführt. Es wurden PU- und Epoxidharz-Klebstoffe durch Temperatur- und Feuchtezyklen belastet und deren Verformungs- und Bruchverhalten analysiert.

Durch NIEDERMAIER, P. (2002) wurden in mehreren Versuchsreihen das Verhalten von Holz-Glas-Verklebungen mit PU- und Silikon-Klebstoffen untersucht. Es wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Holzarten und Oberflächen, der Einfluss von verschiedenen Fugengeometrien und das Zeitstandverhalten der Klebstoffe beschrieben. Bei weiteren Versuchsreihen wurde auch das Bruchlastverhalten bei verschiedenen Temperaturen dargestellt.

Aufbauend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen aus obigen Arbeiten wurde die Notwendigkeit erkannt den Einfluss von dünnen Klebefugen ( $< 5$  mm) zu erfassen und die Verarbeitbarkeit der unterschiedlichen Klebstoffsysteme zu analysieren. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in die Konstruktionsentwicklung einfließen. Die dazu notwendigen Versuchsreihen werden elastische und semi-elastische Klebstofftypen berücksichtigen.

#### **3.1 Vorgehensweise**

Zunächst erfolgte eine Vorauswahl in Frage kommender Klebstoffe durch Recherchen bei Klebstoffherstellern und auf Basis der Erkenntnisse aus vorangegangenen Projekten. Nach der Festlegung der Versuchsreihen wurden die Geometrie und das Herstellungsprozedere der Kleinproben bestimmt. Die projektierten Versuchsreihen lassen sich in die beiden Kategorien „Bruchversuche“ und „Klimabelastungsversuche“ gliedern.

Die Reihe „Bruchversuche“ soll als Hauptuntersuchungsreihe wesentliche Erkenntnisse über den Herstellungsprozess (Verarbeitung der Klebstoffe), die mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Verformungsverhalten) und das Bruchverhalten (Bruchbild) liefern. Diese Erkenntnisse sollen als Basis für das Erarbeiten von Konstruktionslösungen für den Projektschritt „Analyse von Konstruktionssystemen“ dienen.

An Hand der „Klimabelastungsversuche“ sollen Erkenntnisse zum Prozessablauf für künstliches Altern von Klebefugen gewonnen werden. Im Rahmen dieser Prozessuntersuchung sollen des weiteren Vergleiche zwischen den mechanischen

Eigenschaften und dem Bruchverhalten der gegenständlichen Klebstoffe als Anhaltspunkt für deren Eignung geführt werden.

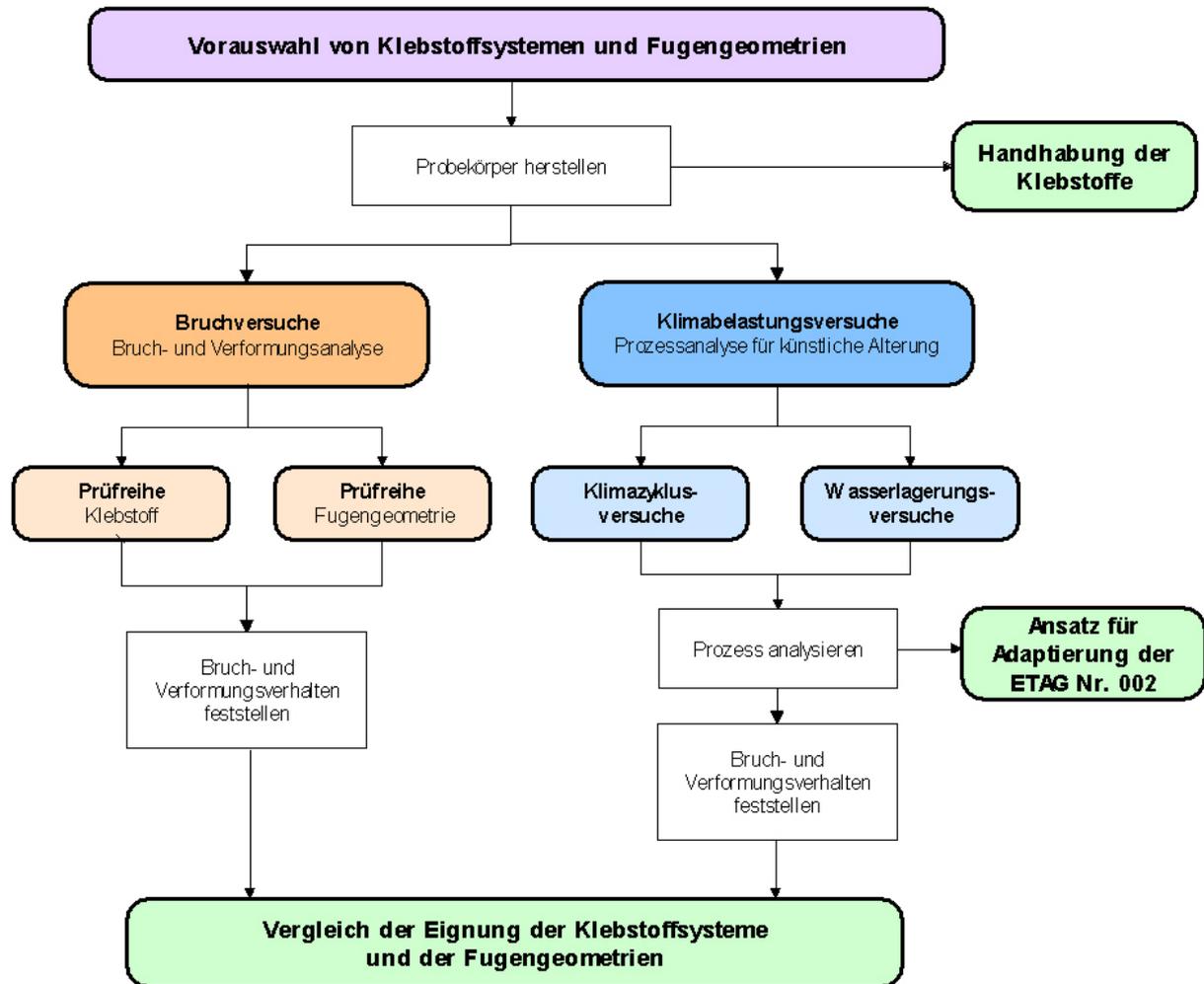


Abbildung 22: Ablauf des Projektschrittes „Geeignete Klebstoffe für die statisch wirksame Verklebung von Holz und Glas“

Durch direkten Vergleich der ermittelten Kenndaten der Klebstoffsysteme und der verwendeten Fugengeometrien wird jeweils eine quantitative Aussage über die Eignung des entsprechenden Klebstoffes formuliert. Mit diesen Feststellungen kann die Basis für den zweiten Projektteil „Analyse von Konstruktionssystemen“ geschaffen werden, da der Klebstofftyp umfassenden Einfluss auf die jeweilige Konstruktionslösung haben wird.

Die Ergebnisse aus der Prozessuntersuchung der „Klimabelastungsversuche“ könnten gegebenenfalls als erster Ansatz für eine Erweiterung der ETAG Nr. 002 (1998) um ein Versuchsverfahren zur Simulation des Alterungsprozesses von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen dienen. Dadurch soll Holz in Zulassungsverfahren von Klebstoffen für statisch wirksame Verklebungen berücksichtigt werden.

### 3.2 Vorauswahl der Klebstoffe

Bei der Vorauswahl geeigneter Klebstoffe musste eine grundsätzliche Entscheidung zur Steifigkeit anzuwendender Klebstoffe getroffen werden. Bei der Frage, ob nun steifere oder elastischere Klebstoffe besser für ein Holz-Glas-Verbundelement geeignet seien teilen sich

die Expertenmeinungen. Reduziert man die Anforderung an die Aussteifungselemente auf rein statische und mechanische Eigenschaften, so mögen die steiferen Klebstoffe Vorteile bei der Lastübertragung und dem Verformungsverhalten bringen. Betrachtet man die Möglichkeit örtliche Spannungsspitzen zu verteilen und Eigenspannungszustände aus Zwängungen abzubauen bieten elastischere Klebstoffe wesentliche Vorteile. Es wurde entschieden, elastische und semi-elastische Klebstoffe in den Versuchsreihen zu berücksichtigen. Folgende Klebstofftypen wurden ausgewählt:

- **Klebstoffe auf Silikonbasis**

Silikone sind höhermolekulare Verbindungen, denen ein alternierend aus Silizium- und Sauerstoffatomen aufgebautes dreidimensionales Gerüst zu Grunde liegt. Für Klebstoffsysteme werden Präpolymere (Vorstadium zu einem richtigen Polymer) eingesetzt, deren Kettenenden durch funktionelle Gruppen so gestaltet sind, dass sie unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit (1K Systeme) oder nach Zugabe eines Härters (2K-Systeme) zu einem hochmolekularen Polymer vernetzen.

- **Klebstoffe auf Polyurethanbasis**

Grundlage für diese Systeme sind Polyether oder Polyester, wobei Polyurethan (PUR) als Präpolymer zur Anwendung kommt. Ihre besondere Eigenschaft ist das Festwerden bei Raumtemperatur und das Reagieren auf Feuchtigkeit.

- **Klebstoffe auf Acrylatbasis**

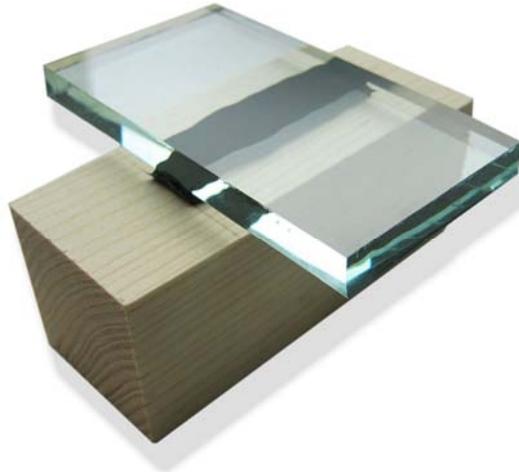
Sie basieren auf polymerisierten Acrylestermonomeren, oft auch mit Kunstharzbeimischungen.

### 3.3 Herstellung der Probekörper

In Anlehnung an die ETAG Nr. 002 und an die Erkenntnisse aus NIEDERMAIER, P. (2002) wurden die Probekörper derart konzipiert, dass sowohl Zug- als auch Schubversuche quer und längs zur Klebefuge mit einer Probengeometrie durchgeführt werden können.

Um die unterschiedliche Einflussnahme von vorherrschenden Umweltbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchte, Luftreinheit, etc. gering zu halten, wurden alle Proben aus einer Charge direkt nacheinander hergestellt. Für jede Probencharge wurde jeweils eine Klebstoffkartusche verwendet. Die Herstellung aller Proben aus einer Charge erfolgte ohne Unterbrechung. Im Anschluss wurden alle Proben 28 Tage bei einer Temperatur von 23°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% konditioniert.

Die Klebstoffe wurden entweder mit Hand- oder Druckluft-Kartuschenpressen appliziert. Einkomponentenklebstoffe wurden direkt aufgetragen, Zweikomponentenklebstoffe wurden in den jeweils dafür vorgesehenen „Statik-Mischdüsen“ vermengt.



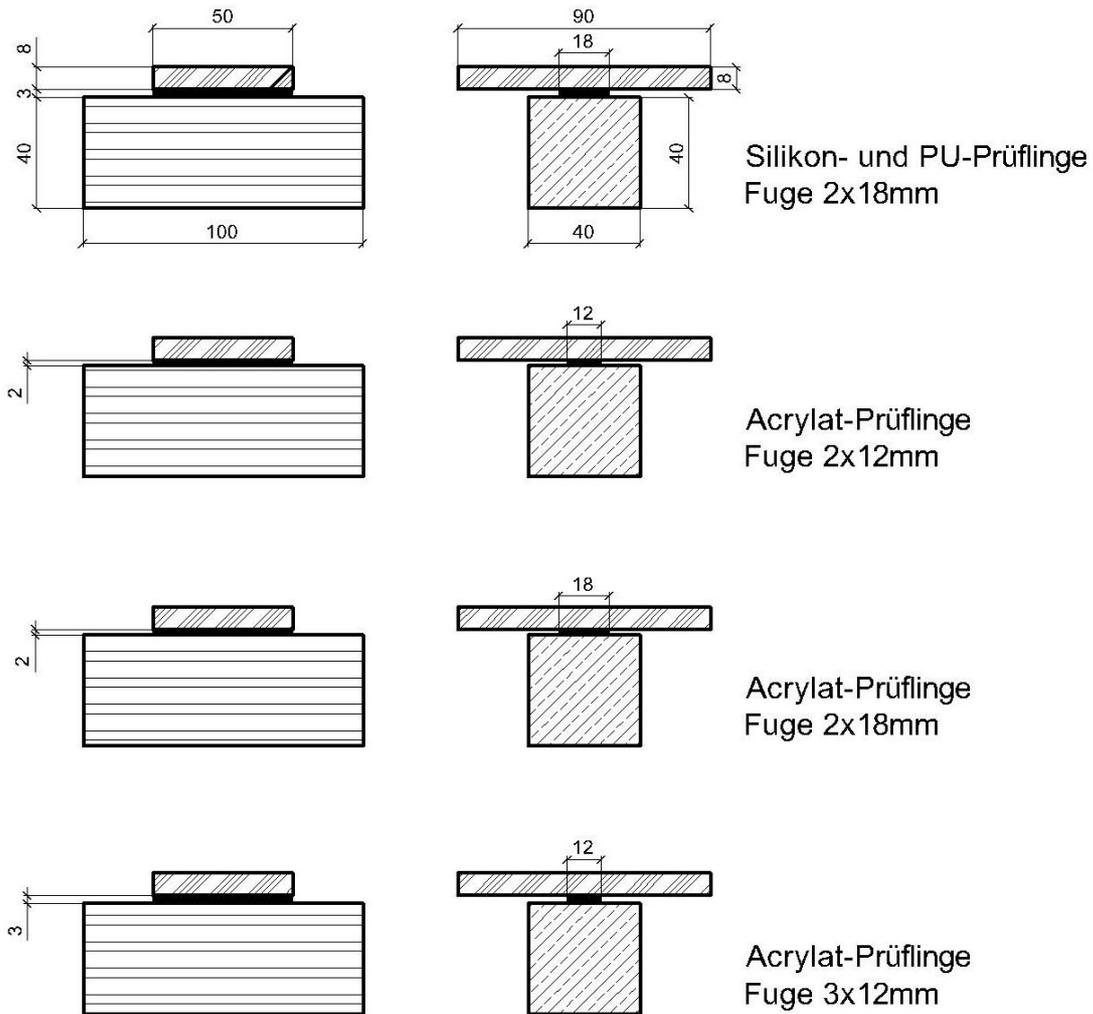
**Abbildung 23: Probekörper für die Bruchversuche und Klimabelastungsversuche**

### **3.3.1 Geometrie**

Die ETAG Nr. 002 geht bei der Festlegung der Probekörpergeometrie von der Verwendung von „Structural Sealant Glazing Silikonen“ aus. In Anbetracht derer Konsistenz bei der Verarbeitung und deren Aushärtungsverhalten erscheinen die Abmessungen der ETAG-Prüfkörper, insbesondere der Klebefugenquerschnitt von 12 x 12 mm, als geeignet. Im vorliegenden Projekt wurden allerdings zum Teil wesentlich viskosere Klebstoffe verwendet, welche auch nur für Klebefugendicken bis maximal 3 mm vorgesehen wären.

Bei Untersuchungen aus NIEDERMAIER, P. (2002) wurden die Klebefugen (Silikon- und PU-Klebstoffe) teilweise auf eine Dicke von 6 mm reduziert. Die Tendenz zu steiferem Verformungsverhalten bei akzeptablen Einflüssen auf die Festigkeit konnte abgelesen werden. Diese Erkenntnis wurde aufgegriffen und es wurde entschieden, die Klebefugendicke für alle hier verwendeten Klebstoffe auf 3 mm zu reduzieren. Je nach Art des Klebstoffes kann es jedoch bei derart dünnen Fugen zu langen Aushärtungszeiten, im speziellen bei Einkomponentenklebstoffe, die mit der Feuchtigkeit aus der Luft aushärten, kommen. Die schmale Seitenfläche der Klebefuge ist dabei auf Grund der geringen Fugendicke zu klein, um einen ausreichenden Transport der Luftfeuchtigkeit durch Diffusion in das Fugeninnere zu ermöglichen. Es bildet sich rasch eine Haut auf der Klebefugenseitenfläche, die den Erhärtungsprozess verzögert. Sind die Klebefugen nicht nur dünn sondern auch breit, so wird die Durchhärtung zusätzlich erschwert, bzw. deren Dauer verlängert. In Anbetracht des vorliegenden Anwendungsfalles ist das Durchhärtevermögen des Klebstoffes jedenfalls von großer Bedeutung, da der Ansatz gilt, je breiter und dünner eine Klebefuge, desto steifer ihr Verformungsverhalten.

Für die Bruchlastversuche wurde für Silikon- und PU-Klebstoffe ein Klebefugenquerschnitt von 3 x 18 mm festgelegt. Der untersuchte Acrylatklebstoff wurde mit drei verschiedenen Formaten getestet, 2 x 12 mm, 2 x 18 mm und 3 x 12 mm. Anhand dieser Zusammenstellung sollte der Einfluss der Klebefugegeometrie auf das Verformungsverhalten besser erfasst werden.



**Abbildung 24: Geometrie der Probekörper**

Auf Grund der dünnen Klebefugen war es nicht möglich, die Proben nach dem Vorbild der ETAG Nr. 002 zu gestalten. Ein Eingreifen von Halteklammern der Zugprüfvorrichtung in den 2 bis 3mm Spalt zwischen Glas und Holz wurde nicht erwogen. Durch kreuzweises Verkleben von Holz und Glas wird jedoch eine einfache Einspannungsmöglichkeit bei Zugversuchen bewerkstelligt.

### 3.3.2 Holz

Für sämtliche Prüfkörper wurde sortiertes Fichtenholz verwendet. Die Holzfeuchtigkeit betrug bei allen Substraten zwischen 10 und 12 %. Die Sortierung erfolgte derart, dass kein Substrat Fehlstellen, Äste oder Unregelmäßigkeiten aufwies. Die Orientierung der Jahrringe betrug durchwegs 30 bis 60° zur Klebefläche.

Abmessung der Holzsubstrate: 40 x 40 x 100 mm

**Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften von Fichte**

Werkstoff	$\sigma_{Z  }$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Z\perp}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_B$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{D  }$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{  }$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{\perp}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Fichte	90	2,7	78	50	6,7	11000	300

### 3.3.3 Glas

Als Glassubstrat wurden 6mm dicke Floatglasscheiben verwendet. Die Kanten wurden nicht geschliffen.

Abmessung der Glassubstrate: 50 x 6 x 90 mm

**Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften von Glas**

Werkstoff	$\sigma_Z$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_B$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\mu$	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Floatglas	25	700-900	45	0,23	70000

Die mechanischen Eigenschaften von Glas werden in der Literatur teilweise unterschiedlich angegeben. In Tabelle 2 sind gebräuchliche Werte angeführt.

### 3.3.4 Klebstoffe

Es wurden Klebstoffe der Firmen SIKA und OTTOCHEMIE eingesetzt. In Folge sind die wichtigsten Eigenschaften der Klebstoffe zusammengefasst. Bei den Angaben handelt es sich um Kenndaten aus Produktdatenblättern der Hersteller.

#### 3.3.4.1 Klebstoff auf Silikonbasis

- **SIKA – ELASTOSIL® SG-500**

Kondensationsvernetzender Zweikomponenten-Silikonkautschuk

Die Vulkanisation zu einem Elastomer erfolgt bei Raumtemperatur nach Vermengen der Grundkomponente mit dem Härter.

**Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften von SIKA – ELASTOSIL® SG-500**

<b>Verarbeitungstemperatur</b>	+5 bis +40°C
<b>Offene Zeit</b>	70 Minuten
<b>Temperaturbeständigkeit</b>	-40 bis +150°C
<b>UV-Beständigkeit</b>	sehr gut
<b>Feuchtebeständigkeit</b>	sehr gut
<b>Zugfestigkeit ISO 8339</b>	0,95 N/mm <sup>2</sup>
<b>E-Modul (ε=25%) ISO 8339</b>	0,5 N/mm <sup>2</sup>
<b>E-Modul (ε=100%) ISO 8339</b>	0,95 N/mm <sup>2</sup>

- **OTTOCHEMIE – NOVASIL® S 42 SP 5322**

Kondensationsvernetzender Zweikomponenten-Silikonkautschuk

Die Vulkanisation zu einem Elastomer erfolgt bei Raumtemperatur nach Vermengen der Grundkomponente mit dem Härter.

**Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften von OTTOCHEMIE – NOVASIL® S 42 SP 5322**

<b>Verarbeitungstemperatur</b>	+5 bis +40°C
<b>Offene Zeit</b>	15 Minuten
<b>Volumenschwund</b>	~ -3,5%
<b>Temperaturbeständigkeit</b>	-40 bis +180°C
<b>UV-Beständigkeit</b>	sehr gut
<b>Feuchtebeständigkeit</b>	sehr gut
<b>Zugfestigkeit ISO 8339</b>	1,0 N/mm <sup>2</sup>
<b>E-Modul (ε=100%) ISO 8339</b>	1,0 N/mm <sup>2</sup>

### 3.3.4.2 Klebstoff auf Polyurethanbasis

- **SIKA – SIKATAK® - HighModule**

Es liegen keine offiziellen Kenndaten zum Klebstoff vor.

- **OTTOCHEMIE – OTTOCOLL® P 520 VP 5581**

Zweikomponentenklebstoff auf Polyurethanbasis

Die Aushärtung erfolgt durch chemische Reaktion der beiden Komponenten.

**Tabelle 5: Mechanische Eigenschaften von OTTOCHEMIE – OTTOCOLL® P 520 VP 5581**

<b>Verarbeitungstemperatur</b>	über +5°C
<b>Offene Zeit</b>	10 Minuten
<b>UV-Beständigkeit</b>	sehr gut

- **SIKA – SIKAFORCE® – 7750 L15**

Zweikomponentenklebstoff basierend auf Polyolen (Harz) und Isocyanatderivaten (Härter)

Die Aushärtung zu einem Elastomer erfolgt nach Vermengen der beiden Komponenten.

**Tabelle 6: Mechanische Eigenschaften von SIKA – SIKAFORCE® – 7750 L15**

<b>Verarbeitungstemperatur</b>	+15 bis +30°C
<b>Offene Zeit</b>	15 Minuten
<b>Temperaturbeständigkeit</b>	-40 bis +90°C
<b>Zugfestigkeit ISO 37</b>	5,0 N/mm <sup>2</sup>
<b>Zugscherfestigkeit ISO 4587</b>	5,0 N/mm <sup>2</sup>

### 3.3.4.3 Klebstoff auf Acrylatbasis

- **SIKA – SIKAFAST® – 5215**

Zweikomponentenklebstoff basierend auf der Acrylat-Chemie

Die Polymerisation erfolgt nach Vermengen der beiden Komponenten.

Tabelle 7: Mechanische Eigenschaften von SIKA – SIKAFAST® – 5215

<b>Verarbeitungstemperatur</b>	+10 bis +40°C
<b>Offene Zeit</b>	5 Minuten
<b>Temperaturbeständigkeit</b>	-40 bis +80°C
<b>Zugfestigkeit ISO 527</b>	10,0 N/mm <sup>2</sup>
<b>Zugscherfestigkeit ISO 4587</b>	8,0 N/mm <sup>2</sup>

### 3.3.5 Applikationswerkzeuge

Je nach Dimension der Klebstoffkartuschen, ob das System ein- oder zweikomponentig ist und in welchem Verhältnis die Komponenten gemischt werden benötigt man die passende Presse zur Applikation. Zur Herstellung einer gleichmäßigen Kleberaupe ist ein konstanter Druck im Werkzeug erforderlich. Handpressen eignen sich nicht zur Herstellung von strukturellen Verklebungen.

Bei industrieller Anwendung können auch Halb- oder Vollautomaten eingesetzt werden. Der Klebstoff wird aus großen Gebinden mit konstantem Durchfluss in die Applikationsdüse gepumpt, die von Hand oder durch einen Roboter geführt wird.



Abbildung 25: Diverse Kartuschenpressen und Mischdüsen für den Hand- oder Druckluftbetrieb

### 3.3.6 Probekörperbezeichnung

Die Probekörper wurden mit einem Bezeichnungsschlüssel versehen der sich wie folgt darstellt:

**Tabelle 8: Bezeichnungsschlüssel der Probekörper (Beispiel)**

Klebstoffbasis	Charge (Typ)	lfnd. Nummer	Belastung
PU	C	56	SL

Die Belastung wird mit Z für Zug, SQ für Schub quer zur Klebefuge und SL für Schub längs zur Klebefuge angegeben (siehe Kapitel 3.4.1).

In Folge werden die Klebstoffe nicht mehr mit deren Handelsbezeichnungen angegeben. Es werden Kurzformen angeführt, die auf der Klebstoffbasis und der Charge (Klebstofftyp) basieren.

**Tabelle 9: Anzahl der Probekörper für die diversen Versuche**

	ZUG	Schub längs	Schub quer	Klima- versuche
SI A	6	4	4	3
SI B	6	2	2	3
PU A	6	4	4	3
PU A+	3	3	3	3
PU B	6	4	4	3
PU B+	3	3	3	3
PU C	6	4	4	3
AC A	6	4	4	3
AC B	6	4	4	3
AC C	6	4	4	3

SI B, PU A+ und PU B+ wurden im späteren Verlauf des Projektes der Prüfserie angeschlossen.

### 3.4 Versuchsmethodik

Die bis zum Bruch belasteten Proben wurden hinsichtlich der Art des Bruches quantitativ bewertet. Dabei wurden folgende Bruchbilder unterschieden:

- **GG** Kohäsionsbruch im Glas
- **GK** Adhäsionsbruch zwischen Glas und Klebstoff
- **KK** Kohäsionsbruch im Klebstoff
- **KH** Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holz
- **HH** Kohäsionsbruch im Holz

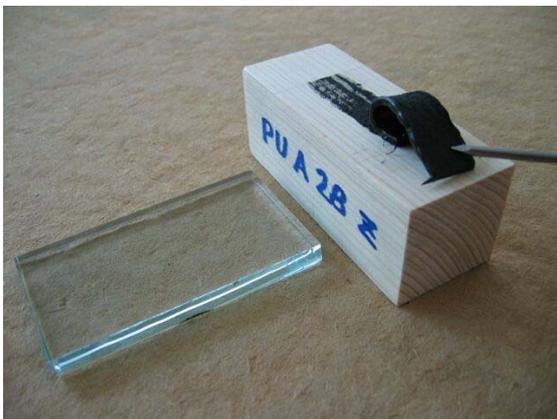
Beispiele zu den Bruchbildern sind in Abbildung 26 bis Abbildung 28 angeführt.



**Abbildung 26: Adhäsionsbruch GK**



**Abbildung 28: Mischbruch aus Adhäsionsversagen KH und Kohäsionsversagen HH**



**Abbildung 27: Mischbruch aus Adhäsionsversagen GK und KH**



**Abbildung 29: Mischbruch - hauptsächlich Kohäsionsversagen KK**

### 3.4.1 Versuchsaufbau

#### 3.4.1.1 Zugversuche Z

Bei den Zugversuchen wurden grundsätzlich mit jedem Probentyp 6 Versuche durchgeführt. Es wurde davon ausgegangen, dass die Kenndaten aus den Zugversuchsreihen die Qualität der Klebeverbindung sehr gut beschreiben können. Die höhere Probenzahl im Vergleich zu den Schubversuchen sollte also lediglich verlässlichere Werte liefern, bei akzeptablem Aufwand der Probenherstellung.

Nachteil der gewählten Einspannvariante ist, dass in der Glasscheibe Biegespannungen entstehen. Es wurde davon ausgegangen, dass die Bruchspannung des Glassubstrates nicht erreicht wird, da der Klebstoff vorher versagen müsste. Diese Annahme basierte auf der Erfahrung bisheriger Versuche und rechnerischen Abschätzungen. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Klebekraft und die Festigkeit des getesteten Acrylatklebstoffes höher war als prognostiziert. Dadurch haben etliche der Acrylatprobekörper und vereinzelt PU-Probekörper durch Glasbiegebruch versagt. Details dazu sind dem Kapitel 3.5 zu entnehmen.

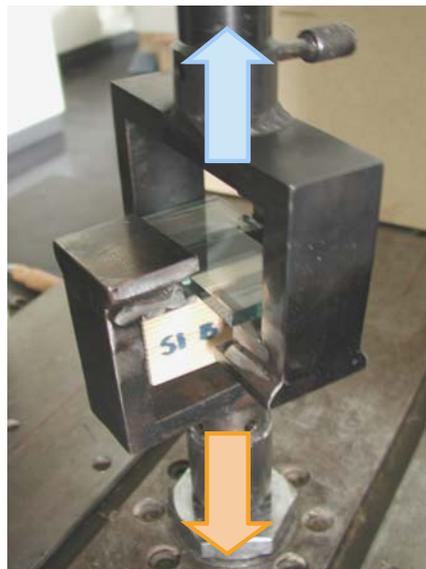


Abbildung 30: Einspannvorrichtung für die Zugversuche

#### 3.4.1.2 Schubversuche SL- längs zur Klebefuge

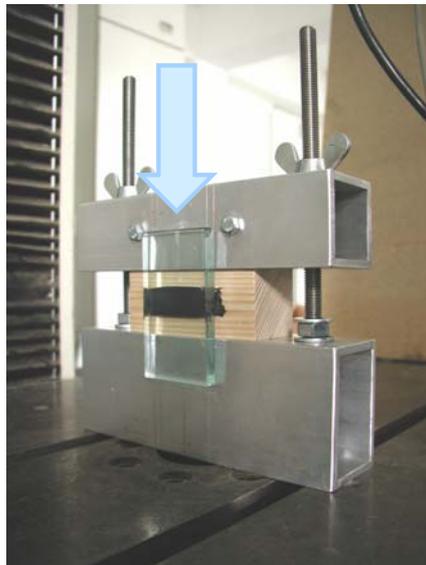
Für die Schubversuche längs zur Klebefuge wurden je drei Versuche pro Probentyp vorgesehen.



**Abbildung 31: Einspannvorrichtung für Schubversuche, parallel zur Klebefuge**

#### **3.4.1.3 Schubversuche SQ- quer zur Klebefuge**

Für die Schubversuche quer zur Klebefuge wurden je drei Versuche pro Probentyp vorgesehen.



**Abbildung 32: Einspannvorrichtung für Schubversuche, quer zur Klebefuge**

#### **3.4.1.4 Komplikationen bei der Versuchsdurchführung**

- **PU A und PU B**

Bei den Klebstoffen PU A und PU B wurden zusätzliche Versuche durchgeführt (PU A+ und PU B+), da es in der ursprünglichen Probenserie dieser Klebstoffe zu einem Fehler im Herstellungsprozess kam und dadurch Haftungsprobleme an der

Glasoberfläche auftraten. Dieser Umstand war durch ausgeprägtes Adhäsionsversagen bei den Belastungsversuchen erkennbar. Bei den ergänzend ausgeführten Probenserien (PU A+ und PU B+) trat dieses Problem nicht mehr auf.

- **AC A, B, C**

Wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben kam es bei Acrylatproben und vereinzelt PU-Proben zu vorzeitigem Glasbiegebrüchen. Auch hier kann man diese Bruchlast nicht als Versagen des Klebstoffes werten. Das Verformungsverhalten im elastischen Bereich ist für die Auswertung verwendbar.



**Abbildung 33: Unerwünschter Biegebruch im Glas**

Für alle Klebstoffe gilt, dass für die Auswertung der Versuchsergebnisse die Steifigkeit der Verklebungen von primärem Interesse war. Es wurde also entschieden, die Proben PU A und PU B im Vergleich mit den ergänzenden Proben PU A+ und PU B+, sowie die Versuche mit AC trotz der oben beschriebenen Probleme in der Auswertung zu berücksichtigen. Die Bruchfestigkeiten sollten dabei allerdings nur ergänzende Erkenntnisse liefern.

### **3.4.2 Bruchlastversuche**

Die Bruchlastversuche gliedern sich in die Versuchsreihen „Klebstoff“ und „Fugengeometrie“. Bei beiden Reihen wurden mit jedem Klebstofftyp bzw. bei jeder Fugenquerschnittsgeometrie Zugversuche (Z), Schubversuche längs der Klebefuge (SL) und Schubversuche quer zur Klebefuge (SQ) durchgeführt. Die Belastung der Probekörper erfolgte jeweils bis zum Bruch. Es wurde für alle Versuche eine Vorschubgeschwindigkeit von 5,0 mm/min gewählt. Die Versuche erfolgten mit speziellen Einspannvorrichtungen an einer Zug-/Druckprüfmaschine mit Spindelantrieb, Genauigkeitsklasse 1.

#### **3.4.2.1 Versuchsreihe „Klebstoff“**

Es wurden alle Klebstoffe aus der Vorauswahl in dieser Versuchsreihe getestet. Der Klebefugenquerschnitt wurde bei allen Proben mit ~16 x 3 mm ausgeführt. Es wurden je Klebstoff fünf Zugversuche, drei Schubversuche längs und drei Schubversuche quer zur Klebefuge durchgeführt.

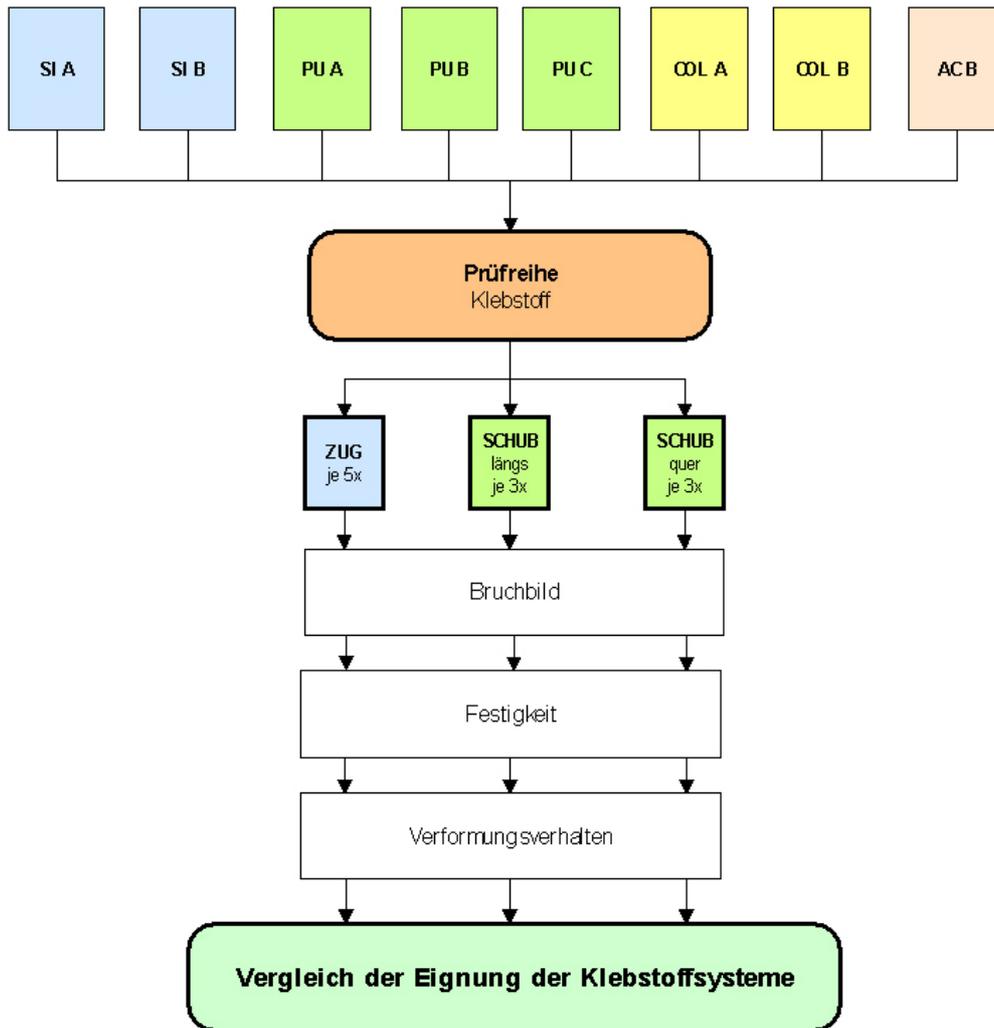


Abbildung 34: Ablauf der Versuchsreihe KLEBSTOFF

### 3.4.2.2 Versuchsreihe „Fugengeometrie“

Durch NIEDERMAIER, P. (2002) wurde bereits auf die Auswirkung unterschiedlicher Fugengeometrien bei elastischen Klebstoffen eingegangen. In der hier vorliegenden Klebstoffauswahl wird zusätzlich als Vertreter der etwas steiferen Klebstoffsysteme (i.F. semi-elastisch genannt) ein Acrylatklebstoff untersucht. Da seine Konsistenz deutlich viskoser ist und das Aushärteverhalten sowie die mechanischen Eigenschaften anders sind als bei Silikon- und PU-Klebstoffen, empfiehlt der Hersteller eine Klebefugendicke von etwa 2 mm. Der Klebstoff zeigt in ausgehärtetem Zustand ein recht steifes Verhalten. Für den vorliegenden Anwendungsfall ist jedoch ein zu steifes Verhalten unter Umständen nicht zielführend. Erhöht man die Dicke der Klebefuge und / oder verringert man deren Breite so wird das Verformungsverhalten elastischer. Wie sich diese Effekte bei semi-elastischen Klebstoffen auswirken soll in der Versuchsreihe „Fugengeometrie“ untersucht werden.

Zu diesem Zweck werden Kleinproben mit Fugenquerschnitten von 2 x 12 mm, 2 x 18 mm und 3 x 12 mm hergestellt und untersucht.

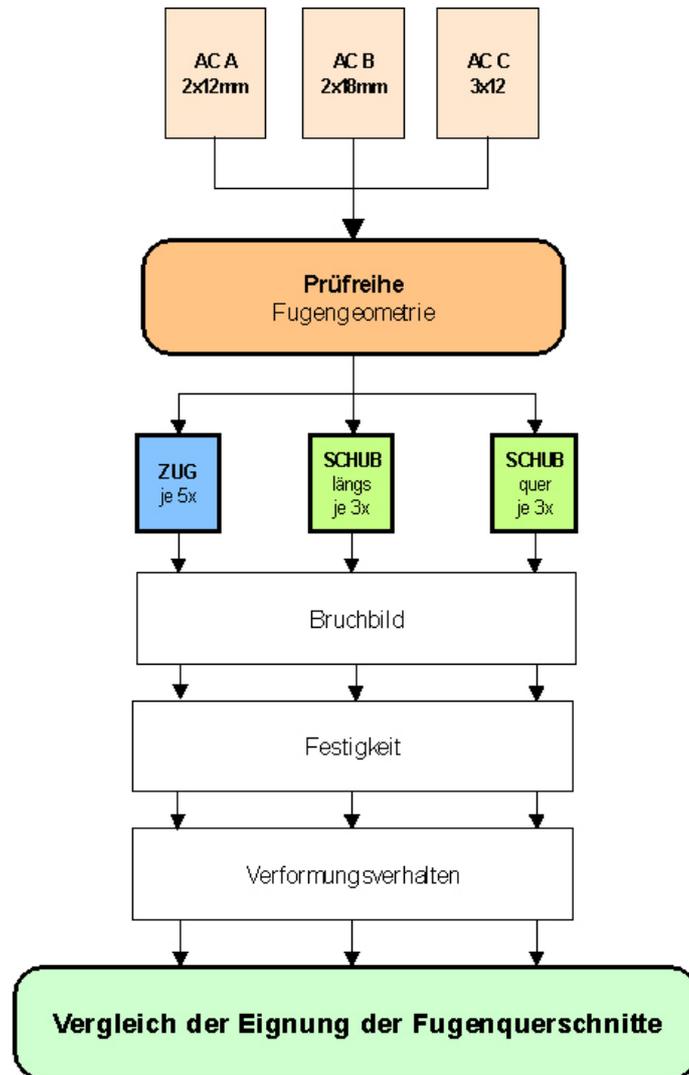


Abbildung 35: Ablauf der Versuchsreihe FUGENGEOMETRIE

### 3.4.3 Klimabelastungsversuche

Mit jedem Klebstoff wird eine Charge von Kleinproben hergestellt. Diese werden nach einer Lagerung von 28 Tagen bei einer Temperatur von 23°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% konditioniert. Die Charge wird aufgeteilt in eine Referenzprobe, eine Klimazyklusprobe und eine Wasserlagerungsprobe. Die Referenzprobe wurde direkt nach der Konditionierung einem Zugversuch bis zum Bruch unterzogen. Die Klimazyklusprobe und die Wasserlagerungsprobe werden nach den jeweiligen Versuchsdurchläufen ebenfalls in einem Zugversuch bis zum Bruch belastet. Der abschließende Vergleich der Versuchsergebnisse ergibt Aufschlüsse über die Auswirkung der Klimazyklen und der Wasserlagerung auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Verklebung. Für den vorliegenden Anwendungsfall werden die E-Module der Proben gegenübergestellt. Diese werden aus der Steigung des linear elastischen Bereiches (von 0% bis 50% der elastischen Maximalkraft der Referenzprobe) ermittelt. Ein Vergleich mit E-Modul-Werten von Klebstoffen nach Normprüfungen kann jedoch nicht erfolgen, da sich Prüfkörper und -methodik wesentlich von den Normprüfungen unterscheiden. Eine Darstellung des Steifigkeitsverhaltens unter Klimabelastungen und ein Vergleich der Klebstoffe untereinander sind möglich.

### 3.4.3.1 Klimazyklusversuche

Jede Probe wird fünf Klimawechsel-Zyklen ausgesetzt. Nach jedem Zyklus wird die Probe derart einer Zugbelastung ausgesetzt, dass die aufgebrachte Last im linear elastischen Bereich der Verklebung liegt. Nach dem letzten Zyklus erfolgt ein Zugversuch bis zum Bruch. Die hier ermittelten Verformungskurven können untereinander und mit der Referenzprobenverformungskurve verglichen werden. Steifigkeitsänderungen durch die klimatischen Zyklusbelastungen können erkannt und diskutiert werden.

#### Klimawechsel-Zyklus:

- 4 Stunden bei 70° C
- 4 Stunden bei -20°C
- 16 Stunden bei 30°C und 80% RF

### 3.4.3.2 Wasserlagerungsversuche

Bei den Wasserlagerungsversuchen werden die Proben in einem Wasserbad gelagert, wobei die Dauer und Temperatur der Lagerung variiert. Nach einer abschließenden Aklimatisierung der Proben werden Zugversuche bis zum Bruch durchgeführt. Die dabei ermittelten Verformungskurven können mit der Referenzprobenverformungskurve verglichen werden. Steifigkeitsänderungen durch die Wasserbadlagerung können erkannt und diskutiert werden.

#### Wasserbadlagerung:

- 3 Stunden bei 20°C
- 3 Stunden bei 60°C
- 18 Stunden bei 20°C
- Entnahme aus dem Wasserbad
- 72 Stunden bei Normalklima 23°C und 50% relativer Luftfeuchtigkeit

## 3.5 Ergebnisse

### 3.5.1 Bruchlastversuche

#### 3.5.1.1 Silikon-Klebstoff

- **Zug**

Bei 6 getesteten Proben trat bei jeder Probe Kohäsionsbruch im Klebstoff auf. Die Bruchdehnungen liegen bei allen Proben sehr knapp beieinander. Das Bruchverhalten ist sehr gut reproduzierbar. Leichte Schwankungen der Fugenbreite hatten keinen Einfluss auf die Bruchdehnung.

Klebstofffuge 16 x 3 mm    6 Proben

- Ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
- Aufgenommene Zugspannung 1,0 bis 1,2 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 83 bis 92%

• **Schub längs**

Klebstofffuge 16 x 3 mm    4 Proben

- Ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
- Aufgenommene Schubspannungen 0,8 bis 1,0 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 115 bis 182%

• **Schub quer**

Klebstofffuge 16 x 3 mm    4 Proben

- Ausschließlich Kohäsionsbrüche im Klebstoff
- Aufgenommene Schubspannungen 0,8 bis 0,9 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 142 bis 182%

**3.5.1.2 PU-Klebstoff**

• **Zug**

Bei den Klebstoffen PU A und PU B trat in der ersten Probencharge ausschließlich Adhäsionsbruch auf. Dies war auf einen Herstellungsfehler zurückzuführen, weshalb eine zweite Probencharge produziert wurde. Bei dieser zweiten Probencharge sind vereinzelt Biegebrüche im Glassubstrat aufgetreten, was auf höhere Bruchlasten bei Adaptierung der Probengeometrie schließen lässt.

PU A Klebstofffuge 16 x 3 mm    (6) 3 Proben

- Biegebruch im Glas
- Aufgenommene Zugspannung 1,8 bis 2,3 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 42 bis 137%

PU B Klebstofffuge 16 x 3 mm    (6) 3 Proben

- Entweder Biegebruch im Glas oder Adhäsionsbruch Holz/Klebstoff
- Aufgenommene Zugspannung 1,6 bis 2,0 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 54 bis 68%

PU C Klebstofffuge 16 x 3 mm    6 Proben

- Entweder Biegebruch im Glas oder Adhäsionsbruch Holz/Klebstoff

- Aufgenommene Zugspannung 0,7 bis 2,1 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 43 bis 57%

- **Schub längs**

PU A Klebstofffuge 16 x 3 mm (4) 3 Proben

- Adhäsionsbruch Holz/Klebstoff
- Aufgenommene Schubspannungen 3,7 bis 4,2 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 236 bis 247%

PU B Klebstofffuge 16 x 3 mm (4) 3 Proben

- Adhäsionsbruch Holz/Klebstoff
- Aufgenommene Schubspannungen 0,7 bis 1,5 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 89 bis 114%

PU C Klebstofffuge 16 x 3 mm 4 Proben

- Adhäsionsbruch Holz/Klebstoff
- Aufgenommene Schubspannungen 1,5 bis 2,2 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 41 bis 51%

- **Schub quer**

PU A Klebstofffuge 16 x 3 mm (4) 3 Proben

- Adhäsionsbruch Holz/Klebstoff mit größeren Anteilen von Kohäsionsbrüchen im Holz
- Aufgenommene Schubspannungen 2,0 bis 2,4 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 152 bis 167%

PU B Klebstofffuge 16 x 3 mm (4) 3 Proben

- Adhäsionsbruch Holz/Klebstoff mit geringen Anteilen von Kohäsionsbrüchen im Holz
- Aufgenommene Schubspannungen 1,9 bis 2,0 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 98 bis 125%

PU C Klebstofffuge 16 x 3 mm 4 Proben

- Adhäsionsbruch Holz/Klebstoff
- Aufgenommene Schubspannungen 1,4 bis 2,3 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 39 bis 60%

### 3.5.1.3 Acrylat-Klebstoff

- **Zug**

Von 18 getesteten Proben trat bei 16 Proben Glasbiegebruch auf. Die Möglichkeit dieses Bruchverhaltens wurde vorab abgewogen. Zu dessen Vermeidung wurden extra stärkere Glasscheiben verwendet (8mm statt 6mm) und die Prüfvorrichtung speziell angepasst. Die Klebstofffestigkeit war allerdings derart hoch, dass trotzdem fast ausschließlich Biegebrüche im Glas auftraten.

Klebstofffuge 12 x 2 mm     6 Proben

- Glasbiegebruch
- Aufgenommene Zugspannung 2,2 bis 2,8 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 23 bis 49%

Klebstofffuge 12 x 3 mm     6 Proben

- Glasbiegebruch, 1x Adhäsionsbruch Klebstoff/Glas
- Aufgenommene Zugspannung 2,1 bis 3,0 N/mm<sup>2</sup>, der Adhäsionsbruch hielt 5,0 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 19 bis 97%

Klebstofffuge 18 x 2 mm     6 Proben

- Glasbiegebruch, 1x Adhäsionsbruch Klebstoff/Glas
- Aufgenommene Zugspannung 1,5 bis 3,7 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 40 bis 60%

- **Schub längs**

Klebstofffuge 12 x 2 mm     4 Proben

- Hauptsächlich Adhäsionsbrüche Klebstoff/Holz
- Aufgenommene Schubspannungen 5,2 bis 7,5 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 79 bis 182%

Klebstofffuge 12 x 3 mm     4 Proben

- Hauptsächlich Adhäsionsbrüche Klebstoff/Holz, aber signifikanter Anteil an Adhäsionsbrüchen Glas/Klebstoff (weil dickere Fuge)
- Aufgenommene Schubspannungen 5,3 bis 6,1 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 91 bis 115%

Klebstofffuge 18 x 2 mm     4 Proben

- Hauptsächlich Adhäsionsbrüche Klebstoff/Holz
- Aufgenommene Schubspannungen 4,9 bis 5,9 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 77 bis 126%

- **Schub quer**

Je dicker die Klebefuge, desto stärker zeigt sich die Tendenz zu Adhäsionsbrüchen Klebstoff/Glas. Der aufnehmbare Schub ist vereinfachend gesagt direkt von der Fugenbreite abhängig. Die Bruchdehnung steigt mit breiter werdender Fuge. Grund ist nicht die Klebstoffverformung, sondern eher Quersugbrüche im Holz – Risse (Spalten) parallel zur Faser entlang der Jahrringe. Als Folge können bei ungünstiger Jahrringlage tiefe Kohäsionsbrüche im Holz entstehen.

Klebstofffuge 12 x 2 mm     4 Proben

- Hauptsächlich Adhäsionsbrüche Klebstoff Holz mit größerem Kohäsionsbruchanteil Holz als bei Schub längs
- Aufgenommene Schubspannungen 3,9 bis 4,3 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 82 bis 104%

Klebstofffuge 12 x 3 mm     4 Proben

- Unterschiedliche Bruchmechanismen, keine Charakteristik erkennbar- Adhäsionsbrüche Klebstoff/Holz und Klebstoff/Glas sowie Kohäsionsbruch Holz
- Aufgenommene Schubspannungen 3,1 bis 4,3 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 41 bis 102%

Klebstofffuge 18 x 2 mm     4 Proben

- Bruchtyp zu gleichen Teilen Adhäsionsbrüche Klebstoff Holz und Kohäsionsbruch Holz
- Aufgenommene Schubspannungen 3,7 bis 5,7 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung 71 bis 135%

### 3.5.2 Klimabelastungsversuche

#### 3.5.2.1 Klimazyklusversuche

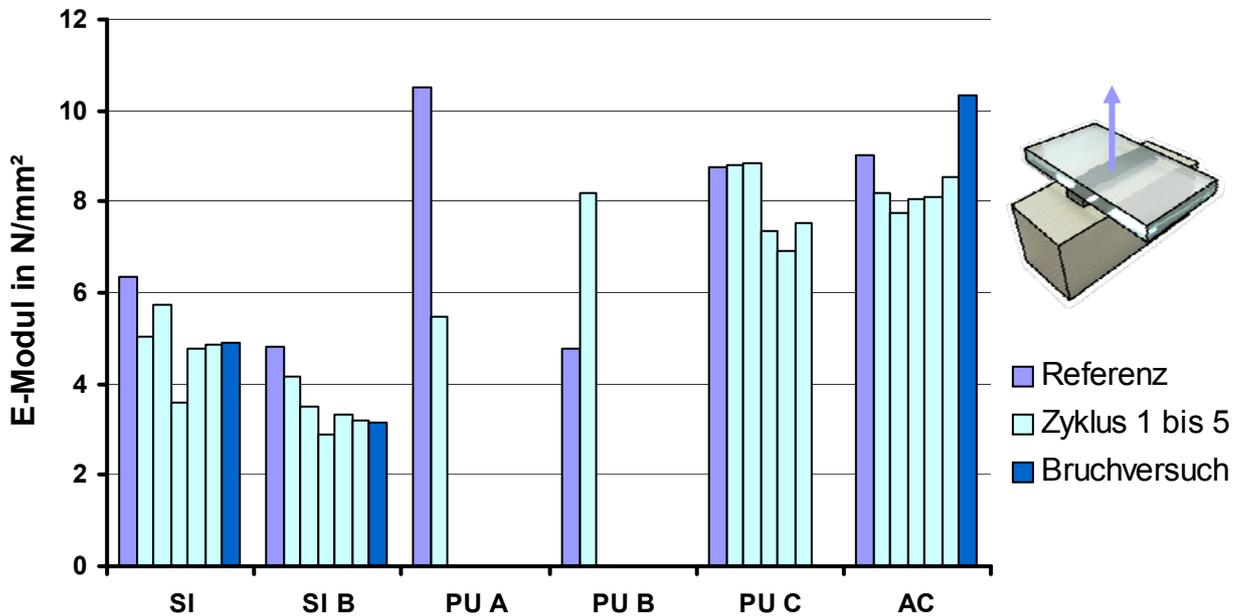


Abbildung 36: E-Modul im Verlauf der Klimawechsel-Zyklen verschiedener Klebstoffe

Die Belastung zur Ermittlung des Verformungsverhaltens nach jedem Zyklus wurde zunächst mit 50% der Bruchlast aus dem Referenzversuch durchgeführt. Nach Versagen der Proben PU A und PU B wurde diese Last auf 50% der Maximalkraft im elastischen Bereich des Referenzversuches reduziert. PU A und PU B konnten daher nur einen Klimawechselzyklus durchlaufen. Bei PU C hat sich nach dem dritten Zyklus ein Adhäsionsanriss GK eingestellt, der nach dem fünften Zyklus zu einem Totalversagen der Probe führte. Als charakteristische Auswirkung der Klimazyklus-Versuche konnte bei allen Klebstoffen ein Steifigkeitsabfall festgestellt werden. Durch die geringe Probenanzahl ist diese Aussage jedoch nur als Tendenz zu werten.

### 3.5.2.2 Wasserlagerungsversuche

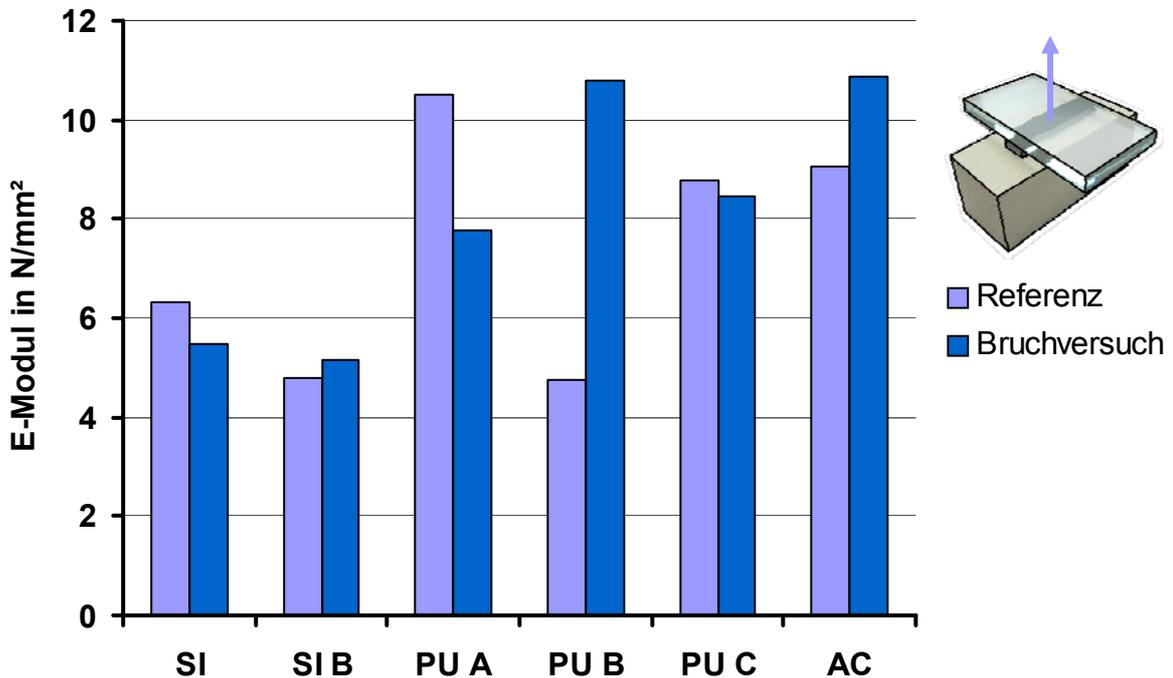


Abbildung 37: E-Modul der Referenzprobe im Vergleich zur Wasserbadprobe

An Hand des Vergleiches der Steifigkeiten der Klebefugen kann eine eventuelle Empfindlichkeit des Verformungsverhaltens gegen lang anhaltenden Kontakt mit Wasser festgestellt werden. Insbesondere soll der Einfluss des Schwind- und Quellverhaltens des Holzsubstrates auf die Klebefuge erfasst werden. Eine charakteristische Auswirkung der Wasserlagerung konnte bei den untersuchten Klebstoffen nicht erkannt werden, wobei auf die geringe Probenanzahl hingewiesen wird.

## 3.6 Diskussion

### 3.6.1 Zusammenfassung Versuchsreihe „Klebstoff“

Die Analyse der Bruchspannungen der untersuchten Klebstoffe und die Beobachtung der Versuche lassen folgende Schlüsse zu:

- Die Festigkeiten der untersuchten Silikon-Klebstoffe sind in allen Belastungsrichtungen geringer als die der untersuchten PU- und Acrylat-Klebstoffe.
- Die steiferen PU- und Acrylat-Klebstoffe versagen bei Schub hauptsächlich im Bereich der Klebefläche zum Holz.
- Bei den Silikon-Klebstoffen tritt Kohäsionsversagen im Klebstoff als charakteristisches Bruchbild auf. Dies ist sicherheitstechnisch betrachtet als wesentlicher Vorteil zu sehen.

- Bei den semi-elastischen Klebstoffen wirkt sich die Jahrringlage und -dichte bei Schub im rechten Winkel zur Faser signifikant auf das Bruchverhalten aus.

Die Analyse der Bruchdehnungen der untersuchten Klebstoffe und die Beobachtung der Versuche lassen folgende Schlüsse zu:

- Silikon-Klebstoffe zeigen ein ausgeprägt elastisches Verformungsverhalten, insbesondere bei Schubbeanspruchungen.
- Die Steifigkeit gewisser PU- und Acrylat-Klebstoffen ist vergleichbar.

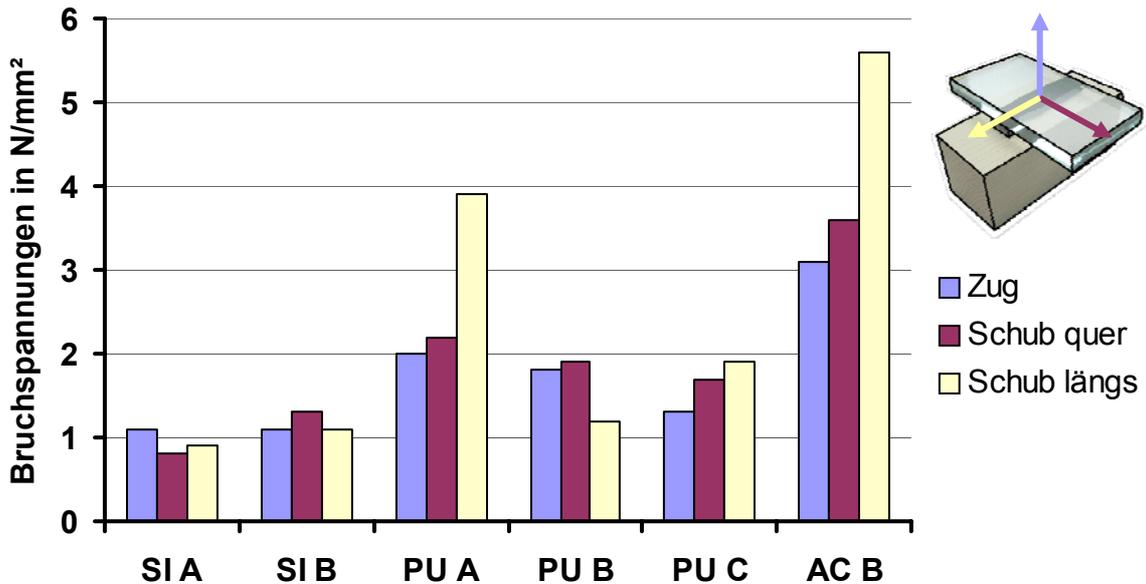


Abbildung 38: Vergleich der mittleren Bruchspannungen der untersuchten Klebstoffe

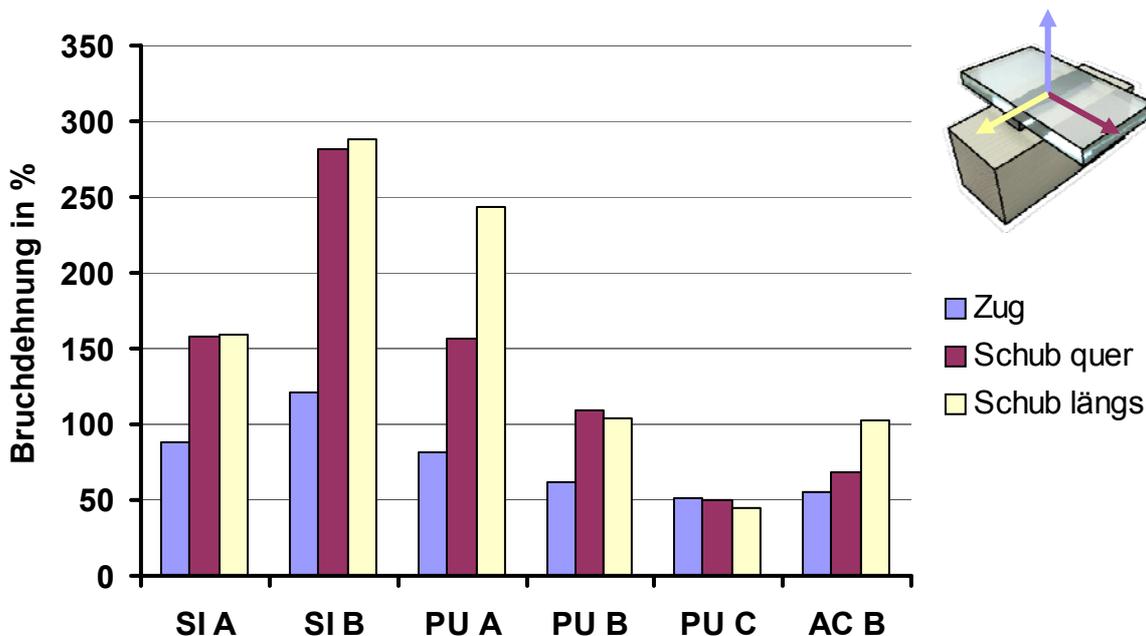


Abbildung 39: Vergleich der mittleren Bruchdehnungen der untersuchten Klebstoffe

### 3.6.1.1 Zusammenfassung Versuchsreihe „Fugengeometrie“

Die Analyse der Bruchspannungen der untersuchten Klebstoffe und die Beobachtung der Versuche lassen folgende Schlüsse zu, wobei diese sich auf das untersuchte Fugengeometriespektrum beschränken:

- Der Einfluss der Klebefugengeometrie auf die Zugbruchspannung kann nicht beschrieben werden, da bei den Proben durchwegs Biegebruch des Glassubstrates aufgetreten ist.
- Auffallend ist, dass bei einer dickeren Klebstoffuge der Anteil an Adhäsionsbrüchen Glas/Klebstoff steigt.
- Die übertragbaren Schubspannungen quer zur Klebefuge zeigen, dass dünnere Fugen höhere Bruchlasten bewirken. Als Versagensform tritt bei fast allen Proben Adhäsionsbruch in der Holz-Klebstoff-Haftfläche auf.
- Bei Belastungen längs zur Klebefuge ist kein signifikanter Unterschied bei den Fugengeometrien festzustellen. Die Bruchform ist hauptsächlich eine Kombination aus Adhäsionsversagen in der Holz-Klebstoff-Haftfläche und Kohäsionsbruch im Holz.
- Mit breiter werdenden Fugen steigt der Anteil an Querkzugbrüchen im Holz – Risse (Spalten) entstehen parallel zur Faser entlang der Jahrringe. Die Folge bei ungünstiger Jahrringlage sind tiefe Kohäsionsbrüche im Holz.

Der Einfluss der Fugengeometrie auf das Verformungsverhalten wird durch Vergleich der Bruchdehnungen, Steigungen der Belastungskurven und des Bruchbildes wie folgt beschrieben:

- Eine dickere Klebstoffuge ermöglicht dem Klebstoff ein besseres Kontraktionsverhalten bei Zug. Dadurch kann sich die Verformung der Fuge besser ausbilden. Ist die Fuge zu dünn, so beeinflussen die Substrate dieses Kontraktionsvermögen. Der Einfluss der Klebefugenbreite kann auf Grund des hohen Anteils an Glasbiegebruch nicht definiert werden.
- Bei Schub quer zur Klebefuge ist eine deutlich höhere Bruchdehnung bei den schmalen dünnen Fugen erkennbar im Vergleich zu schmalen breiten Fugen. Dieser Effekt kann auch auf die Verformung des Holzsubstrates zurückzuführen sein. Die örtlichen Spannungen am Fugenrand sind bei schmalen, steifen Fugen in der Holzoberfläche größer, was der Grund für die höhere Dehnung sein kann. Bei breiteren Fugen sind die Spannungsspitzen am Fugenrand durch den größeren Abstand der Druck und Zugzone nicht ganz so ausgeprägt. Ist der Klebstoff steifer als das Holzsubstrat (insbesondere quer zur Faser), so würden sich diese Effekte also stärker auswirken.

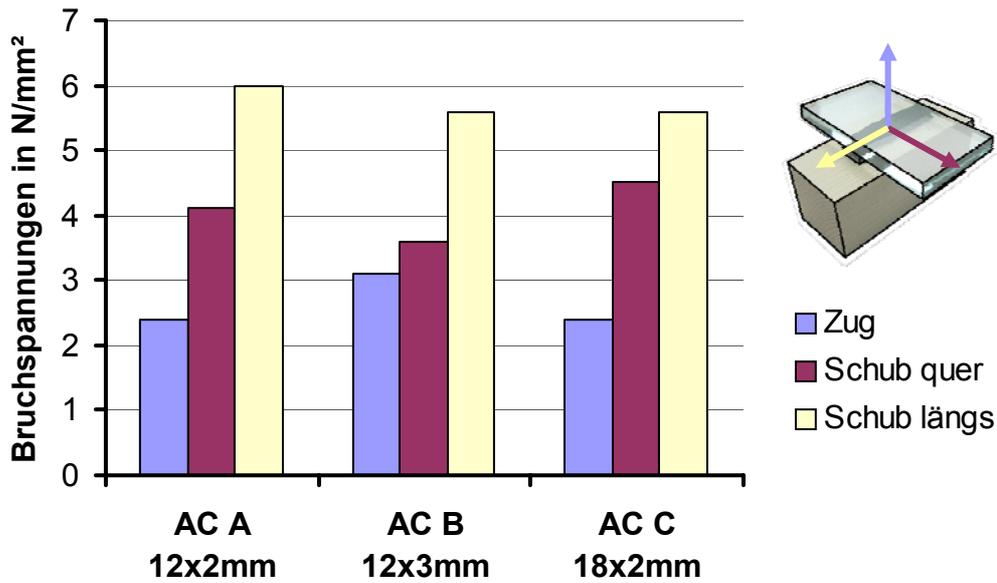


Abbildung 40: Vergleich der mittleren Bruchspannungen der untersuchten Fugengeometrien

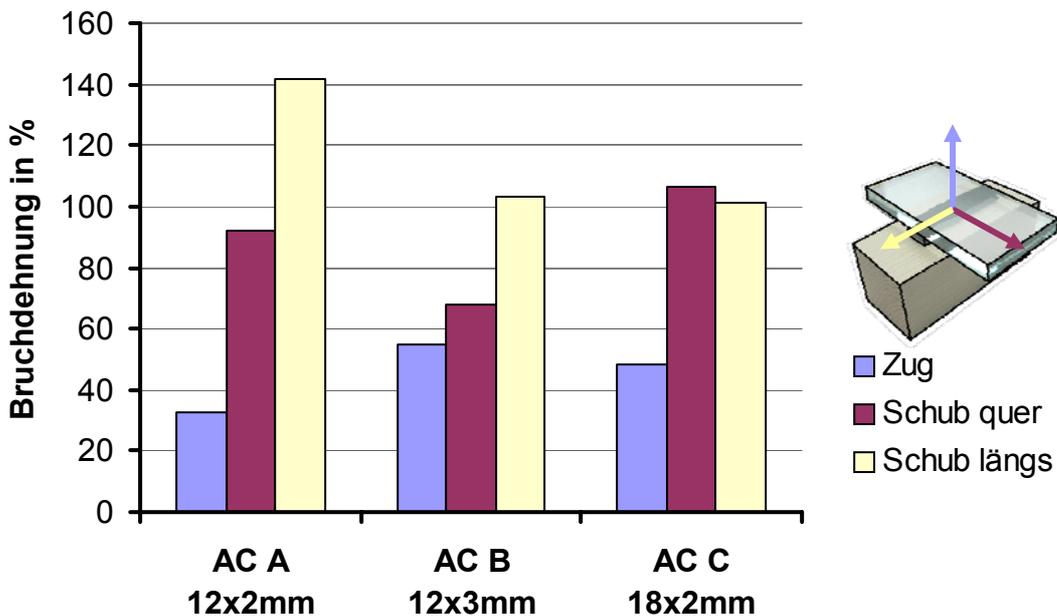


Abbildung 41: Vergleich der mittleren Bruchdehnungen der untersuchten Fugengeometrien

### 3.6.2 Prozessanalyse Klimabelastungsversuche

Die Prozessanalyse der Klimabelastungsversuche hat ergeben, dass zyklisch wiederholte Wechselklimas sehr guten Aufschluss über die Auswirkung auf die Klebstoffsteifigkeit liefern. Die Methodik, nach jedem Klimazyklus eine geringe Last aufzubringen um den Verformungsmodul zu ermitteln hat sich bewährt. Es wird empfohlen die Wasserbadlagerung

in mehreren Zyklen nach dem selbem Prinzip durchzuführen, wobei die Feuchtigkeit des Holzsubstrates zwischen 12% und 22% schwingen sollte.

### **3.6.3 Vergleich der Eignung der Klebstoffe**

#### **3.6.3.1 Die Wahl des Klebstoffes**

Je nachdem, welche äußeren Randbedingungen vorliegen, muss der Klebstoff einen Kompromiss aus Dauerhaftigkeit, Verarbeitungssicherheit und Steifigkeit bieten. Die Frage nach dem richtigen Klebstoff hängt also wesentlich vom Einsatzgebiet ab. Hochbelastete Wandscheibenelemente werden eher steifere Klebstoffe benötigen, in Fassaden oder Wintergärten können elastischere Systeme ihre Anwendung finden.

#### **3.6.3.2 Silikonklebstoff**

Silikonklebstoffe sind als elastisch einzustufen. Die Verarbeitbarkeit ist sehr gut. Auf Grund der geringeren Eigenfestigkeitskennwerte bei gutem Haftvermögen auf Holz und Glas tritt in der Regel der Versagensbruch im Klebstoff auf. Dies bringt sicherheitstechnische Vorteile im Versagensverhalten mit sich. Die Dicke der Fuge wurde bei den Versuchen auf ein Mindestmaß von 3mm reduziert, um hohe Schubsteifigkeitswerte zu erzielen. Es kann festgestellt werden, dass die aufnehmbaren Kräfte im Vergleich zur dickeren Fugen aus Vergleichsprojekten keine signifikante Änderung aufweisen, wobei sich die Fugenverformung hingegen verringert.

#### **3.6.3.3 PU-Klebstoff**

Die Festigkeitskennwerte der geprüften PU-Klebstoffe sind grundsätzlich höher als die von Silikon. Die Vorbehandlung der Glasscheiben mit einem Aktivator ist in der Regel notwendig. Auch hier wurde die Dicke der Fuge auf ein Mindestmaß von 3mm reduziert, um hohe Schubsteifigkeitswerte zu erzielen. Die Aushärtung (Durchhärtung) bei einkomponentigen Klebstoffen bei diesen dünnen Fugen nimmt erheblich mehr Zeit in Anspruch.

#### **3.6.3.4 Acrylatklebstoff**

Der Acrylatklebstoff ist im Vergleich zu den PU und Silikonprodukten sehr steif. Die Adhäsionswirkung ist sehr gut. Es kann zu Rauchentwicklung auf Grund eines stark exothermen Aushärtvorganges kommen. Der Klebstoff ist vergleichsweise sehr viskos, weshalb die Fuge nicht allzu dick ausfallen kann/soll. Die Festigkeit und Steifigkeit dieses Klebstoffes ist sehr gut.

## 4 Analyse von Konstruktionssystemen

Bei NIEDERMAIER, P. (2002) wurden vorwiegend elastische Klebstoffe untersucht. Als konstruktive Lösung für das untersuchte Aussteifungssystem wurde ein Modell gewählt, welches auf bestehenden Fassadensystemen aufbaut. Diese Konstruktionslösung stellt dabei hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Vorfertigung und ist speziell auf den Fassadenbau abgestimmt. Geringe Toleranzabweichungen der Bauelemente werden durch die elastische Verklebung aufgenommen. Setzt man steifere Klebstoffe bei diesem Konstruktionssystem ein können größere Toleranzabweichungen relevante Eigenspannungen in der Klebefuge verursachen. Unter diesen Betrachtungen ist eine detaillierte Konstruktionsvariantenanalyse, parallel zum Modell nach NIEDERMAIER, P. (2002), vor allem für die Anwendung steiferer Klebstoffe und in Bezug auf weitere Anwendungsgebiete (Ausblick Holzhausbau) notwendig.

### 4.1 Vorgehensweise

Um geeignete Konstruktionen für den vorliegenden Anwendungsfall zu finden ist es notwendig, objektiv von Konstruktionsanforderungen auszugehen und dafür spezifische Lösungen zu entwickeln. Bestehende Konstruktionssysteme des Glasfassaden- und Wintergartenbaus sollen hier nicht weiterentwickelt werden, es sollen neue Ansätze gefunden werden, die speziell auf die Problematik der Kraftübertragung eingehen und Besonderheiten bei der Montage von verklebten Systemen berücksichtigen. Dazu werden die Anforderungen an die Konstruktion als Konstruktionskriterien formuliert wobei die Lösungen dazu durch Variation der Konstruktionsmittel gefunden und bewertet werden. Durch tabellarisches Gegenüberstellen von Konstruktionskriterien und Konstruktionsmittel zeigen sich Lösungsansätze, welche bewertet werden. Sinnvolle Entwurfsvarianten sind detailliert dargestellt und werden nach den Konstruktionskriterien analysiert. Ein abschließender Vergleich dieser Varianten stellt die Basis für die Planung und Ausführung der Prototypen im Projektteil „Experimentelle Untersuchungen an Prototypen“ dar.

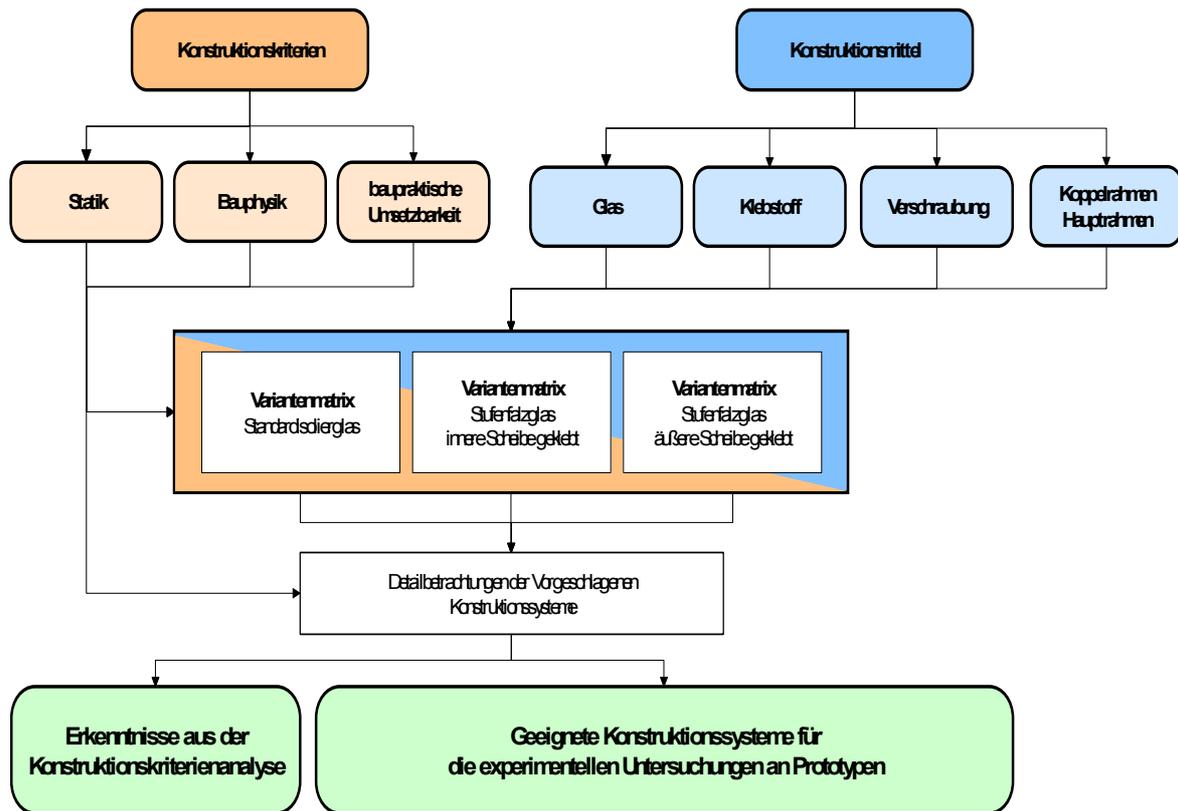


Abbildung 42: Ablauf der „Analyse von Konstruktionssystemen“

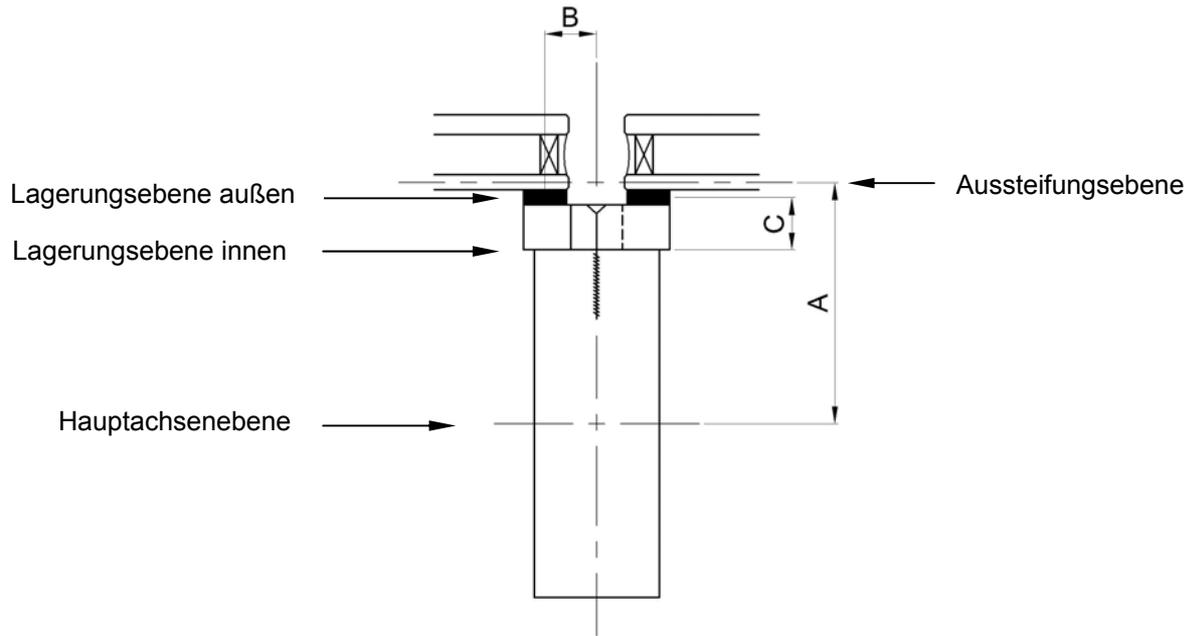
## 4.2 Diskussion möglicher Konstruktionssysteme

### 4.2.1 Konstruktionskriterien

Als Anforderungen an die Holz-Glas-Verbundelemente und deren Anbindung an eine Primärtragstruktur werden Konstruktionskriterien formuliert.

#### 4.2.1.1 Statik

Für aussteifende Scheibenelemente ist der Kräftefluss aus der primären Tragstruktur in das Scheibenelement selbst von entscheidender Bedeutung. Treten Spannungskonzentrationen bei große Befestigungsmittelabständen, Querschnittsenge Stellen oder Steifigkeitssprüngen auf, kann es durch örtliche plastische Verformungen zu einem Verteilen der Spannungen kommen. Dieser Umstand kann durch ein homogenes Kräfteflussbild berücksichtigt werden. Hier im Speziellen gilt es, den Verlauf der Kräfte aus der Hauptebene der Primärtragkonstruktion in die Aussteifungsebene (=Glasscheibenebene) zu bewerten. Die Gesamtsteifigkeit der Konstruktion ist neben den Materialsteifigkeiten auch wesentlich von geometrischen Faktoren abhängig. Diese werden direkt durch die jeweilige Konstruktionsweise beeinflusst.



- A Abstand der Aussteifungsebene zur Hauptachsebene der Primärtragkonstruktion
- B Versatz der Klebefugenachse zur Achse der Primärtragkonstruktion
- C Abstand der Lagerungsebenen zueinander

**Abbildung 43: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren - Statik**

Begriffsbestimmungen:

- Die **Aussteifungsebene** ist die Ebene, in der die statisch wirksam aussteifende Glasscheibe liegt. In dieser Ebene bilden sich, in Fachwerksanalogie, die Druck- resp. Zugstreben in der Scheibe aus.
- Die **Lagerungsebene** ist die Ebene, in der die Verbindung (Lagerung) von Bauteilen liegt. Als äußere Lagerungsebene wird hier die linienförmige Verklebung der aussteifenden Glasscheibe mit dem Koppelrahmen bezeichnet (Lagerung der Aussteifungsebene). Als innere Lagerungsebene wird die linienförmige (entlang dem Umfang des Verbundelementes verlaufende) Verschraubung der Koppelrahmenleisten an der Primärtragkonstruktion (Pfosten und Riegel) bezeichnet.
- Die **Hauptachsebene** ist die Ebene, in der die Hauptachsen der Primärtragkonstruktion liegen.

Einflussfaktoren:

- Steifigkeit
- Kraftfluss

**4.2.1.2 Bauphysik**

In bauphysikalischer Hinsicht soll festgestellt werden, welchen Einfluss die Verglasungsart, die Ausbildung der Koppelrahmenleisten oder der Verzicht auf Metallprofile in der Konstruktion haben. Es wird das Wärmestromverhalten durch den Strukturquerschnitt betrachtet, um Rückschlüsse auf den unterschiedlichen Wärmeverlust der einzelnen

Varianten ziehen zu können. Der Verlauf der Isothermen im Querschnitt gibt Aufschluss über das Kondensationsverhalten von Luft an den Bauteiloberflächen.

Einflussfaktoren:

- Wärmedurchgangsverhalten
- Kondensationsverhalten

#### 4.2.1.3 Praktische Umsetzbarkeit

Es sollen Konstruktionslösungen gefunden werden, welche praktisch umsetzbar sind. Das bedeutet, dass eine wirtschaftliche Herstellbarkeit gegeben sein muss. Die Montage an der Baustelle soll rasch und unkompliziert durchführbar sein. Ungenauigkeiten der Achsmaße der Primärtragkonstruktion sollen konstruktiv berücksichtigt werden, sodass die Montage wirtschaftlich bleibt und der optische Anspruch erfüllt werden kann. Die Elemente müssen zum Zwecke der Austauschbarkeit demontierbar sein. Der Aufwand der Demontage eines beschädigten und das Einbringen eines neuen Verbundelementes ist hier relevant. Es soll auch die Kompatibilität mit bestehenden Bauteilen beleuchtet werden. Hierzu sind die Anwendbarkeit bekannter Pfosten- / Riegelkonstruktionen zu zählen, sowie die Anschlussmöglichkeiten an Wand, Decke und Dach samt Detailausbildung.

Einflussfaktoren:

- Herstellbarkeit
- Montierbarkeit
- Ausgleich von Bautoleranzen
- Austauschbarkeit
- Kompatibilität

#### 4.2.2 Konstruktionsmittel

Als Konstruktionsmittel werden hier die Elemente der Konstruktion bezeichnet, die sich unmittelbar auf die Wirksamkeit und Funktion derselben auswirken. Deren Ausführung ist ausschlaggebend, wie und auf welche Konstruktionskriterien eine Wirkung erzielt wird. Durch die Variation der Konstruktionsmittel ergeben sich die Konstruktionsvarianten.

##### 4.2.2.1 Glas

Je nach Anwendungsfall können die unterschiedlichsten Gläser eingesetzt werden. Hinsichtlich der Konstruktionsweise soll hier zwischen Einfachglas, Isolierglas und Stufenfalz-Isolierglas (i.F. Stufenfalzglas) unterschieden werden.

- **Einfachglas:** Werden keine wärmetechnischen Anforderungen gestellt, so kann eine Einfachverglasung ausgeführt werden. Die Spanne der einsetzbaren Produkte reicht von teilvorgespanntem und vorgespanntem Glas bis hin zu Verbundgläsern in verschiedenen Variationen. Je nach Größe der Scheibe und gestellten Sicherheitsanforderungen werden die Eigenfestigkeit und das Bruchverhalten materialbestimmend sein. Bei großen Scheibenabmessungen wird die Stabilität der Scheibe eine Rolle spielen. Das Beulverhalten von Glasscheiben wird u.A. in LUIBLE, A. (2004) und beschrieben.
- **Isolierglas:** Bei Einsatz von Isolierglas kann die Qualität der Scheiben je nach Anforderung gewählt werden und untereinander (innen / außen) unterschiedlich sein.

Für die Aussteifung wird nur die mit den Koppelrahmenleisten verklebte Scheibe beansprucht. Die zweite (äußere) Scheibe hängt durch den Randverbund quasi Huckepack an der Aussteifungsscheibe. Demnach fallen auf die äußere Scheibe keine Aussteifungskräfte, sie bleibt frei von Fremdeinwirkungen. Bei den hier betrachteten Konstruktionsansätzen für die Anwendung bei Glasfassaden oder Wintergärten mit der Abgrenzung „innen liegendes Primärtragsystem“ werden ausschließlich Verklebung der inneren Isolierglasscheibe berücksichtigt.

- **Stufenfalz – Isolierglas:** Es bietet die Möglichkeit, die außen liegende Glasscheibe als Aussteifungsscheibe zu verwenden und dabei trotzdem den Koppelrahmen und die Primärtragkonstruktion innen liegend, also geschützt, zu führen. Aus optischen Gründen wäre der Randbereich der überstehenden Scheibe mit einer schwarzen Emailschiicht versehen (Verdecken der Klebefuge). Diese Emailschiicht hätte jedenfalls, je nach Festigkeit und Steifigkeit des Klebstoffes, Einfluss auf die Haftung der Verklebung der Koppelrahmenleisten. Hinsichtlich der Art der verwendeten Einzelscheiben (Floatglas, Verbundglas, etc.) verhält sich Stufenfalzglas analog zu Standard-Isoliergläsern.

#### 4.2.2.2 Klebstoff

Die Steifigkeit, Klebefugendicke und die bauphysikalische Belastbarkeit wirken sich unmittelbar auf die Konstruktionskriterien aus. Die Lage der Klebefuge im Querschnitt der Konstruktion beeinflusst den Kraftfluss entscheidend.

- **elastische Klebstoffe (Silikon, div. PU,...):** Werden elastische Klebstoffe verwendet, besteht die Möglichkeit, deren Verformungsvermögen dazu zu nutzen, Bautoleranzen auszugleichen. Bei der Verschraubung der Verbundelemente können die Koppelrahmenleisten um ein gewisses Maß durch die Elastizität des Klebstoffes auseinandergezogen oder zusammengedrückt werden. Ein Ausgleich von geringen Bautoleranzen kann also durch elastische Verformung des Verbundelementes erfolgen. Das Verhalten von Silikonklebstoffen unter bauphysikalischen Belastungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Zwängungen) ist bekannt und kann produktspezifisch als sehr gut eingestuft werden.
- **semi-elastische Klebstoffe (Acrylat, div. PU,...):** Semi-elastische Klebstoffe sind zwar in Abhängigkeit der Fugendicke in gewissem Maße elastisch verformbar, ein Ausgleich von Bautoleranzen ist jedoch nicht möglich. Daher muss die Befestigungstechnik des Verbundelementes an der Pfosten- / Riegelkonstruktion toleranzausgleichend wirken können. Die Klebefugen von semi-elastischen Klebstoffen sind in der Regel recht dünn. Dadurch wird das Aussteifungsvermögen begünstigt, wie auch durch die höhere Klebstoffsteifigkeit selbst. Dies fördert jedoch die Bildung von Spannungskonzentrationen bei Lasteinleitungspunkten. Unregelmäßigkeiten im Spannungsverlauf entlang der Klebefuge können nur bedingt ausgeglichen werden.

#### 4.2.2.3 mechanische Befestigung

Die mechanische Befestigung der Verbundelemente an der Pfosten- / Riegelkonstruktion soll durch Schrauben erfolgen, Nägel oder Klammern wären grundsätzlich denkbar. Für die hier betrachtete Anwendung im Fassadenbau resp. Wintergartenbau bei der eine „vor-Ort-Montage“ und eine Austauschbarkeit der Verbundelemente gegeben sein muss, sollen jedoch nur Schrauben berücksichtigt werden. Es wird in allen betrachteten Varianten von einer rundum, entlang des Umfanges des Verbundelementes verlaufenden, engen Verschraubung ausgegangen. Zu große Befestigungsmittelabstände würden wieder punktuelle Spannungskonzentrationen bedeuten, die es zu vermeiden gilt. Durch eine enge

Verschraubung wird des Weiteren die Systemsteifigkeit erhöht, die Pfosten- / Riegelkonstruktion wird aktiv als biegesteifer Rahmen miteinbezogen und Teil des Aussteifungssystems. Konstruktionsbestimmend werden die Positionierung und die Achsrichtung der Schrauben sein.

#### **4.2.2.4 Koppelrahmen**

Die Leisten des Koppelrahmens werden an die konstruktiven Anforderungen von Glas, Klebstoff und der mechanischen Befestigung angepasst. Die Form des Leistenquerschnittes selbst, sowie dessen Dimension wird hier abgeschätzt und in Anlehnung an die bisher ausgeführten Konstruktionen nach NIEDERMAIER, P. (2002) und HAMM, J. (2000) gestaltet. Weiterführend werden in dieser Arbeit zusätzliche Befestigungsmethoden analysiert.

#### **4.2.2.5 Tragstruktur (Pfosten / Riegel)**

Die Tragstruktur soll weitestgehend die üblichen Ausführungsformen beibehalten und nur in geringen Ausmaßen angepasst werden. Bei üblichen Pfosten- / Riegelkonstruktionen werden durch die Pfosten anfallende Vertikalkräfte abgetragen. Neben der Anforderung an die sichere Aufnahme der dabei entstehenden Druckspannungen wird der Querschnitt der Pfosten in der Regel nach dem Stabilitätskriterium (Knicken) dimensioniert. Dadurch ergibt sich auch die meist gedrungene Querschnittsform von der bei der Entwicklung der Konstruktionsvarianten auch ausgegangen wird. Auf den stabilisierenden Einfluss der aussteifenden Scheibe auf den Pfosten soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

#### **4.2.3 Variantenmatrix**

Die aus der Konstruktionsmittelvariation entstehenden Systeme werden nach den Kriterien bewertet. Nicht plausible Varianten scheidern sofort aus, mögliche Varianten werden qualitativ bewertet um in Folge detailliert untersucht zu werden. Die einzelnen Kriterien werden mit 1 bis 5 eingestuft, wobei 1 als Bestnote gilt. Sollte es zu einem Ausscheidungsgrund für eine Variante kommen wird dieser mit F markiert. Der Übersichtlichkeit wegen wird die tabellarische Gegenüberstellung für jede verwendete Glasart separat angeführt. Jenen Varianten, welche im Detail untersucht werden sollen, wird eine Variantenkennzeichnung zugeordnet.

Bei den vorliegenden Gegenüberstellungen wurde versucht, nach objektiven Gesichtspunkten zu bewerten, jedoch kann die Interpretation nur subjektiv erfolgen. Es wird nicht ausgeschlossen, dass auch ausgeschiedene Varianten zu sinnvollen Konstruktionslösungen führen können.

4.2.3.1 Systeme mit Standardisolierverglas

Tabelle 10: Variantenmatrix – Systeme mit Standardisolierverglas

Glas		Standardisolierverglas							
Klebstoff		elastisch				semi-elastisch			
mech. Befestigung (Befestigungsrichtung)		→	↑	↓	X	→	↑	↓	X
Statik	Steifigkeit	3	2	2	3	2	1	1	2
	Kraftfluss	4	3	3	3	3	2	2	2
Bauphysik	Wärmedurchgangsverhalten	2	2	2	2	2	2	2	2
	Kondensationsverhalten	2	2	2	2	2	2	2	2
praktische Umsetzbarkeit	Herstellbarkeit	2	3	1	4	2	3	1	4
	Montierbarkeit	3	3	2	3	3	3	2	3
	Ausgleich von Bautoleranzen	3	2	2	3	<b>F</b>	2	2	3
	Austauschbarkeit	4	2	2	2	4	2	2	2
	Kompatibilität	1	<b>F</b>	4	4	1	<b>F</b>	4	4
Variantenkennzeichen →		<b>V1</b> <b>A/B</b>	F1	<b>V2</b>	<b>V3</b>	F2	F3	<b>V4</b>	<b>V5</b>

- Achse in Glasebene, von innen verschraubt
- ↑ Achse normal zur der Glasebene, von innen verschraubt
- ↓ Achse normal zur der Glasebene, von außen verschraubt
- X Achse schräg zur Glasebene, von innen

• ad F1 und F3

Aus optischen Gründen wird in der Regel eine schmale Ansichtsbreite der Pfosten und Riegel gefordert. Dies bedingt eine gewisse Tiefe der Querschnitte, um die anfallenden Vertikallasten und Biegebeanspruchungen aus Windbelastungen normal auf die Wandebene aufnehmen zu können. Um eine Verschraubung von innen im rechten Winkel auf die Aussteifungsebene zu realisieren wären also sehr lange Schrauben notwendig. Deren Durchmesser muss allerdings durch die geforderte geringe Ansichtsbreite klein bleiben. Standardschrauben wären also hier im Speziellen nicht verwendbar, wodurch diese Konstruktionsvarianten nicht weiter verfolgt werden.

• ad F2

Steifere Klebstoffe sind nicht für den Ausgleich von Bautoleranzen geeignet. Da bei der gegebenen Befestigungsrichtung die Koppelrahmenleisten in Scheibenebene zusammengezogen werden bleiben bei zu großen

Achsabständen der Pfosten und Riegel entweder Fugen in der Konstruktion, oder es werden durch festes Zusammenschrauben und Zusammenziehen benachbarter Koppelrahmenleisten inakzeptable Eigenspannungen eingebracht.

#### 4.2.3.2 Systeme mit Stufenfalzglas – innere Scheibe geklebt

Vergleicht man Konstruktionen mit Stufenfalzglas, bei denen die innere Scheibe verklebt wird, mit Konstruktionen mit Standardisolierverglas, bei denen ebenfalls die innere Scheibe verklebt wird, so stellen sich keine wesentlichen Vorteile dar. Ein sinnvoller Einsatzzweck für diese Konstruktionsweise kann hier nicht erkannt werden. Hinzu kommen die höheren Herstellungskosten des Stufenfalzglases, weshalb diese Konstruktionssysteme ausgeschieden werden und keine weiteren Untersuchungen an dieser Stelle angestellt werden.

#### 4.2.3.3 Systeme mit Stufenfalzglas – äußere Scheibe geklebt

Tabelle 11: Variantenmatrix – Systeme mit Stufenfalzglas

Glas		Stufenfalzglas – äußere Scheibe geklebt							
Klebstoff		elastisch				semi-elastisch			
mech. Befestigung (Befestigungsrichtung)		→	↑	↓	X	→	↑	↓	X
Statik	Steifigkeit	4	2	2	3	4	1	1	2
	Kraftfluss	5	3	3	3	4	2	2	2
Bauphysik	Wärmedurchgangsverhalten	3	3	3	3	3	3	3	3
	Kondensationsverhalten	3	3	3	3	3	3	3	3
praktische Umsetzbarkeit	Herstellbarkeit	3	4	2	5	3	4	2	5
	Montierbarkeit	4	3	2	3	4	3	2	3
	Ausgleich von Bautoleranzen	3	2	2	3	F	2	2	3
	Austauschbarkeit	4	2	2	2	4	2	2	2
	Kompatibilität	2	F	5	5	2	F	5	5
Variantenkennzeichen →		<b>V6</b>	F4	<b>V7</b>	<b>V8</b>	F5	F6	<b>V9</b>	<b>V10</b>

- Achse in Glasebene, von innen verschraubt
- ↑ Achse normal zur der Glasebene, von innen verschraubt
- ↓ Achse normal zur der Glasebene, von außen verschraubt
- X Achse schräg zur Glasebene, von innen

- **ad F4 und F6**

Es gelten hier grundsätzlich die gleichen Anschauungen bezüglich der Ausscheidung der Varianten wie bei F1 und F3 (siehe Kapitel 4.2.3.1). Das Erzielen einer geringen Ansichtsbreite wird durch den Einsatz von Stufenfalzglas jedenfalls erschwert.

- **ad F5**

Auch hier stellt sich das Ausscheidungskriterium wie bei F2 dar (siehe Kapitel 4.2.3.1). Ein Ausgleich von Bautoleranzen durch steifere Klebstoffe, wie es eine Verschraubung von innen parallel zur Scheibenebene wie im vorliegenden Fall erfordern würde, wird nicht erwogen.

### **4.3 Detailbetrachtung von Konstruktionssystemen**

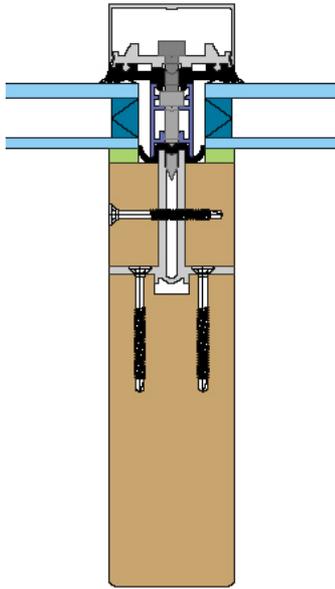
Die Varianten werden hinsichtlich der Konstruktionsmittel und deren Zusammenspiel analysiert und gelten als Entwürfe. Detaillösungen wie Dichtungsprofilführung, Klemmung, Glaseinstand etc. werden mitberücksichtigt, sollen aber für die endgültige Lösungsfindung variabel sein. Ebenso sind Schraubentypen, -längen und -durchmesser in späterer Folge mit der endgültigen Konstruktionslösung abzustimmen.

Die Lösungsvarianten sollen durchwegs als „Structural Sealant Glazing“-Systeme ausführbar sein. Hierbei treten konstruktive Änderungen lediglich im Bereich der Klemmung und der Abdichtungssystematik auf.

Für jede Variante erfolgt eine Ausformulierung der Konstruktionskriterien (Statik, Bauphysik, baupraktische Umsetzbarkeit).

Die bauphysikalischen Analysen der Varianten erfolgen durch zweidimensionale Simulation nach der Methode der Finiten Elemente mit dem Programm WinFeuchte (V 3.0.8).

### 4.3.1 Konstruktionssystem V1 A



**Glas:**

Standardisoliertglas (8 / 16 / 6 mm)

**Klebstoff:**

elastisch, Klebefuge 6 mm

**Befestigung:**

Aluminiumprofil als Koppellement, biegesteif mit der Pfosten- / Riegelkonstruktion verschraubt. Die Koppelrahmen werden von innen parallel zur Scheibenebene durch den Steg des Aluminiumprofils mit dem benachbarten Koppelrahmen verschraubt.

Abbildung 44: Konstruktionssystem V1 A

#### 4.3.1.1 Statik

Konstruktionsbedingt ist der Abstand zwischen äußerer und innerer Lagerungsebene recht groß. Dies würde zwar ein weiches Verformungsverhalten bedeuten, jedoch wird sich das Aluminiumprofil bei ausreichender Verschraubung stabilisierend und lastverteilend auswirken. Der Kraftfluss aus der Hauptachsebene in die Aussteifungsebene wirkt eher kompliziert und abgewinkelt. Die Kräfte laufen durch mehrere Schrauben, das Aluminiumprofil, die Koppelrahmenleisten und die Klebefuge bis die Aussteifungsebene erreicht wird.

#### 4.3.1.2 Bauphysik

Die Temperaturverteilung im Querschnitt zeigt deutlich, dass das Aluminiumprofil eine ausgeprägte Wärmebrücke darstellt. Die 10° Isotherme wird nach außen gezogen, wodurch der Bereich zwischen den Glasscheiben bezogen auf das Kondensationsverhalten als kritisch zu sehen ist. Es werden jedenfalls spezielle Dämmelemente im Glasstoßbereich notwendig sein.

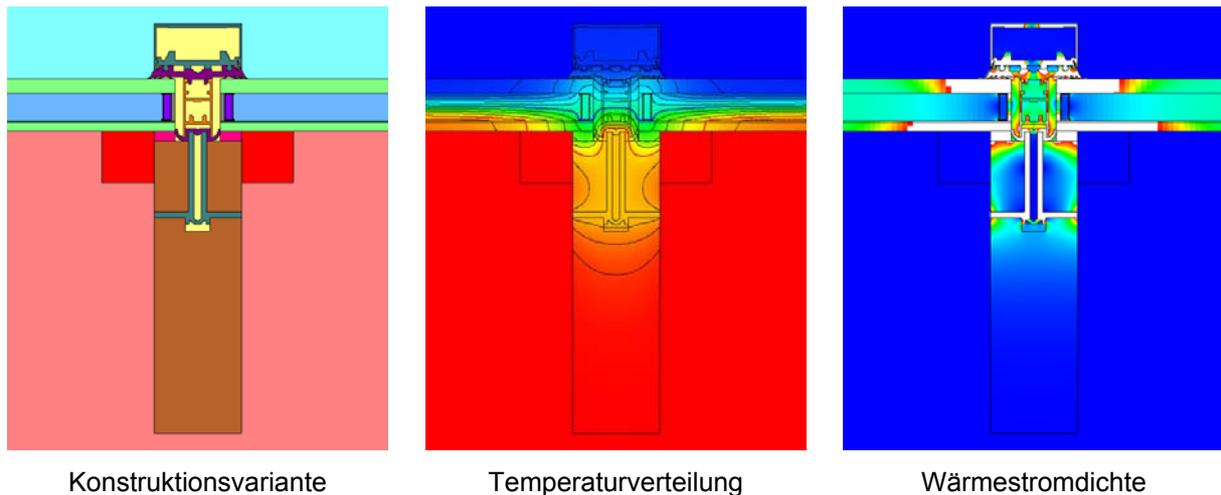


Abbildung 45: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V1 A

Tabelle 12: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V1 A

Innentemperatur	$t_i$	+ 20 °C
Außentemperatur	$t_a$	- 15 °C
Wärmedurchgangskoeffizient der Glasscheibe	$U_G$	0,974 W/(m <sup>2</sup> K)
geringste Temperatur im Bauteil	$t_{s,i,min}$	- 3,82 °C
Heizwärmebedarf pro Laufmeter Profil pro Jahr*	HWB	24,55 kWh/(m·a)
Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient	$\psi$	0,164 W/(mK)
Flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient	$U_f$	2,41 W/(m <sup>2</sup> K)

\* bei 3600 Heizgradtagen mit 12/20°C

#### 4.3.1.3 Baupraktische Umsetzbarkeit

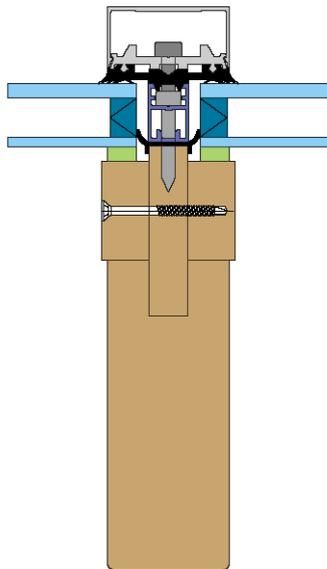
##### Positiv:

- sehr gut in bestehende Alu/Holz-Fassadensysteme integrierbar
- basiert auf erprobtem System (dichtungstechnischer Vorteil)
- sehr gut mit „nicht-verklebten“ Elementen koppelbar

##### Negativ:

- Aluminiumprofil als Wärmebrücke
- Pfostenabstand muss bei Montage sehr genau sein
- Montageungenauigkeiten müssen durch die Klebefuge aufgenommen werden
- Eigenspannungen in der Klebefuge durch Montage
- die Koppelrahmenleisten müssen relativ hoch sein, um eine Verschraubung mit einem Akkuschauber zu ermöglichen (Abstand zur Glasscheibe)

### 4.3.2 Konstruktionssystem V1 B



**Glas:**

Standardisolierglas (8 / 16 / 6 mm)

**Klebstoff:**

elastisch, Klebefuge 6 mm

**Befestigung:**

Als Koppellement wird hier eine Sperrholzfeder in die Pfosten- / Riegelkonstruktion eingeleimt. Die Verschraubung der Koppelrahmen erfolgt analog zur Variante V1 A von innen durch die Sperrholzfeder in den benachbarten Koppelrahmen.

Abbildung 46: Konstruktionssystem V1 B

#### 4.3.2.1 Statik

Wie bei Variante V1 A ist auch hier der Abstand zwischen innerer und äußerer Lagerungsebene recht groß. Hier wirkt die eingeleimte Sperrholzfeder zwar stabilisierend, je nach Dicke der Feder wird die Unterstützung für die Koppelrahmenleisten aber eher gering bleiben. Der Kraftfluss verläuft hier homogener als bei V1 A, weil die Kräfte durch die Feder mittig in den Pfosten laufen

#### 4.3.2.2 Bauphysik

Wird auf die Verwendung eines Aluminiumprofils verzichtet und stattdessen eine Sperrholzfeder eingesetzt verläuft die 10° Isotherme recht homogen durch den Querschnitt. Die Furnierlagen mit Faserrichtung in Wärmestromrichtung leiten die Wärme zwar besser als die quer liegenden Lagen, der Unterschied ist jedoch marginal und bleibt unberücksichtigt.

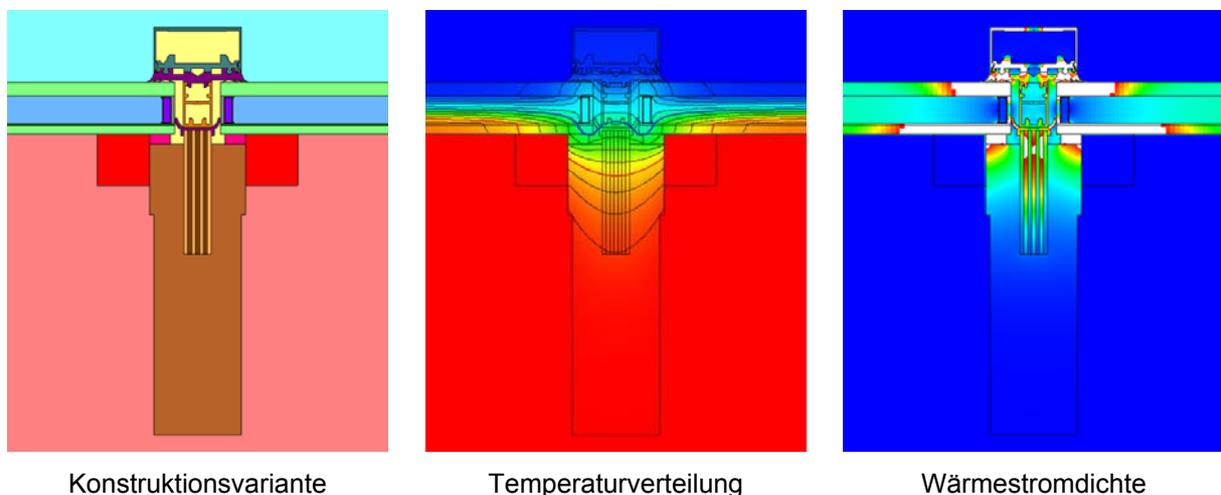


Abbildung 47: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V1 B

Tabelle 13: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V1 B

<b>Innentemperatur</b>	$t_i$	+ 20 °C
<b>Außentemperatur</b>	$t_a$	- 15 °C
<b>Wärmedurchgangskoeffizient der Glasscheibe</b>	$U_G$	0,974 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>geringste Temperatur im Bauteil</b>	$t_{s,i,min}$	- 2,89 °C
<b>Heizwärmebedarf pro Laufmeter Profil pro Jahr*</b>	HWB	20,73 kWh/(m·a)
<b>Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$\psi$	0,174 W/(mK)
<b>Flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$U_f$	1,21 W/(m <sup>2</sup> K)

\* bei 3600 Heizgradtagen mit 12/20°C

#### 4.3.2.3 Baupraktische Umsetzbarkeit

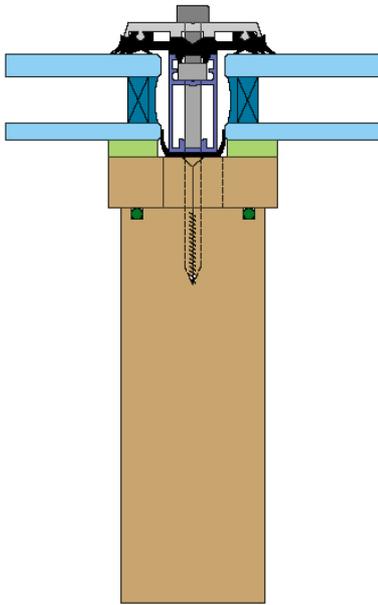
##### Positiv:

- keine Wärmebrücke durch Verzicht auf Aluminiumprofil
- geringere Schraubenzahl als bei Vergleichsvariante mit Aluminiumprofil
- kostengünstigere Herstellung als bei Vergleichsvariante mit Aluminiumprofil

##### Negativ:

- Pfostenabstand muss bei Montage sehr genau sein
- Montageungenauigkeiten müssen durch Klebefuge aufgenommen werden
- Eigenspannungen in der Klebefuge durch Montage
- erhöhter Aufwand bei der Pfosten / Riegel Herstellung
- die Koppelrahmenleisten müssen relativ hoch sein, um eine Verschraubung mit einem Akkuschrauber zu ermöglichen (Abstand zur Glasscheibe)

### 4.3.3 Konstruktionssystem V2



**Glas:**

Standardisoliervglas (8 / 16 / 6 mm)

**Klebstoff:**

elastisch, Klebefuge 6 mm

**Befestigung:**

Die Koppelrahmen werden aus flachen Holzwerkstoffleisten (zB. BFU) hergestellt. Die Verschraubung erfolgt von außen. Durch verzahnen der Leisten können diese ineinander greifen wodurch schmalere Ansichtsbreiten möglich sind.

Abbildung 48: Konstruktionssystem V2

#### 4.3.3.1 Statik

Die Distanz zwischen den Lagerungsebenen und somit auch zwischen der Aussteifungsebene und der Hauptachsenebene ist durch die flachen Koppelrahmenleisten gering gehalten. Das Gesamtsystem sollte sich somit recht steif verhalten, das ausdrehende Moment eher klein bleiben. Durch die direkte mittige Verschraubung wird der Kraftfluss aus der Aussteifungsebene homogen und eher direkt in den Pfosten verlaufen.

#### 4.3.3.2 Bauphysik

Auch bei dieser Konstruktion zeigt sich der wärmetechnische Vorteil bei reinen Holzlösungen. Die 10° Isotherme dringt nicht sehr weit in das Bauteil. Konstruktionsbedingt kann sich zwar zwischen den benachbarten Koppelrahmenleisten ein Luftspalt ergeben (Bautoleranzen), diesem wird aber wärmetechnisch kein signifikanter Einfluss zugesprochen.

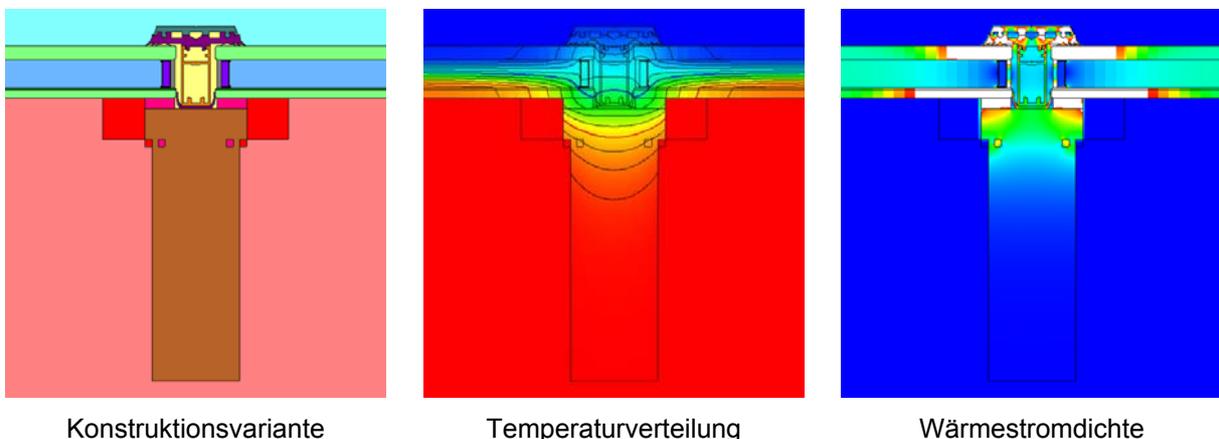


Abbildung 49: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V2

Tabelle 14: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V2

<b>Innentemperatur</b>	$t_i$	+ 20 °C
<b>Außentemperatur</b>	$t_a$	- 15 °C
<b>Wärmedurchgangskoeffizient der Glasscheibe</b>	$U_G$	0,974 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>geringste Temperatur im Bauteil</b>	$t_{s,i,min}$	- 4,61 °C
<b>Heizwärmebedarf pro Laufmeter Profil pro Jahr*</b>	HWB	21,72 kWh/(m·a)
<b>Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$\psi$	0,182 W/(mK)
<b>Flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$U_f$	1,18 W/(m <sup>2</sup> K)

\* bei 3600 Heizgradtagen mit 12/20°C

#### 4.3.3.3 Baupraktische Umsetzbarkeit

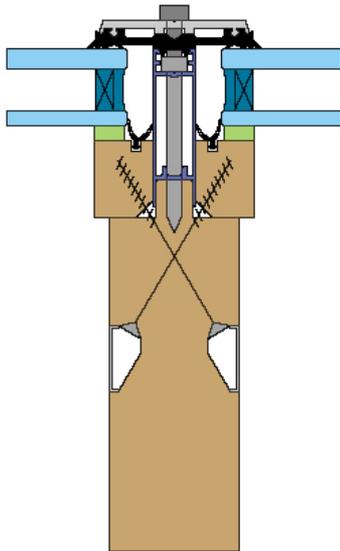
##### Positiv:

- keine Wärmebrücke durch Aluminiumprofil
- geringe Schraubenanzahl
- optimale Montagemöglichkeit
- auch größere Pfosten / Riegel – Achsmaßabweichungen sind aufnehmbar, ohne Verformung der Klebefuge
- keine montagebedingten Eigenspannungen in der Klebefuge
- geringe Ansichtsbreiten durch spezielle Koppelrahmenleistenausbildung möglich
- Verschraubung von außen (Optik von Innen wird nicht beeinträchtigt)

##### Negativ:

- Verschraubung erfolgt nahe an der Glaskante (Glasbruchgefahr bei Unachtsamkeit)
- Schraubenrandabstände sind bei Koppelrahmenleisten aus Holz zu gering - Holzwerkstoffe sollten eingesetzt werden

#### 4.3.4 Konstruktionssystem V3



**Glas:**

Standardisoliertglas (8 / 16 / 6 mm)

**Klebstoff:**

elastisch, Klebefuge 6 mm

**Befestigung:**

Als Anschlag für die Koppelrahmen werden die Pfosten und Riegel mit einem Falz versehen. Die Verschraubung erfolgt von Innen, schräg. Benachbarte Koppelrahmenleisten werden versetzt, von der jeweils gegenüberliegenden Seite, verschraubt.

Abbildung 50: Konstruktionssystem V3

##### 4.3.4.1 Statik

Die Höhe der Koppelrahmenleisten muss derart gewählt werden, dass sich eine ordnungsgemäße Einschraubtiefe im Pfosten oder Riegel verwirklichen lässt. Der Abstand zwischen der inneren und äußeren Lagerungsebene wird also eher größer ausfallen. Der Falz wird den Koppelrahmen, je nachdem wie hoch der Anschlag ist, nur geringfügig unterstützen. Die Steifigkeit der inneren Lagerungsebene wird also größtenteils durch die Biegesteifigkeit der Verschraubung bestimmt.

##### 4.3.4.2 Bauphysik

Durch den kurzen Seitenanschlagsfalz für die Koppelrahmenleisten ergibt sich ein etwas schlechteres Wärmeleitverhalten der Konstruktion. Die Isothermen werden etwas tiefer ins Innere des Pfostens gezogen. Mögliche Verbesserung wäre ein höherer Falz oder ein ausgedämmtes Kunststoffprofil in der Nut.

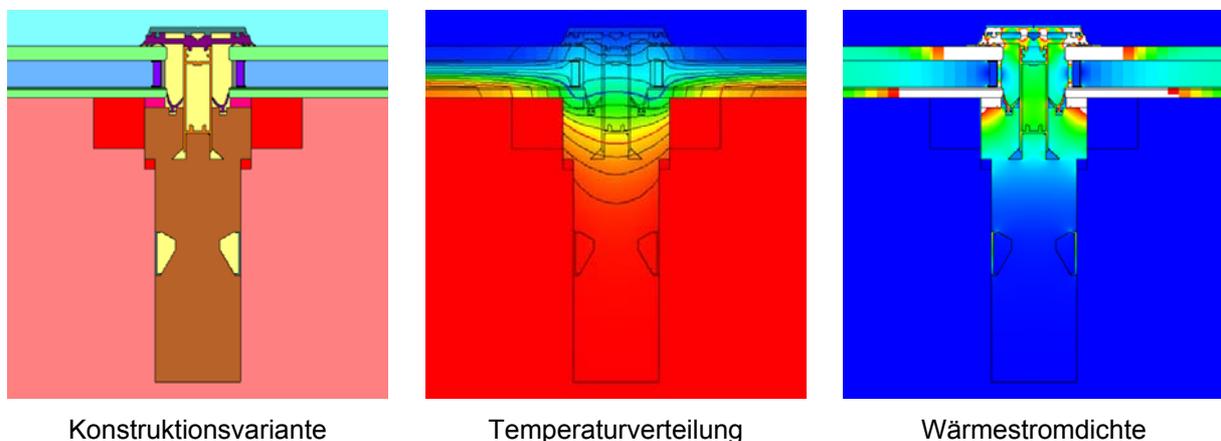


Abbildung 51: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V3

Tabelle 15: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V3

<b>Innentemperatur</b>	$t_i$	+ 20 °C
<b>Außentemperatur</b>	$t_a$	- 15 °C
<b>Wärmedurchgangskoeffizient der Glasscheibe</b>	$U_G$	0,974 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>geringste Temperatur im Bauteil</b>	$t_{s,i,min}$	- 1,66 °C
<b>Heizwärmebedarf pro Laufmeter Profil pro Jahr*</b>	HWB	22,01 kWh/(m·a)
<b>Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$\psi$	0,171 W/(mK)
<b>Flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$U_f$	1,35 W/(m <sup>2</sup> K)

\* bei 3600 Heizgradtagen mit 12/20°C

#### 4.3.4.3 Baupraktische Umsetzbarkeit

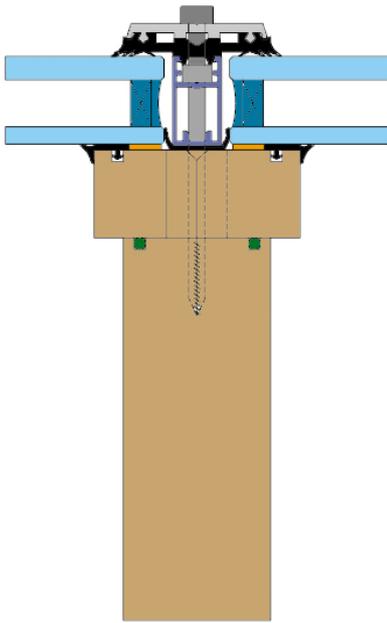
##### Positiv:

- keine Wärmebrücke durch Aluminiumprofil
- geringe Schraubenanzahl möglich
- geringe Ansichtsbreite möglich

##### Negativ:

- aufwendigere Pfosten / Riegel-Bearbeitung durch Vorbohren der Schrägverschraubung
- Schwächung von Pfosten und Riegel durch Bohrung
- Speziallösung
- Verschraubungsabdeckung sichtbar
- in den Elementecken voraussichtlich hohe Schraubenbiegebelastung
- Pfostenabstand muss bei Montage sehr genau sein
- Montageungenauigkeiten müssen durch die Klebefuge aufgenommen werden
- Eigenspannungen in der Klebefuge durch Montage

#### 4.3.5 Konstruktionssystem V4



##### Glas:

Standardisoliervlas (8 / 16 / 6 mm)

##### Klebstoff:

semi-elastisch, Klebefuge 2 mm

##### Befestigung:

Die Koppelrahmen werden aus Holzleisten hergestellt (abweichend von V2). Die Verschraubung erfolgt von außen. Auch hier können durch verzahnte Leisten, die ineinander greifen, schmale Ansichtsbreiten erzielt werden.

Abbildung 52: Konstruktionssystem V4

##### 4.3.5.1 Statik

Wie bei Variante V2 sind die Distanzen zwischen der inneren und äußeren Lagerungsebene und zwischen der Aussteifungsebene und der Hauptachsebene durch die Konstruktionsweise gering. Hier werden jedoch keine hochwertigen Holzwerkstoffleisten für den Koppelrahmen eingesetzt sondern einfache Kantel. Der Querschnitt wird dadurch etwas dicker ausfallen. Wesentliche Auswirkung wird die Materialwahl hier auf die Abstände der Verschraubung zum Seitenrand der Kantel haben. Die Dimensionen werden also auch in der Breite vergrößert werden müssen. Das Gesamtsystem wird etwas weicher sein als Variante V2, aber immer noch eine gute Basis darstellen. Der Kraftfluss zwischen der Aussteifungsebene und der Primärtragkonstruktion bleibt homogen und direkt und kann sich durch den größeren Kantelquerschnitt etwas verteilen.

##### 4.3.5.2 Bauphysik

Diese Konstruktionsvariante weicht bauphysikalisch nur sehr gering von Variante 2 ab. Die dünnere Klebefuge hat keinen wesentlichen Einfluss auf den Verlauf der Isothermen. Durch die hier gewählte Dichtungsanordnung und dem damit verbundenen größeren Glaseinstand wird jedoch das Wärmedurchgangsverhalten verbessert. Auch hier wird einem Luftspalt durch Bautoleranzen zwischen benachbarten Koppelrahmenleisten keine wärmetechnisch signifikante Auswirkung zugesprochen.

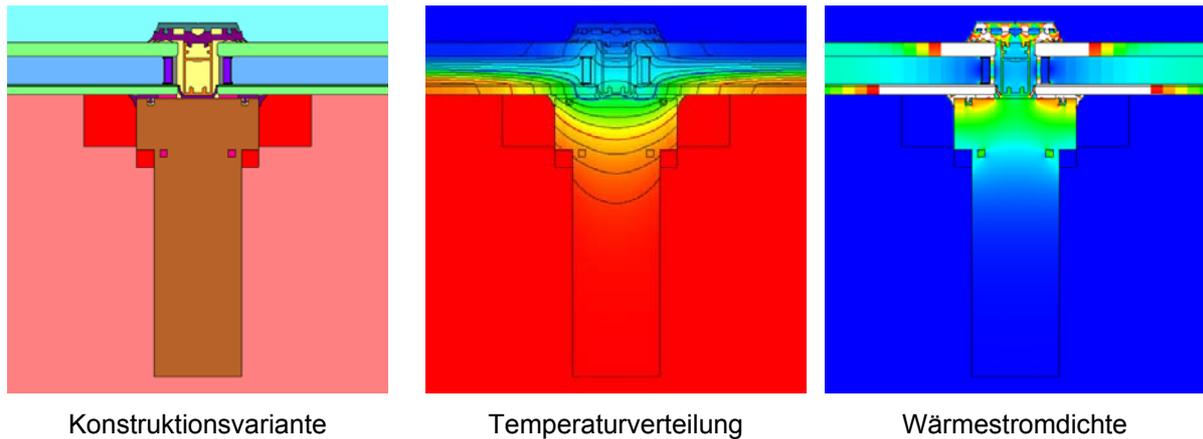


Abbildung 53: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V4

Tabelle 16: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V4

Innentemperatur	$t_i$	+ 20 °C
Außentemperatur	$t_a$	- 15 °C
Wärmedurchgangskoeffizient der Glasscheibe	$U_G$	0,974 W/(m <sup>2</sup> K)
geringste Temperatur im Bauteil	$t_{s,i,min}$	- 5,83 °C
Heizwärmebedarf pro Laufmeter Profil pro Jahr*	HWB	19,05 kWh/(m·a)
Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient	$\psi$	0,151 W/(mK)
Flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient	$U_f$	1,00 W/(m <sup>2</sup> K)

\* bei 3600 Heizgradtagen mit 12/20°C

#### 4.3.5.3 Baupraktische Umsetzbarkeit

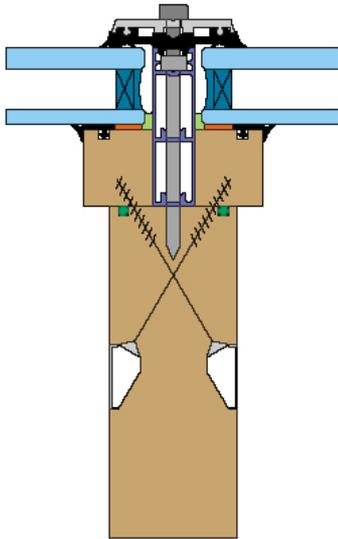
##### Positiv:

- keine Wärmebrücke durch Aluminiumprofil
- geringe Schraubenanzahl
- optimale Montagemöglichkeit
- auch größere Pfosten / Riegel – Achsmaßabweichungen sind aufnehmbar, ohne Verformung der Klebefuge
- keine Montagebedingten Eigenspannungen in der Klebefuge
- geringe Ansichtsbreiten durch spezielle (verzahnte) Koppelrahmenleistenausbildung möglich
- Verschraubung von außen (Optik von Innen wird nicht beeinträchtigt)

##### Negativ:

- Verschraubung erfolgt nahe an der Glaskante (Glasbruchgefahr bei Unachtsamkeit)
- Schraubenrandabstände sind bei Koppelrahmenleisten aus Holz zu gering. Holzwerkstoffe sollten eingesetzt werden

#### 4.3.6 Konstruktionssystem V5



**Glas:**

Standardisoliertglas (8 / 16 / 6 mm)

**Klebstoff:**

semi-elastisch, Klebefuge 2 mm

**Befestigung:**

Auf einen Anschlagfalz (siehe Variante V3) wird hier verzichtet. Die Verschraubung erfolgt wieder von innen, schräg. Benachbarte Koppelrahmenleisten werden versetzt, von der jeweils gegenüberliegenden Seite verschraubt.

Abbildung 54: Konstruktionssystem V5

##### 4.3.6.1 Statik

Im Vergleich zu Variante V3 wird hier auf den Anschlagfalz verzichtet. Das Verbundelement lehnt sich nun nicht mehr am Pfosten an sondern wird ausschließlich durch die Verschraubung gehalten. Die innere Lagerungsebene wird also weicher. In Kombination mit einer dünnen, steiferen Klebefuge, also einer steiferen äußeren Lagerungsebene, sollten die Auswirkungen auf die Gesamtsteifigkeit des Systems nicht allzu negativ ausfallen.

##### 4.3.6.2 Bauphysik

Die Konstruktion weicht bauphysikalisch in zwei Punkten von Variante 3 ab. Durch das Weglassen des Seitenanschlagfalzes für die Verbundelemente zieht es die Isothermen geringfügig in das Pfosteninnere. Die Temperaturen im Anschlussbereich sind um etwa 0,5° C geringer als bei der Variante mit Falz. Des Weiteren sind die Koppelrahmenleisten durch die Dichtungskonstruktion breiter, der Glaseinstand ist größer und dadurch das Wärmedurchgangsverhalten besser.

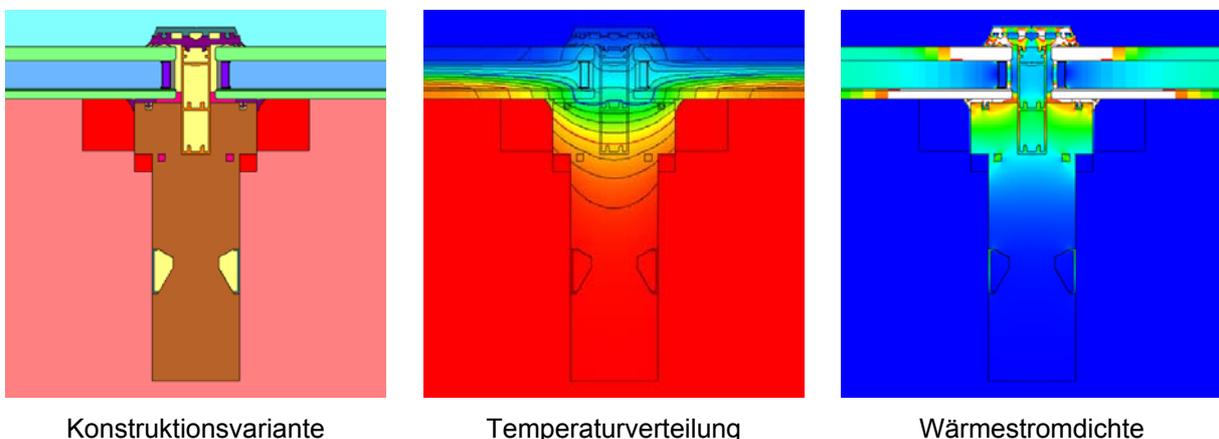


Abbildung 55: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V5

Tabelle 17: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V5

<b>Innentemperatur</b>	$t_i$	+ 20 °C
<b>Außentemperatur</b>	$t_a$	- 15 °C
<b>Wärmedurchgangskoeffizient der Glasscheibe</b>	$U_G$	0,974 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>geringste Temperatur im Bauteil</b>	$t_{s,i,min}$	- 5,88 °C
<b>Heizwärmebedarf pro Laufmeter Profil pro Jahr*</b>	HWB	19,15 kWh/(m·a)
<b>Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$\psi$	0,150 W/(mK)
<b>Flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$U_f$	1,03 W/(m <sup>2</sup> K)

\* bei 3600 Heizgradtagen mit 12/20°C

#### 4.3.6.3 Baupraktische Umsetzbarkeit

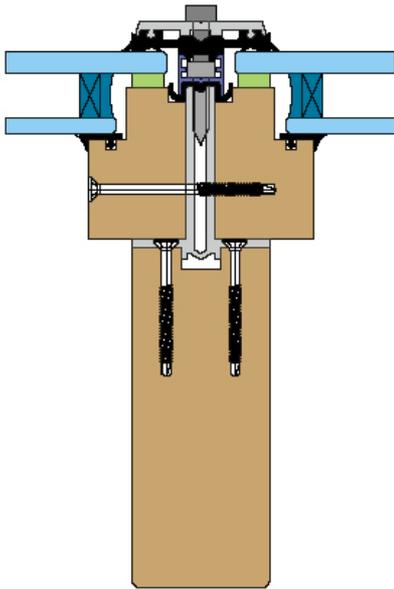
##### Positiv:

- keine Aluminiumprofile
- auch größere Pfosten / Riegel-Achsmaßabweichungen sind aufnehmbar, ohne Verformung der Klebefuge
- keine montagebedingten Eigenspannungen in der Klebefuge
- montagefreundliche Verschraubung von Innen

##### Negativ:

- aufwendigere Tragkonstruktion durch Vorbohren der Schrägverschraubung
- Schwächung von Pfosten und Riegel durch Bohrungen
- Speziallösung
- Verschraubungsabdeckung sichtbar
- in den Elementecken voraussichtlich Schraubenbiegebelastung

#### 4.3.7 Konstruktionssystem V6



**Glas:**

Stufenfalzglas (8 / 16 / 6 mm)

**Klebstoff:**

elastisch, Klebefuge 6 mm

**Befestigung:**

Die Koppelrahmenleisten sind mit der größeren Außenscheibe verklebt. Analog zu Variante V1 A dient auch hier ein Aluminiumprofil als Koppellement. Es wird biegesteif mit der Pfosten- / Riegelkonstruktion verschraubt. Die Koppelrahmen werden von innen parallel zur Scheibenebene durch den Steg des Aluminiumprofils mit dem benachbarten Koppelrahmen verschraubt.

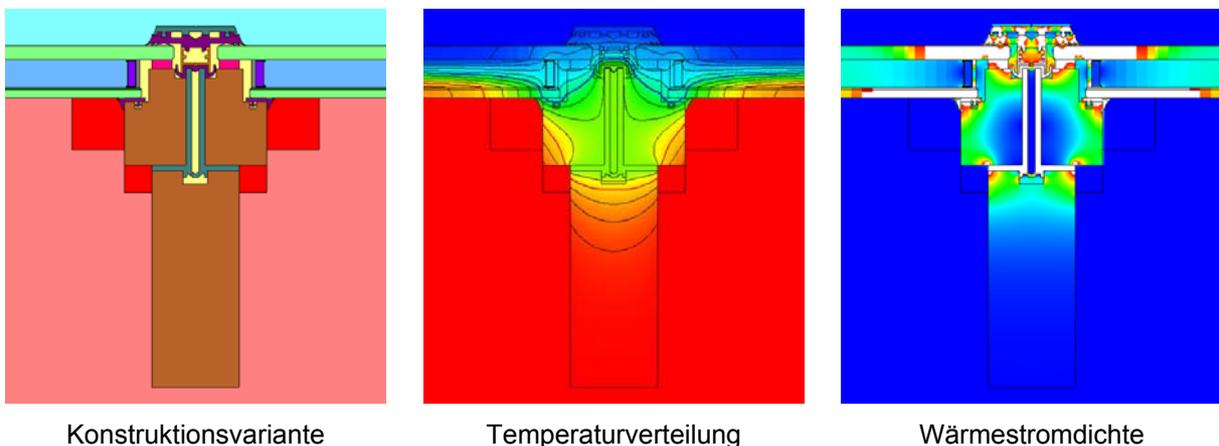
Abbildung 56: Konstruktionssystem V6

##### 4.3.7.1 Statik

Hier wird durch das Verkleben der äußeren Scheibe der Abstand zwischen innerer und äußerer Lagerungsebene wesentlich vergrößert. Die Gesamtsteifigkeit wird schlechter. Die Spannungen in den Koppelrahmenleisten können sich zwar durch die höheren Leisten besser verteilen, doch wird der positive Effekt auf die Steifigkeit ausbleiben.

##### 4.3.7.2 Bauphysik

Durch die Verwendung von Stufenfalzglas sind die Temperaturen im Fugenbereich zwischen den Glasscheiben wesentlich niedriger als bei Standardisoliertglas. Der „nicht isolierte Bereich“ zwischen den Randverbunden der benachbarten Scheiben ist wesentlich größer. Die 10° C Isotherme verschiebt sich deutlich in das Bauteilinnere. Der komplette Stoßbereich der Koppelrahmen samt dem Aluminiumprofil liegt im „unter 10° C Bereich“. In der Visualisierung der Wärmestromdichte zeigt sich das Wärmebrückenverhalten des Aluminiumprofils deutlich.



**Abbildung 57: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V6****Tabelle 18: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V6**

<b>Innentemperatur</b>	$t_i$	+ 20 °C
<b>Außentemperatur</b>	$t_a$	- 15 °C
<b>Wärmedurchgangskoeffizient der Glasscheibe</b>	$U_G$	0,974 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>geringste Temperatur im Bauteil</b>	$t_{s,i,min}$	- 2,00 °C
<b>Heizwärmebedarf pro Laufmeter Profil pro Jahr*</b>	HWB	32,26 kWh/(m·a)
<b>Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$\psi$	0,173 W/(mK)
<b>Flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$U_f$	2,45 W/(m <sup>2</sup> K)

\* bei 3600 Heizgradtagen mit 12/20°C

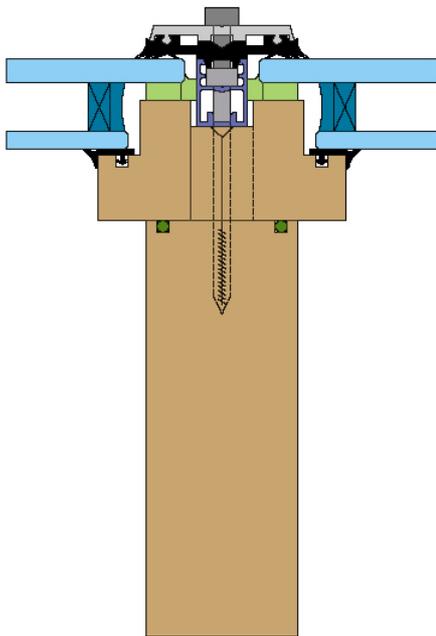
**4.3.7.3 Baupraktische Umsetzbarkeit**Positiv:

- brandschutztechnisch u.U. von Vorteil (Verklebung der äußeren Scheibe)
- einfacheres Positionieren der Koppelrahmenleisten für den Klebprozess durch Anschlagen an der inneren Scheibe möglich

Negativ:

- Aluminiumprofil als Wärmebrücke
- Pfostenabstand muss bei Montage sehr genau sein
- Montageungenauigkeiten müssen durch Klebefuge aufgenommen werden
- Eigenspannungen durch Montage in der Klebefuge
- die Koppelrahmenleisten müssen relativ hoch sein, um eine Verschraubung mit einem Akkuschrauber zu ermöglichen (Abstand zur Glasscheibe)
- die klimatische Belastung der Klebefuge ist hoch

#### 4.3.8 Konstruktionssystem V7



**Glas:**

Standardisoliervlas (8 / 16 / 6 mm)

**Klebstoff:**

elastisch, Klebefuge 6 mm

**Befestigung:**

Die Koppelrahmenleisten sind mit der größeren Außenscheibe verklebt. Die Verschraubung erfolgt von außen. Auch hier können verzahnte Leisten, die ineinander greifen, angewendet werden.

Abbildung 58: Konstruktionssystem V7

##### 4.3.8.1 Statik

Im Vergleich zu Variante V4 stellt sich kein eklatanter Unterschied dar. Die Koppelrahmenleisten werden etwas höher ausfallen, doch richtet sich hier, abweichend zu Variante V6, die Bauhöhe lediglich nach der konstruktiven Lösung der innenseitigen Dichtungsführungen.

##### 4.3.8.2 Bauphysik

Der Verzicht auf das Aluminiumprofil wirkt sich deutlich aus. Das Wärmedurchgangsverhalten wird verbessert. Die negative Auswirkung des breiten Abstandes zwischen den Randverbunden der benachbarten Scheiben bleibt.

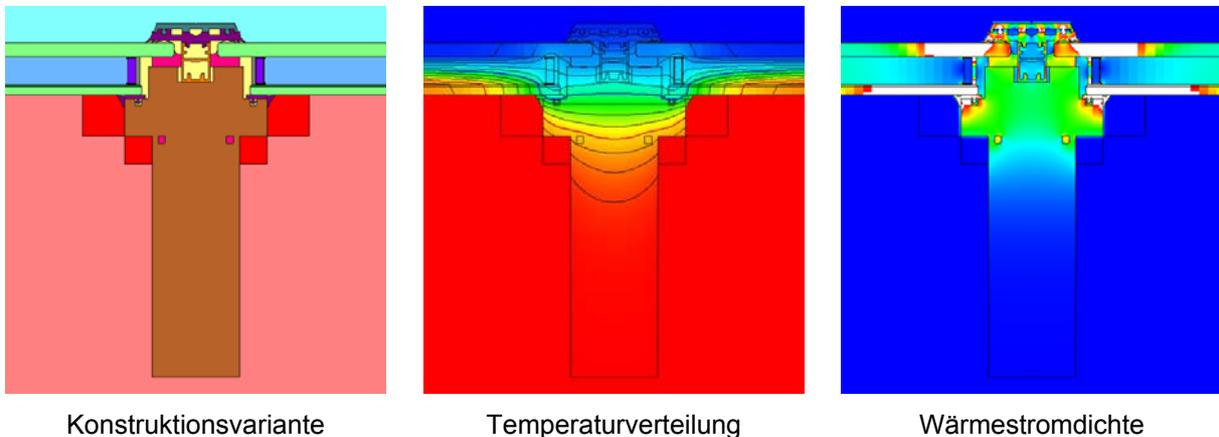


Abbildung 59: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V7

Tabelle 19: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V7

<b>Innentemperatur</b>	$t_i$	+ 20 °C
<b>Außentemperatur</b>	$t_a$	- 15 °C
<b>Wärmedurchgangskoeffizient der Glasscheibe</b>	$U_G$	0,974 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>geringste Temperatur im Bauteil</b>	$t_{s,i,min}$	- 1,69 °C
<b>Heizwärmebedarf pro Laufmeter Profil pro Jahr*</b>	HWB	26,17 kWh/(m·a)
<b>Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$\psi$	0,179 W/(mK)
<b>Flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$U_f$	1,51 W/(m <sup>2</sup> K)

\* bei 3600 Heizgradtagen mit 12/20°C

#### 4.3.8.3 Baupraktische Umsetzbarkeit

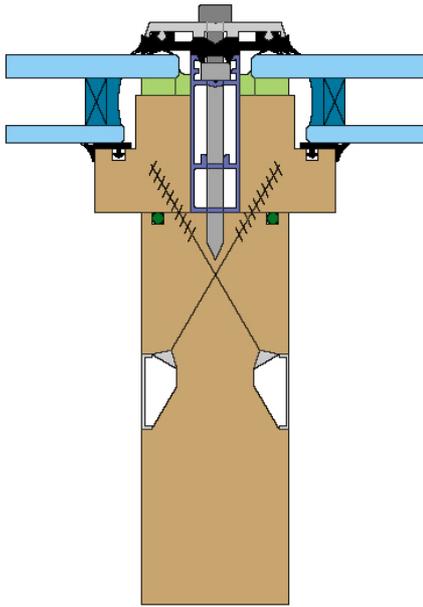
##### Positiv:

- brandschutztechnisch u.U. von Vorteil (Verklebung der äußeren Scheibe)
- geringere Schraubenzahl
- kein Aluminiumprofil
- optimale Montagemöglichkeit
- auch größere Montageungenauigkeiten aufnehmbar.
- einfacheres Positionieren der Koppelrahmenleisten für den Klebprozess durch Anschlagen an der inneren Scheibe möglich

##### Negativ:

- die klimatische Belastung der Klebefuge ist hoch

#### 4.3.9 Konstruktionssystem V8



**Glas:**

Standardisolierglas (8 / 16 / 6 mm)

**Klebstoff:**

elastisch, Klebefuge 6 mm

**Befestigung:**

Die Koppelrahmenleisten sind mit der größeren Außenscheibe verklebt. Die Verschraubung erfolgt von innen, schräg. Auf einen Anschlag für die Koppelrahmenleisten wird verzichtet. Benachbarte Koppelrahmenleisten werden versetzt, von der jeweils gegenüberliegenden Seite verschraubt.

Abbildung 60: Konstruktionssystem V8

##### 4.3.9.1 Statik

Auch bei dieser Ausführung richtet sich die Bauhöhe der Koppelrahmenleiste nach der konstruktiven Lösung der Dichtungsführungen. Unter Umständen ist die gleiche Distanz zwischen Aussteifungsebene und Hauptachsebene realisierbar wie bei Variante V 5 mit Standardisolierglas.

##### 4.3.9.2 Bauphysik

Der Einfluss des Abstandes der benachbarten Koppelrahmenleisten wirkt sich auf die Isothermen nur gering aus. Ein Kunststoffprofil ist in diesem Freiraum vorgesehen, welches auch ausgedämmt ausgeführt werden kann. Bleiben die Hohlkammern ungedämmt sind Nachteile im Wärmedurchgangsverhalten zu erwarten. Die negative Auswirkung des breiten Abstandes zwischen den Randverbunden der benachbarten Scheiben bleibt.

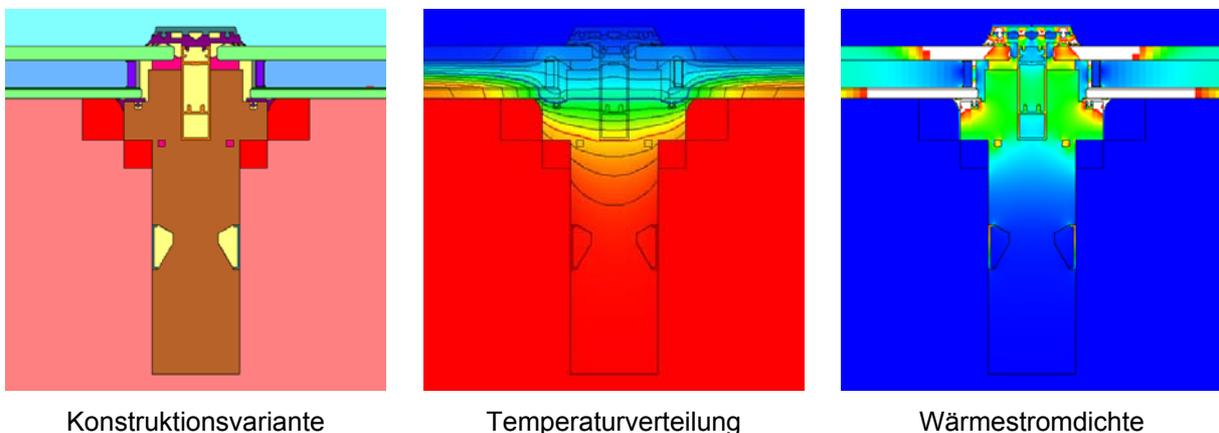


Abbildung 61: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V8

Tabelle 20: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V8

<b>Innentemperatur</b>	$t_i$	+ 20 °C
<b>Außentemperatur</b>	$t_a$	- 15 °C
<b>Wärmedurchgangskoeffizient der Glasscheibe</b>	$U_G$	0,974 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>geringste Temperatur im Bauteil</b>	$t_{s,i,min}$	- 1,66 °C
<b>Heizwärmebedarf pro Laufmeter Profil pro Jahr*</b>	HWB	26,25 kWh/(m·a)
<b>Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$\psi$	0,178 W/(mK)
<b>Flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$U_f$	1,53 W/(m <sup>2</sup> K)

\* bei 3600 Heizgradtagen mit 12/20°C

#### 4.3.9.3 Baupraktische Umsetzbarkeit

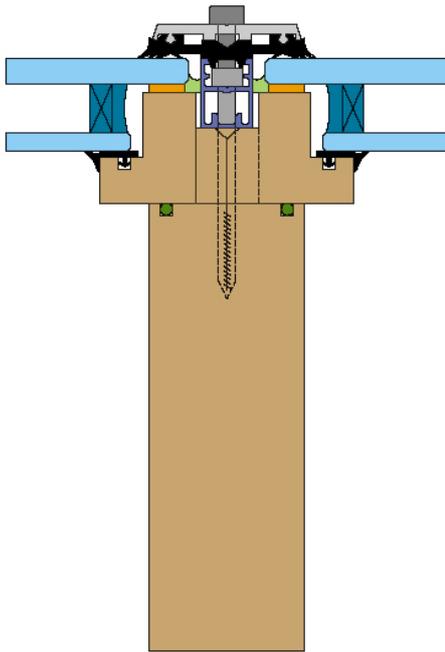
##### Positiv:

- brandschutztechnisch u.U. von Vorteil (Verklebung der äußeren Scheibe)
- kein Aluminiumprofil
- auch größere Montageungenauigkeiten aufnehmbar

##### Negativ:

- aufwendigere Tragkonstruktion durch Vorbohren der Schrägverschraubung
- Schwächung von Pfosten und Riegel durch Bohrungen
- Speziallösung
- Verschraubungsabdeckung sichtbar
- in den Elementecken voraussichtlich Schraubenbiegebelastung
- die klimatische Belastung der Klebefuge ist hoch

#### 4.3.10 Konstruktionssystem V9 – Stufenfalzglas, semi-elastisch verklebt, von außen verschraubt



**Glas:**

Standardisoliervglas (8 / 16 / 6 mm)

**Klebstoff:**

semi-elastisch, Klebefuge 2 mm

**Befestigung:**

Die Koppelrahmenleisten sind mit der größeren Außenscheibe verklebt. Die Verschraubung mit Pfosten und Riegeln erfolgt von außen. Auch hier können verzahnte Leisten, die ineinander greifen, angewendet werden.

Abbildung 62: Konstruktionssystem V9

##### 4.3.10.1 Statik

Das Aussteifungsvermögen stellt sich hier analog zu Variante V7 dar. Durch die steifere äußere Lagerungsebene (Verklebung) wird die Gesamtsteifigkeit erhöht.

##### 4.3.10.2 Bauphysik

Der Koppelrahmenleistenüberstand an der Innenseite der Scheibe ist bei dieser Variante dünner ausgeführt. Dadurch tritt die 10° C Isotherme auch im Stoßbereich Koppelrahmen / Pfosten aus der Konstruktion. Auch das Wärmedurchgangsverhalten wird verschlechtert. Die negative Auswirkung des breiten Abstandes zwischen den Randverbunden der benachbarten Scheiben bleibt.

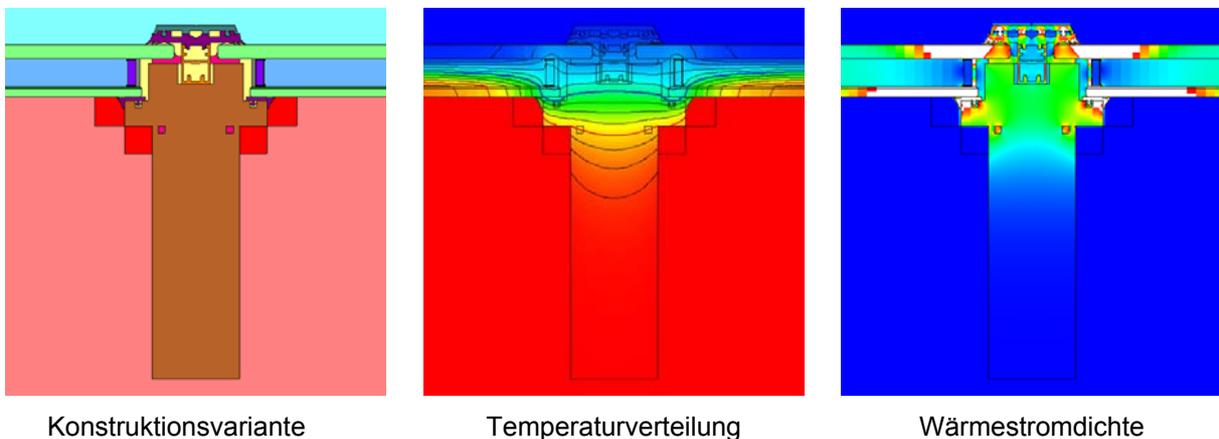


Abbildung 63: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V9

Tabelle 21: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V9

<b>Innentemperatur</b>	$t_i$	+ 20 °C
<b>Außentemperatur</b>	$t_a$	- 15 °C
<b>Wärmedurchgangskoeffizient der Glasscheibe</b>	$U_G$	0,974 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>geringste Temperatur im Bauteil</b>	$t_{s,i,min}$	- 2,08 °C
<b>Heizwärmebedarf pro Laufmeter Profil pro Jahr*</b>	HWB	26,75 kWh/(m·a)
<b>Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$\psi$	0,186 W/(mK)
<b>Flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$U_f$	1,51 W/(m <sup>2</sup> K)

\* bei 3600 Heizgradtagen mit 12/20°C

#### 4.3.10.3 Baupraktische Umsetzbarkeit

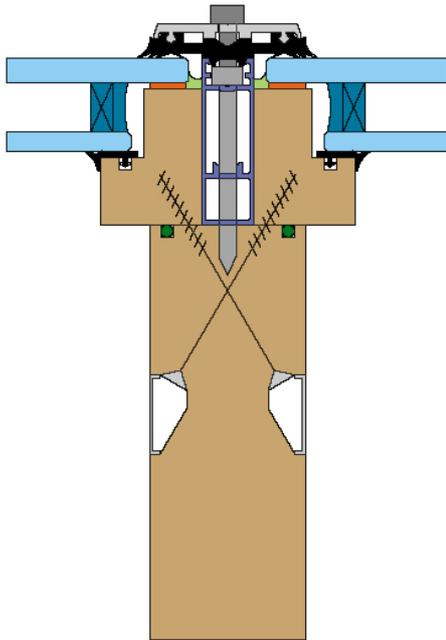
##### Positiv:

- brandschutztechnisch u.U. von Vorteil (Verklebung der äußeren Scheibe)
- geringere Schraubenzahl
- kein Aluminiumprofil
- optimale Montagemöglichkeit
- auch größere Montageungenauigkeiten aufnehmbar
- einfacheres Positionieren der Koppelrahmenleisten für den Klebprozess durch Anschlagen an der inneren Scheibe möglich

##### Negativ:

- die klimatische Belastung der Klebefuge ist hoch

#### 4.3.11 Konstruktionssystem V10



**Glas:**

Standardisoliervlas (8 / 16 / 6 mm)

**Klebstoff:**

semi-elastisch, Klebefuge 2 mm

**Befestigung:**

Die Konstruktion entspricht grundsätzlich der Variante V8. Die Koppelrahmenleisten sind mit der größeren Außenscheibe verklebt. Die Verschraubung erfolgt von innen, schräg. Auf einen Anschlag für die Koppelrahmenleisten wird verzichtet. Benachbarte Koppelrahmenleisten werden versetzt, von der jeweils gegenüberliegenden Seite verschraubt.

Abbildung 64: Konstruktionssystem V10

##### 4.3.11.1 Statik

Das Aussteifungsvermögen stellt sich analog zu Variante V8 dar. Auch hier wird durch die steifere äußere Lagerungsebene die Gesamtsteifigkeit erhöht.

##### 4.3.11.2 Bauphysik

Hier wurde auf einen Falz und somit auf einem Glaseinstand verzichtet. Kondensationstechnisch gesehen ist dies natürlich als äußerst ungünstig einzustufen, was sich durch den deutlichen Austritt der 10° C Isothermen noch im Pfostenbereich zeigt. Das Wärmedurchgangsverhalten dieser Variante ist als schlecht einzustufen. Die negative Auswirkung des breiten Abstandes zwischen den Randverbunden der benachbarten Scheiben bleibt.

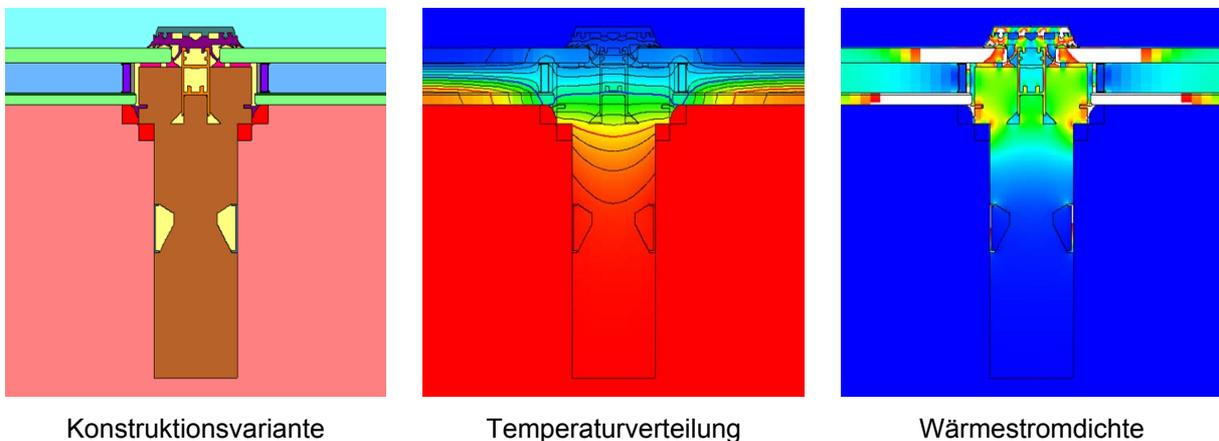


Abbildung 65: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V10

Tabelle 22: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V10

<b>Innentemperatur</b>	$t_i$	+ 20 °C
<b>Außentemperatur</b>	$t_a$	- 15 °C
<b>Wärmedurchgangskoeffizient der Glasscheibe</b>	$U_G$	0,974 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>geringste Temperatur im Bauteil</b>	$t_{s,i,min}$	- 0,40 °C
<b>Heizwärmebedarf pro Laufmeter Profil pro Jahr*</b>	HWB	29,78 kWh/(m·a)
<b>Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$\psi$	0,212 W/(mK)
<b>Flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient</b>	$U_f$	1,96 W/(m <sup>2</sup> K)

\* bei 3600 Heizgradtagen mit 12/20°C

#### 4.3.11.3 Baupraktische Umsetzbarkeit

##### Positiv:

- brandschutztechnisch u.U. von Vorteil (Verklebung der äußeren Scheibe)
- kein Aluminiumprofil
- auch größere Montageungenauigkeiten aufnehmbar durch Verzicht auf Seitenanschlagsfalz am Hauptrahmen

##### Negativ:

- aufwendigere Tragkonstruktion durch Vorbohren der Schrägverschraubung
- Schwächung von Pfosten und Riegel durch Bohrungen
- Speziallösung
- Verschraubungsabdeckung sichtbar
- in den Elementecken voraussichtlich Schraubenbiegebelastung
- die klimatische Belastung der Klebefuge ist hoch

## 4.4 Ergebnisse

### 4.4.1 Konstruktionskriterien

Um bei den experimentellen Untersuchungen der Konstruktionssysteme die richtigen Teilziele formulieren zu können und deren Gewichtung für die Versuchsprojektierung im Projektteil „Experimentelle Untersuchungen an Prototypen“ zu erfassen wurden die untersuchten Varianten an Hand von Kriterien bewertet. In Folge sind charakteristische Merkmale zusammengefasst.

#### 4.4.1.1 Statik

Aus statischer Hinsicht zeigen die durchgeführten Projektschritte, dass sich die Verformung des Gesamtelementes hauptsächlich in zwei Ebenen abspielt. Zur Beschreibung dieser Verformungsebenen werden die Begriffe innere Lagerungsebene (Verschraubung) und äußere Lagerungsebene (Klebefuge) verwendet. Ausschlaggebend für die Gesamtverformung der Konstruktion werden zu einem großen Anteil die Steifigkeiten der beiden Ebenen sein.

Die Steifigkeit der **äußeren Lagerungsebene** wird charakterisiert durch

- die Steifigkeit des Klebstoffes.
- die Geometrie des Querschnittes der Klebefuge.
- den Abstand der Klebefuge zu den Hauptachsen des Elementes.

Die Steifigkeit der **inneren Lagerungsebene** wird charakterisiert durch

- die Geometrie und Art der Schrauben.
- die Anzahl der Schrauben entlang des Koppelrahmens.
- die Achsrichtung der Schraube.
- den Abstand der Schraubenachse von der Hauptachse der Tragkonstruktion.
- die Einschraubtiefe.
- die Verwendung von zusätzlichen Metallkoppelprofilen.

Die Steifigkeit der **Gesamtkonstruktion** wird des Weiteren beeinflusst durch

- die Steifigkeit der verwendeten Materialien (Glas, Holz, etc).
- die Achsabstände der Tragkonstruktion (bzw. der Glasscheibengröße).
- den Abstand der Aussteifungsebene zur Hauptachsebene der Tragkonstruktion.
- den Abstand der inneren Lagerungsebene zur Hauptachsebene der Tragkonstruktion.
- den Abstand der äußeren Lagerungsebene zur Hauptachsebene der Tragkonstruktion.
- die Lagerung der Fußschwelle der Tragkonstruktion.
- die Lagerung des oberen Riegels in horizontaler Ebene.

#### 4.4.1.2 Bauphysik

Die bauphysikalische Untersuchung der Varianten hat gezeigt, dass die Verwendung von Stufenfalzglas für den vorliegenden Anwendungsfall bauphysikalische Nachteile aufweist. Der große Abstand zwischen den Randverbundfugen von benachbarten Glasscheiben, bedingt durch die überstehenden äußeren Glasscheiben, wirkt sich ungünstig auf das Gesamtwärmedurchgangsverhalten aus. Hinzu kommt, dass eine geringe Ansichtsbreite der Pfosten-/Riegelkonstruktion nur möglich ist, wenn auf einen Glaseinstand verzichtet werden würde. Dies kann aus Gründen des Kondensationsverhaltens beim Glas-/Holz-Stoß im Inneneckbereich nicht in Erwägung gezogen werden.

Die Verwendung von Standardisoliertglas zeigt sich bauphysikalisch als vorteilhaft. Es wird direkt auf dem Glaseinstand geklebt wodurch die Querschnittsgeometrie der Koppelrahmenleisten sehr kompakt und einfach bleiben kann. Spezielle Falz- und Nutquerschnitte sind nicht notwendig.

Der Verzicht auf das Aluminiumprofil bringt Verbesserungen der Wärmedurchgangseigenschaften im Bereich von 10 bis 20 %. Eine weitere merkbare Optimierung ist durch die Vergrößerung des Glaseinstandes zu bewerkstelligen (vergleiche dazu V2 und V3 mit V4 und V5, Abbildung 66). Veränderungen im Bereich der Fuge zwischen den nebeneinander liegenden Koppelrahmenleisten bringen nur geringfügige Möglichkeiten der wärmetechnischen Verbesserung.

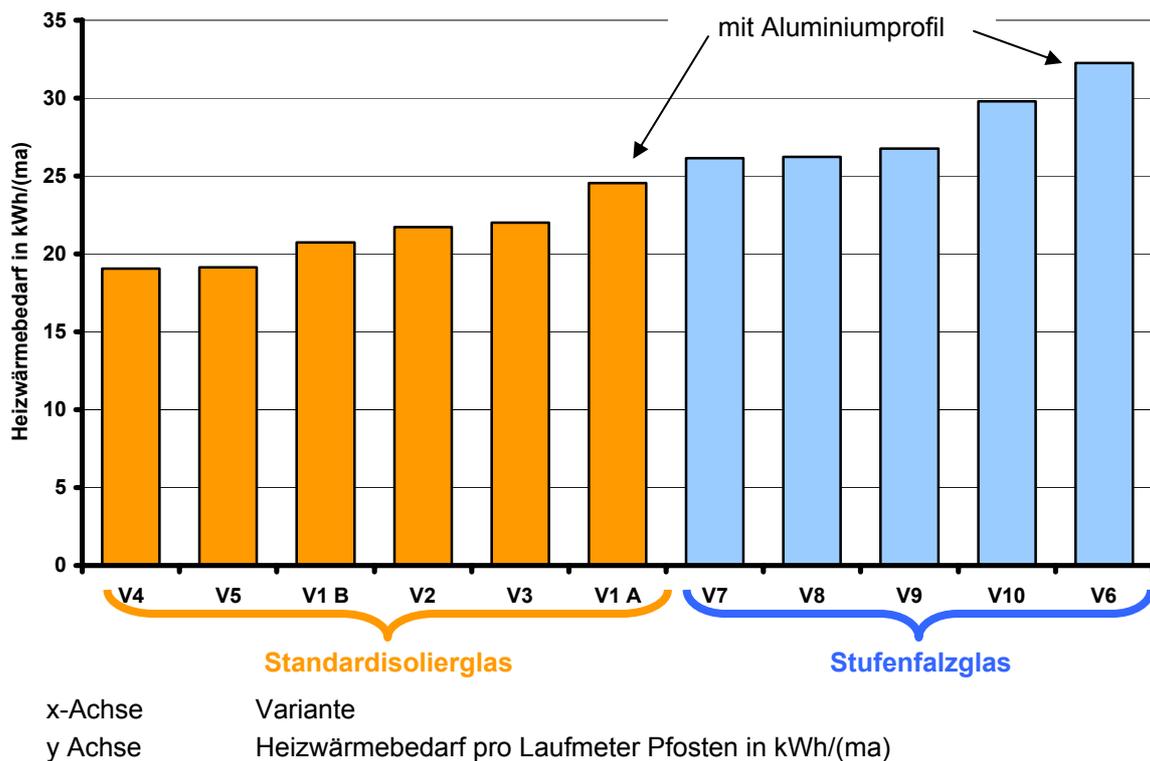


Abbildung 66: Vergleich des Wärmedurchgangsverhaltens der untersuchten Varianten

#### **4.4.2 Baupraktische Umsetzbarkeit**

Die Untersuchung der Varianten hat gezeigt, dass die Herstellbarkeit und Montierbarkeit, das Ausgleichsvermögen von Bautoleranzen, die Austauschbarkeit und die Kompatibilität der Verbundelemente für einen praktischen Einsatz entscheidend sind.

Wesentliche Erkenntnisse aus der Variantenanalyse sind, dass

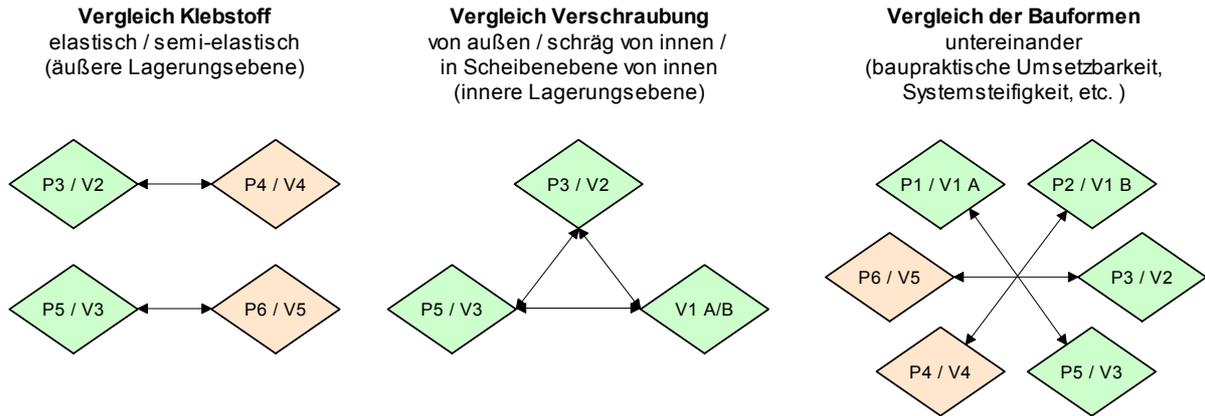
- der Verzicht auf Aluminiumprofile konstruktiv möglich ist.
- der Ausgleich von Bautoleranzen eine wesentliche Frage der Konstruktion ist.
- der Ausgleich von Bautoleranzen durch Verformung der Klebfugen unter Umständen möglich ist, jedoch vermieden werden sollte.
- das Anschrauben von Verbundelementen von außen konstruktiv gelöst werden kann.
- die Verschraubung von außen einen späteren Austausch der Verbundelemente sehr einfach ermöglicht.
- sich die Verbundelemente sehr gut für Structural-Sealant-Glazing-Systeme eignen.
- Schrägverschraubungen funktional denkbar, jedoch in der Herstellung aufwendig sind.

#### **4.5 Diskussion**

##### **4.5.1 Geeignete Varianten für den Projektteil „Experimentelle Untersuchungen an Prototypen“**

Die Auswahl der Varianten, die in Folge als Prototypen gebaut werden sollen, erfolgt auf Basis der Erkenntnisse aus den Variantenanalysen. Es sollen durch Vergleichen der Versuchsergebnisse dieser Prototypen Rückschlüsse auf die Einflüsse der Klebstoffsteifigkeit, der Verschraubungssystematik und der Konstruktionsweise selbst auf die Belastbarkeit des Gesamtsystems gezogen werden können.

Die Versuchsergebnisse sollen an Hand der hier formulierten Konstruktionskriterien untersucht werden. Um die Versuchsergebnisse direkt vergleichen zu können werden deshalb zwei Prototypen mit unterschiedlicher Verschraubungssystematik jeweils mit einem elastischen Klebstoff und einem semi-elastischen Klebstoff hergestellt. So können die Steifigkeitsunterschiede der Klebstoffe und der Verschraubungssysteme (innere und äußere Lagerungsebene) gegenübergestellt werden. Dazu werden die Konstruktionsvarianten V2 / V4 (flache Koppelrahmenleisten von außen verschraubt) und V3 / V5 (Koppelrahmenleisten schräg von innen verschraubt) gewählt. Als Vertreter der elastischen Klebstoffe wird die Gruppe der Zweikomponenten-Silikone verwendet, die semi-elastischen Klebstoffe werden durch das Zweikomponenten-Acrylatsystem vertreten. Die anderen, hier untersuchten Klebstoffe, liegen mit deren mechanisch-technologischen Eigenschaften im Bereich zwischen elastisch und semi-elastisch wodurch deren Eignung aus der hier angewendeten Versuchsreihe abgeleitet werden könnte.



**Abbildung 67: Vergleichsbeziehungen der Prototypen**

Um auch einen Bezug zwischen den neu formulierten Bauformen aus Kapitel 1 und der Bauform aus NIEDERMAIER, P. (2002) herstellen zu können und somit die Ansätze aus beiden Projekten gegenüberzustellen wird Variante V1 A (mit Aluminiumprofil) als Prototyp umgesetzt. Als Vergleichsentwicklung dieser Variante soll auch V1 B (mit eingeleimter Sperrholzfeder) hergestellt werden.

Die Prototypen werden mit der Kennung P1 bis P6 versehen.

Von einer Verwendung von Stufenfalzglas wird abgesehen. Die bauphysikalischen Nachteile und die höheren Materialkosten sind für den vorliegenden Anwendungsfall signifikant und für diese Entscheidung ausschlaggebend.

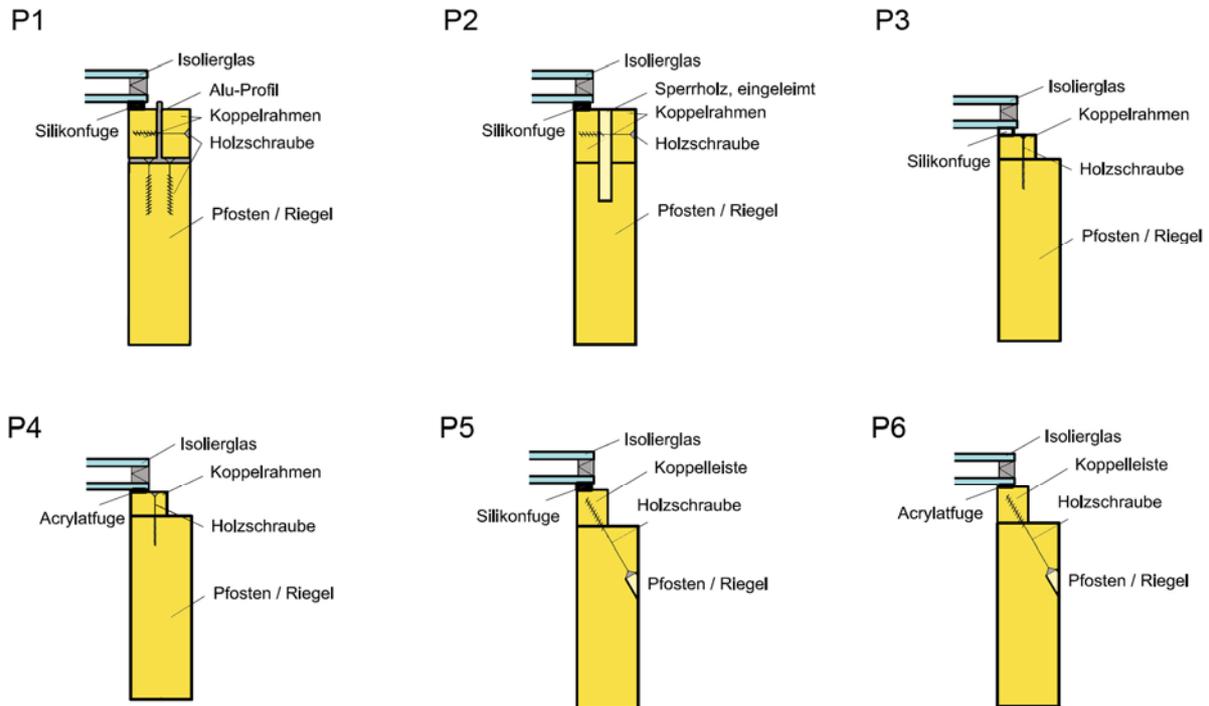
## **5 Experimentelle Untersuchungen an Prototypen**

### **5.1 Vorgehensweise**

An Hand der Ergebnisse aus dem Projektteil „Analyse von Konstruktionssystemen“ erfolgte eine Vorauswahl von sechs Varianten, welche im Detail konstruiert und gebaut wurden. Durch die Auswahl dieser Varianten und die Anwendung von elastischen und semi-elastischen Klebstoffen sollen Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten des Gesamtsystems und auf die Einflüsse der Einzelkomponenten untereinander möglich gemacht werden.

Die Konstruktion der Prototypen erfolgte unter Berücksichtigung baupraktischer Anforderungen. Aspekte der Herstellung, der Montierbarkeit und Demontierbarkeit sowie auch optische Ansprüche flossen ebenso in die Detailplanung ein.

Der Herstellungsprozess gliederte sich in zwei Bereiche. Zunächst wurde die Rahmenkonstruktion unabhängig von den Holz-Glas-Verbundelementen hergestellt. Dabei wurde bewusst darauf verzichtet, die Naturmaße des Rahmens bei der Verbundelementherstellung heranzuziehen, um so den Einfluss von Herstellungstoleranzen auf die Montierbarkeit zu erfassen. Danach erfolgte die Montage der Holz-Glas-Verbundelemente - analog zur Vorgehensweise an der Baustelle - in die vertikal stehende Rahmenkonstruktion.



**Abbildung 68: Gegenüberstellung der Konstruktionen der Prototypen**

Bei den Belastungsversuchen der Prototypen wurde im oberen Riegel der Rahmenkonstruktion (Primärtragwerk) die Kraft eingeleitet. Die daraus resultierenden Verformungen und Relativverschiebungen im System wurden gemessen. Die Belastungsversuche setzen sich aus den Vorversuchen zur Ermittlung des elastischen Verformungsverhaltens und aus den Bruchlastversuchen zur Ermittlung des Bruchverhaltens zusammen.

Im Vorversuch wurde der Prototyp zyklisch be- und entlastet, wobei die Kraft jeweils um einen geringen Anteil gesteigert wurde. Die Verformung der Prototypen erfolgte dabei im elastischen Bereich.

Der anschließende Bruchlastversuch wurde in Anlehnung an die ÖNORM EN 594 durchgeführt. Der Prototyp wurde dabei nacheinander einem Stabilisierungs-Lastzyklus, einem Steifigkeits-Lastzyklus und der Belastung bis zum Bruch unterworfen.

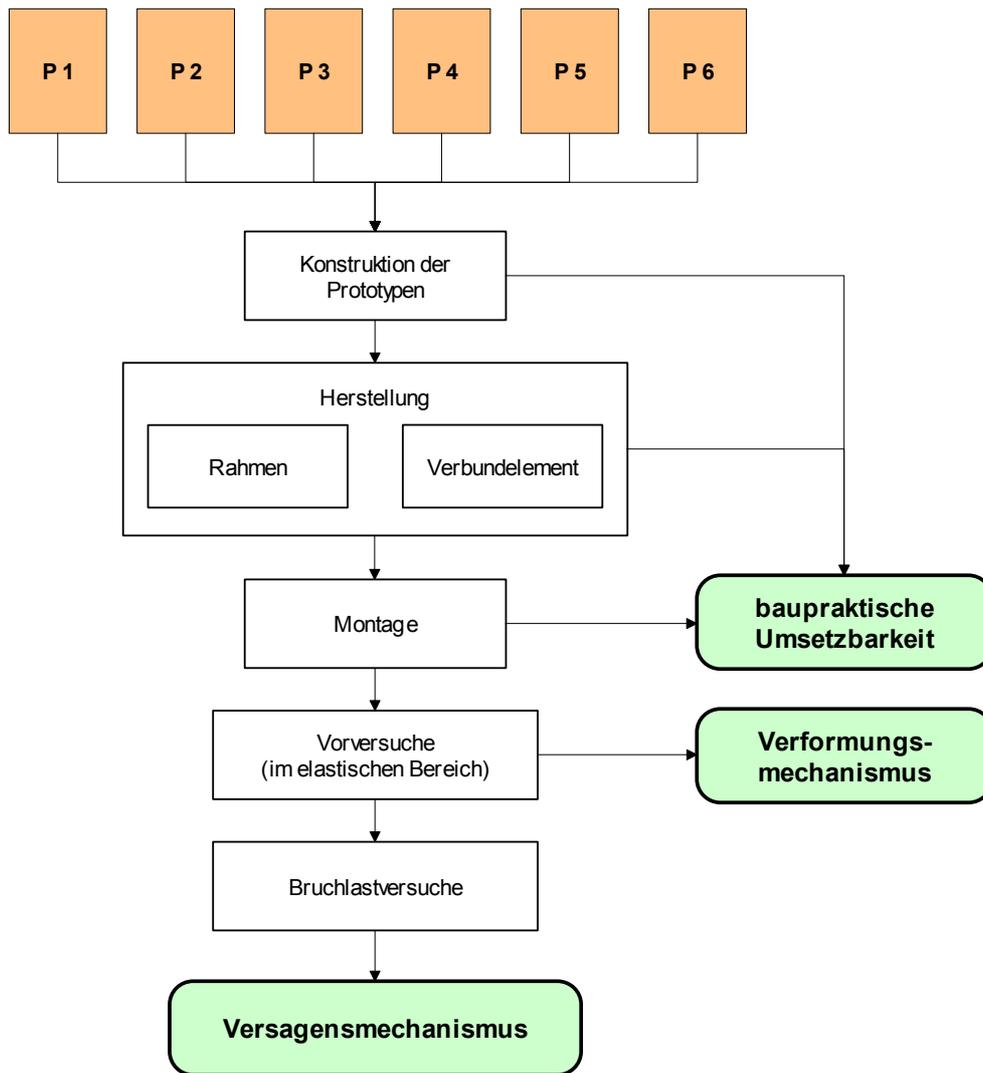


Abbildung 69: Ablauf des Projektschrittes „Experimentelle Untersuchungen an Prototypen“

## 5.2 Konstruktion der Prototypen

Ausgehend von den Entwurfsvarianten aus der Analyse der Konstruktionssysteme wurden die Prototypen geplant und konstruiert. Als zusätzliche Anforderung halten alle Prototypen eine Konstruktionsansichtsbreite von 50 mm ein. Die Querschnittsabmessungen des Primärtragwerkes (Pfosten / Riegel) sind bei allen Prototypen gleich, ebenso wie die Art und Größe der verwendeten Isolierglasscheiben. Die Holzqualität ist grundsätzlich S10, keilgezinkt.

Für alle Prototypen wurde ein Hauptachsrastrermaß der Pfosten und Riegel von 125 x 250cm gewählt. Die Lage der Klebefugen richtet sich nach der jeweiligen Konstruktion. Auch der Abstand zwischen der Aussteifungsebene und der Hauptachsebene richtet sich nach der Bauform der Prototypen.

Die Konstruktionspläne aller sechs Prototypen sind im Anhang beigefügt.

### 5.2.1 Prototyp P1 – Koppelrahmen auf Aluprofil

Tabelle 23: Beschreibung der Konstruktion - Prototyp P1:

<b>Glas</b>	Standard-Isolierglas 6 / 12 / 6 mm Floatglas innen und außen	
<b>Klebstoff</b>	Ottochemie Novasil S42 Zwei-Komponenten-Silikon Klebefuge 6 x 12 mm	
<b>Koppelrahmen</b>	Fichte, S10 23 x 40 mm	
<b>Hauptrahmen</b>	Fichte keilgezinkt, S10 50 x 150 mm	

### 5.2.2 Prototyp P2 – Koppelrahmen an Sperrholzsteg

Tabelle 24: Beschreibung der Konstruktion - Prototyp P2

<b>Glas</b>	Standard-Isolierglas 6 / 12 / 6 mm Floatglas innen und außen	
<b>Klebstoff</b>	Ottochemie Novasil S42 Zwei-Komponenten-Silikon Klebefuge 6 x 12 mm	
<b>Koppelrahmen</b>	Fichte, S10 20 x 40 mm	
<b>Hauptrahmen</b>	Fichte keilgezinkt, S10 50 x 150 mm	

### 5.2.3 Prototyp P3 – Koppelrahmen flach, von außen verschraubt

Tabelle 25: Beschreibung der Konstruktion - Prototyp P3

<b>Glas</b>	Standard-Isolierglas 6 / 12 / 6 mm Floatglas innen und außen	
<b>Klebstoff</b>	Sika SG 500 Zwei-Komponenten-Silikon Klebefuge 6 x 12 mm	
<b>Koppelrahmen</b>	Furnierschichtholz, Birke 30 x 21 mm	
<b>Hauptrahmen</b>	Fichte keilgezinkt, S10 50 x 150 mm	

### 5.2.4 Prototyp P4 – Koppelrahmen flach, von außen verschraubt

Tabelle 26: Beschreibung der Konstruktion - Prototyp P4

<b>Glas</b>	Standard-Isolierglas 6 / 12 / 6 mm Floatglas innen und außen	
<b>Klebstoff</b>	Sika Sikafast Zwei-Komponenten-Acrylat Klebefuge 2 x 10 mm	
<b>Koppelrahmen</b>	Furnierschichtholz, Birke 30 x 21 mm	
<b>Hauptrahmen</b>	Fichte keilgezinkt, S10 50 x 150 mm	

### 5.2.5 Prototyp P5 – Koppelrahmen schräg verschraubt

Tabelle 27: Beschreibung der Konstruktion - Prototyp P3

<b>Glas</b>	Standard-Isolierglas 6 / 12 / 6 mm Floatglas innen und außen	
<b>Klebstoff</b>	Sika SG 500 Zwei-Komponenten-Silikon Klebefuge 6 x 12 mm	
<b>Koppel- rahmen</b>	Fichte, S10 25 x 30 mm	
<b>Haupt- rahmen</b>	Fichte keilgezinkt, S10 50 x 150 mm	

### 5.2.6 Prototyp P6 – Koppelrahmen schräg verschraubt

Tabelle 28: Beschreibung der Konstruktion - Prototyp P6

<b>Glas</b>	Standard-Isolierglas 6 / 12 / 6 mm Floatglas innen und außen	
<b>Klebstoff</b>	Sika SikaFast Zwei-Komponenten-Acrylat Klebefuge 2 x 10 mm	
<b>Koppel- rahmen</b>	Fichte, S10 25 x 30 mm	
<b>Haupt- rahmen</b>	Fichte keilgezinkt, S10 50 x 150 mm	

### 5.3 Herstellung der Prototypen

Die Herstellung der Prototypen erfolgt in zwei Schritten. Es wird zunächst der Hauptrahmen (Primärtragwerk) hergestellt und unabhängig davon die Holz-Glas-Verbundelemente.

#### 5.3.1 Hauptrahmen

Die Hauptrahmen aller Prototypen werden aus keilgezinktem Fichtenholz, S10, hergestellt. Die Holzfeuchtigkeit liegt jeweils unter 15 %. Die Rahmenecken sind stumpf gestoßen, auf eine Einzapfung oder ähnliches wird bewusst verzichtet. Jeder Stoß wird durch zwei Holzschrauben 120 x 6 mm verschraubt. Die Rahmenecken sollen im Versuch als gelenkig betrachtet werden können.

Entstehende Sollmaßabweichungen der Hauptachsabstände sind auf das Aufsummieren von Dickentoleranzen, Verdrehungen der Hölzer um die eigene Achse und Herstellungsungenauigkeiten zurückzuführen. Auf ein Ausrichten des Rahmens wird an dieser Stelle bewusst verzichtet.



Abbildung 70: Herstellung der Hauptrahmen auf dem Richttisch (hier Prototyp P2)

#### 5.3.2 Holz-Glas-Verbundelement

Die Herstellungsmethodik der Holz-Glas-Verbundelemente richtet sich nach der Art des Klebstoffes. Es sind vor allem die Viskosität und die Topfzeit von Relevanz. Bei den hier verwendeten Klebstoffen (Silikon und Acrylat) sind unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Verklebung notwendig. Beide Methoden haben jedoch gemeinsam, dass zunächst die Koppelleisten auf dem Richttisch aufgespannt werden. Sie werden dabei eben und zueinander im rechten Winkel in Lage gehalten. Eine Verschraubung oder Verleimung der Eckstöße der Leisten erfolgt nicht. Alle verklebten Verbundelemente werden für mindestens 14 Tage bei Raumtemperatur gelagert, bevor sie in die Hauptrahmen montiert werden.

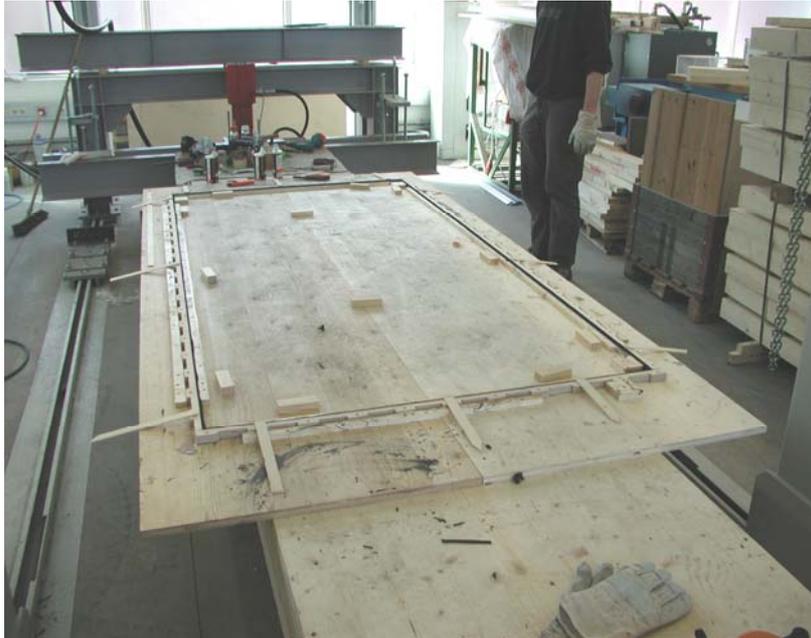
- **Vorgehensweise - Silikon-Klebstoffe:** Silikon-Klebstoffe sind pastös und haben eine Topfzeit von etwa 15 bis 30 Minuten. Bei der ausgeführten Herstellungsmethode wird die Klebefuge mit einer handgeführten Druckluftpresse appliziert. Anschließend wird die Glasscheibe eingehoben und auf die Kleberaupe aufgesetzt. Das bedeutet, dass vom ersten Ansetzen der Kleberaupe bis zum lagerichtigen Aufsetzen der Glasscheibe längstens die Topfzeit des Klebstoffes vergehen darf. Hier sind sämtliche Manipulationszeiten wie das Wechseln der Klebstoffkartusche, Korrigieren der Kleberaupe und Einrichten und Ablassen der Glasscheibe zu berücksichtigen. Verklebt man ohne Automatisierungstechnik, so kann dieser Zeitraum durchwegs knapp werden. Bei optimiertem Klebeprozess sollte es allerdings auch bei Handverklebungen von großen Scheiben keine Zeitprobleme geben.

Je nach gewünschter Dicke der Klebefuge werden nach dem Aufspannen des Koppelrahmens als Unterlage für die Glasscheibe Distanzklötze aufgelegt (siehe Abbildung 71). Deren Höhe setzt sich aus der Koppelrahmenleistendicke und der Klebefugendicke zusammen. Wird die Glasscheibe auf die Distanzklötze gelegt, so ergibt sich eine entlang ihres Umfanges konstante Klebefugendicke. Damit die Glasscheibe beim Ablassen auf die Klebefuge auch lagerichtig positioniert wird sind Führungen, zB. an den Ecken der Scheibe notwendig.

Die Glasscheibe muss in einem Vorgang eben auf die Kleberaupe aufgesetzt werden. Ein nochmaliges Abheben oder Verschieben der Scheibe ist nicht zulässig, da Lufteinschlüsse und Einschnürungen der Klebefuge auftreten werden. Der Einhebeprozess der Scheibe ist als kritisch und technisch anspruchsvoll zu sehen. Durch das Absetzen der Glasscheibe quillt überschüssiger Klebstoff seitlich aus der Fuge. Dieser Überstand kann abgezogen werden oder im festen Zustand bündig mit den Koppelrahmenleisten mit einer scharfen Klinge abgeschnitten werden.

Bis der Klebstoff ausgehärtet ist, muss das Verbundelement jedoch auf dem Richttisch belassen werden. Zweikomponenten-Silikone härten chemisch aus, wodurch die Aushärtezeit verringert und weitgehend unabhängig vom vorherrschenden Raumklima wird. Auf Grund der langen Aushärtezeit von Einkomponenten-Silikonen ist deren Einsatz als nicht praktikabel einzustufen.

- **Vorgehensweise - Acrylat-Klebstoff:** Der verwendete Acrylat-Klebstoff weist eine recht viskose Konsistenz auf, wodurch der aufgetragene Klebstoff als flache Raupe appliziert wird. Eine hohe Dreiecksraupe, wie bei pastösen Klebstoffen kann nicht hergestellt werden. Will man bei der Verbundelementverklebung wie bei den oben beschriebenen Silikon-Klebstoffen vorgehen, kommt man ohne automatisiertes Einheben der Glasscheibe deshalb nicht aus. Ein Einheben von Hand ist hier zu ungenau und zu langsam (Topfzeit 5 Minuten) um eine gewisse Prozesssicherheit zu erreichen.



**Abbildung 71: Aufgespannter Koppelrahmen**



**Abbildung 72: Detail – aufgespannter Koppelrahmen**

Aus diesen Gründen bietet es sich an, zuerst die Glasscheibe einzuheben und dann die Klebefuge seitlich auszuspritzen. Dazu wird der Koppelrahmen wie gehabt auf dem Richttisch aufgespannt und die passenden Distanzklötze innerhalb des Rahmens verteilt. Damit der Klebstoff durch das seitliche Einspritzen auf der Innenseite der Fuge nicht ausfließen kann werden kompressible, selbstklebende Moosgummistreifen auf die Koppelrahmenleisten geklebt. Die Glasscheibe wird nun eingehoben und exakt positioniert. Nun wird die Fuge mit dem Klebstoff ausgespritzt (siehe Abbildung 73), der Klebstoffüberstand wird abgezogen.



**Abbildung 73: Seitliches Ausspritzen der Fuge mit einem viskosen Klebstoff**

Wesentlicher Vorteil dieser Methode ist, dass der kritische Prozess des Glaseinhebens auf die Kleberaube entfällt. Hier kann die Glasscheibe in Ruhe positioniert und eingerichtet werden, erst wenn Lage und Fugenabstände stimmen, wird verklebt. Diese Methode kann auch bei pastösen Klebstoffen angewendet werden.

Da die Klebefuge von drei Seiten abgeschlossen ist (Holz, Glas und Moosgummiband) und der Aushärtvorgang dadurch beeinflusst werden könnte, ist insbesondere dieser Klebeprozess mit dem Klebstoffhersteller abzustimmen.

### 5.3.3 Toleranzmaße der Prototypen

Bei der Montage der Verbundelemente in die Hauptrahmenkonstruktion ist es wichtig, dass die Elemente passgenau an den für sie vorgesehenen Positionen befestigt werden können. Je nach Konstruktionsweise können Maßabweichungen konstruktiv ausgeglichen oder durch Verformung der elastischen Klebefuge aufgenommen werden. Das Anwendungsgebiet und die Herstellungsgenauigkeit der Rahmen kann dieses Toleranzausgleichsvermögen wesentlich für den baupraktischen Einsatz der Verbundelemente beeinflussen. Werden z.B. für den Fassadenbau Rahmenholzer aus dimensionsstabilen Holzwerkstoffen auf CNC-Fräsen vorgefertigt, so sind weitaus genauere Istmaße umsetzbar als etwa beim händischen Kappen von Stielen und Schwellen für Fertighauswandelemente aus keilgezinktem Vollholz.

Um einen Anhaltspunkt für dieses Ausgleichsvermögen zu erhalten werden die voneinander unabhängig hergestellten Hauptrahmen und Holz-Glas-Verbundelemente an mehreren Stellen vermessen. Entscheidend sind dabei die lichten Maße der Einbauöffnungen für die Verbundelemente bei den Prototypen P1 und P2 bzw. die lichten Maße der Hauptrahmen selbst bei den Prototypen P3 bis P6. Als Einbauöffnung gilt dabei der Abstand der Innenseiten der Aluminiumprofil-Stege (P1) bzw. der Sperrholzfedern (P2).

Die **Hauptrahmen** weisen auf Grund der gewählten Herstellungsmethodik und der gewählten Holzqualität relativ große Sollmaßabweichungen auf. Diese setzen sich zusammen aus:

- Querschnittsmaßabweichungen der Rahmenhölzer
- Verdrehung der Querschnitte entlang der Längsachse, materialbedingt

- Verdrehung der Querschnitte entlang der Längsachse, bedingt durch stumpfes Verschrauben der Hauptrahmenecken
- Lageungenauigkeiten bei den stumpfen Stöße der Hauptrahmenecken

Die Holz-Glas-Verbundelemente können recht maßhaltig gefertigt werden, da sie auf einem Richttisch hergestellt werden und Anschlagleisten verwendet werden. Vor allem steifere Verklebungen können sehr genau hergestellt werden. Bei hohen Koppelrahmenleisten, die elastisch verklebt werden, kann es nach dem Ausspannen aus dem Richttisch zu Verdrehungen der Koppelrahmenleisten kommen, welche sich bei der Montage ohne Probleme zurückbilden.

Die Maßabweichungen der **Verbundelemente** setzten sich zusammen aus:

- Querschnittsmaßabweichungen der Koppelrahmenleisten
- Verdrehung der Leisten entlang der Längsachse, materialbedingt
- Verdrehung der Leisten entlang der Längsachse, bedingt durch die Verklebung

**Tabelle 29: Maßabweichungen der hergestellten Prototypen vom Sollmaß in mm**

	Hauptrahmen		Verbundelement	
	lichte Breite	lichte Höhe	Passbreite	Passhöhe
<b>P 1</b>	-2 bis -1	-1 bis 0	-3 bis -1	-2
<b>P 2</b>	+2 bis +3	+1	-3 bis -2	-1
<b>P 3</b>	+2 bis +6	± 0	± 0	± 0
<b>P 4</b>	+1 bis +4	-1	± 0	-1
<b>P 5</b>	± 0	-1	-1 bis 0	± 0
<b>P 6</b>	+3 bis +4	-1	0 bis +1	± 0

Detaillierte Darstellungen der gemessenen Positionen sind in Anhang C enthalten.

#### 5.4 Montage der Prototypen

Die Montage der Verbundelemente in die Hauptrahmen wird als Test der Praxistauglichkeit der verschiedenen Konstruktionstypen durchgeführt. Dazu wird der Hauptrahmen vertikal aufgestellt um eine reale Einbausituation zu schaffen. Das jeweilige Holz-Glas-Verbundelement wird mit einem Kran eingehoben und positioniert. Nach der Feinjustage erfolgt die Verschraubung mit dem Hauptrahmen. Ob das Verbundelement bündig in den Rahmen passt hängt von der Herstellungsgenauigkeiten ab.



Abbildung 74: Aufstellen des Rahmens



Abbildung 75: Montage des Verbundelementes

Hinsichtlich der Montage kann man die untersuchten Konstruktionsvarianten in Konstruktionen mit Seitenanschlag und ohne Seitenanschlag unterteilen.

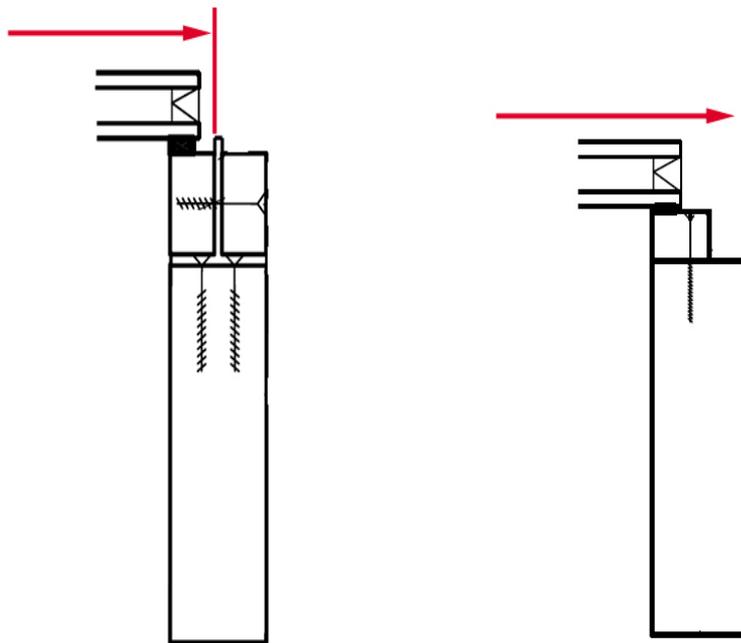


Abbildung 76: Konstruktion mit Seitenanschlag (P1 links) und ohne Seitenanschlag (P4 rechts)

- **Konstruktion mit Seitenanschlag – Prototyp P1 und P2:** Die Koppelrahmenleisten werden bei der Verschraubung an den Seitenanschlag gezogen. Bei Prototyp P1 wäre dies der Steg des Aluminiumprofils und bei Prototyp P2 wäre dies die Sperrholzfeder. Achsmaßabweichungen des Hauptrahmens werden durch Verformung der Klebefuge oder gar nicht ausgeglichen. Bei zu geringer Zugwirkung der Schrauben kann auch

eine bleibende Fuge zwischen Seitenanschlag und Koppelrahmen bleiben. Das Herstellen einer bündigen Innenansicht entlang des gesamten Umfanges scheint praktisch nicht möglich.

- **Konstruktion ohne Seitenanschlag – Prototyp P3, P4, P5, P6:** Das Verbundelement liegt ohne seitlichen Anschlag frei auf dem Hauptrahmen auf. Es kann also in der Ebene nach zwei Achsen verschoben und positioniert werden. Die Einbausituation wird dadurch zwar verbessert, allerdings ist auch bei dieser Konstruktionsweise bei Achsmaßabweichungen des Hauptrahmens eine bündige Montage nur sehr schwer möglich. Man hat jedoch einen gewissen Spielraum, die Toleranzen aufzuteilen und das Verbundelement mittig im Hauptrahmen montieren.



Abbildung 77: bündiger Eckbereich – P1

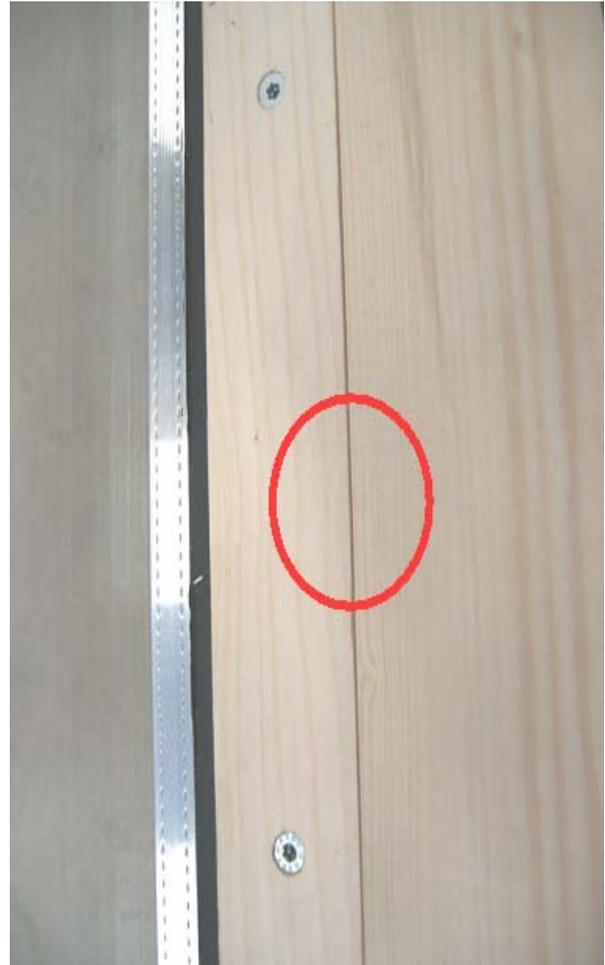


Abbildung 78: leichter Kantenversatz – P2



**Abbildung 79: bündiger Eckbereich – P3**



**Abbildung 80: Eckversatz – P2**

## 5.5 Versuchsanordnung

Die experimentelle Untersuchung der Prototypen soll Aufschluss über deren Aussteifungsvermögen bringen. Die Versuche laufen in zwei Schritten ab. Zuerst wird am jeweiligen Prototyp ein Vorversuch durchgeführt und im Anschluss ein Bruchlastversuch. Der Aufbau ist bei beiden Versuchen gleich. Unterschiedlich ist lediglich die Belastungsgröße und der Belastungsablauf.

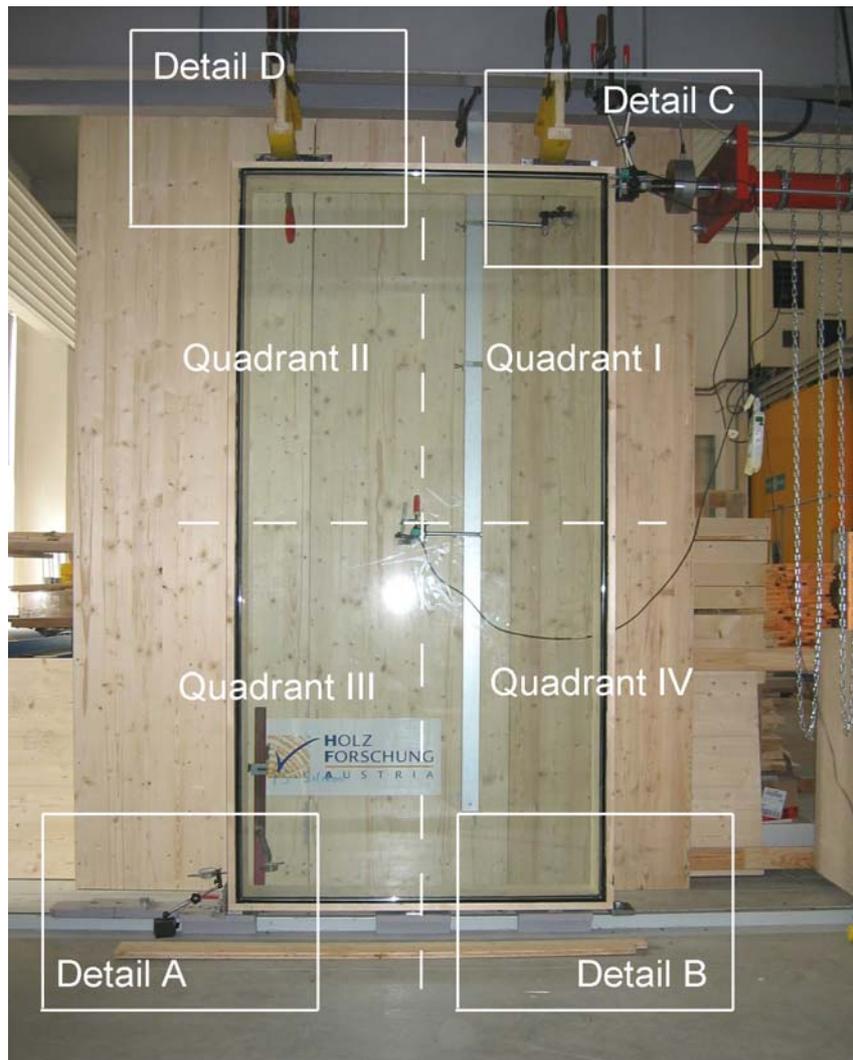
Als wesentliche Messgrößen werden die horizontale Verschiebung der Kopfschwelle und die aufgebrachte Kraft gemessen. Zur Erfassung der Klebstoffeinflüsse wird die relative Verschiebung der Verklebten Glasscheibe zum Hauptrahmen gemessen.

Durch Videonahaufnahmen wird das Bruchverhalten und die Rissausbreitung dokumentiert.

In Kapitel 5.6 werden Belastungs- und Verformungskurven aus den Vorversuchen und den Bruchversuchen aller sechs Prototypen angegeben. Die wichtigsten Kenndaten sind tabellarisch zusammengefasst, charakteristische Bruchbilder werden gezeigt.

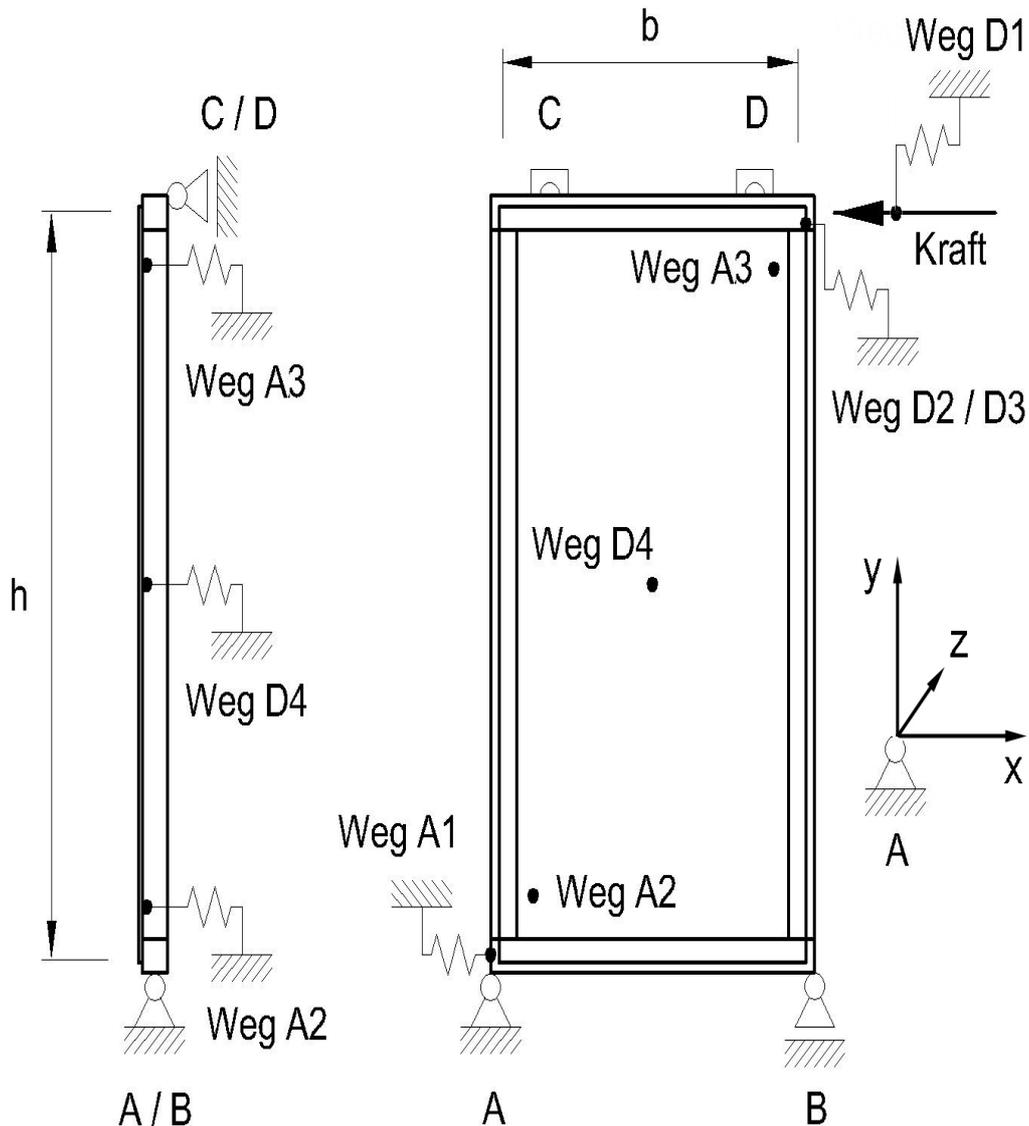
### 5.5.1 Versuchsaufbau

Das Versuchsfeld besteht aus einer Stahlrahmenkonstruktion, in die der jeweilige Prototyp stehend eingebaut wird. Die Belastung erfolgt durch einen elektronisch gesteuerten Hydraulikzylinder mit einer Höchstkraft von 100 kN. Die Kraft wird durch eine am Zylinderkolben befestigte Kraftmessdose gemessen. Der Kolbenweg wird durch einen im Zylinder eingebauten Wegsensor gemessen. Die elektronischen Messdaten werden an eine zentrale Recheneinheit übergeben durch die der Hydraulikzylinder geregelt wird. Die Versuchsanlage erfüllt die Anforderungen der Genauigkeitsklasse 1. Der Zylinder ist horizontal eingebaut und kann stufenlos in der Höhe verstellt werden. Die Ausrichtung des Zylinders erfolgt derart, dass die Kolbenachse auf einer Linie mit der Kopfschwellenachse im unverformten Zustand liegt. Zur Orientierung wird der Prototyp in vier Quadranten geteilt (siehe Abbildung 81). Die Lasteinleitung erfolgt in Quadrant I.



**Abbildung 81: Versuchsaufbau für die Belastungsversuche an den Prototypen**

Der Prototyp wird an vier Punkten gelagert. Die Lagerungsmethodik, insbesondere die Zugverankerung richtet sich nach baupraktischen Methoden. Ein dadurch bedingter geringfügiger Schlupf bei den Auflagern wird zu Gunsten einer realitätsnahen Systemabbildung in Kauf genommen. Die Erfassung dieses Schlupfes erfolgt durch Überwachungswegmessungen an den Auflagern um so qualitativ in die Versuchsinterpretation einzufließen.



Kraft	Krafteinleitung in der Hauptachse der Kopfschwelle
Weg A1 bis A3	analoge Wegmessung, vorrangig zur Systemüberwachung
Weg D1 bis D4	digitale Wegmessung, zur Versuchsanalyse
A, B, C, D	Auflager des Prototypen
h	Rasterhöhe des Prototypen, 250 cm
b	Rasterbreite des Prototypen, 125 cm

**Abbildung 82: Prüfaufbau – Lagerung, Krafteinleitung und Wegmessung**

Der Wegmesser *Weg D1* ist im Hydraulikzylinder eingebaut und misst die Kopfauslenkung des Prototyps. Dieses Maß dient auch als Regelgröße für den Weg-geregelten Kolbenvorschub. Die Rotation bzw. die Relativverschiebung der geklebten Glasscheibe (innere Isolierglasscheibe) wird durch *Weg D2* gemessen. Es wurde auch die Bewegung der äußeren Isolierglasscheibe durch *Weg D3* abgenommen, um bei Glasbruch der aussteifenden Scheibe ein Feedback auf das Randverbundverhalten zu bekommen.



**Abbildung 83: Prüfaufbau Detail C – Kräfteinleitungspunkt (Weg D2, D3 und A3)**

Durch die Messachse *Weg A2* – *Weg D4* – *Weg A3* wird festgestellt, ob ein Stabilitätsproblem (Beulen) durch die Druckbelastung in der aussteifenden Glasscheibe auftritt. Durch *Weg A1* soll zum einen eine Festlagerverschiebung durch den horizontalen Schub im Auflager ausgeschlossen werden und zum anderen gegebenenfalls elastische und plastische Verformungsanteile in der Festlager-Rahmenecke erfasst werden.



**Abbildung 84: Prüfaufbau Detail A – Fixpunktmessung am Festlager (Weg A1 und A2, Lager A)**

Das Lager A wird als Festlager ausgeführt mit einem horizontalen Anschlag für die Fußschwelle. Auch der Fußpunkt des Stieles wird durch den Anschlag horizontal gehalten. Die Überlappung Anschlagwinkel / Stiel wird allerdings gering gehalten, um dessen Rotation nicht zu behindern und den Anforderungen eines gelenkigen Anschlusses weitestgehend zu genügen. Lager B wirkt als Loslager und nimmt die auftretenden Zugkräfte auf. Hierzu wird eine hochbelastbare Zugverankerung durch ein verschraubtes Blech hergestellt (siehe Abbildung 85). Im Verlauf der Versuche wurde die Verankerung für die semi-elastisch verklebten Prototypen adaptiert indem die Klemmplatte samt Verschraubung verstärkt wurde.



**Abbildung 85: Prüfaufbau Detail B –  
Zugverankerung (Lager BB)**



**Abbildung 86: Zugverankerung nach  
der Adaptierung**

Da die Aussteifungsebene nicht in der Hauptachsenebene liegt tritt ein Torsionsmoment um die Prototypen-Hochachse auf, welches im vorliegenden Fall eine Rotation des Prototypenkopfes gegen den Uhrzeigersinn verursacht. Um eine Verformung des Prototypen ausschließlich in der Hauptachsenebene zuzulassen wird die Kopfschwelle durch die Gleitlager *Lager C* und *Lager D* geführt. Diese nehmen das auftretende Torsionsmoment auf und bewerkstelligen eine geradlinige Verschiebung der Kopfschwelle in Belastungsrichtung. Eine exakt vertikale Ausrichtung der Prototypen wird durch das Einlegen von Blechstreifen erreicht. Die Schmierung erfolgt mit Grafitpaste.



**Abbildung 87: Prüfaufbau Detail D – Gleitführung der Kopfschwelle (Lager C und D)**

### 5.5.2 Vorgehensweise Vorversuch

Beim Vorversuch wird der Prototyp zyklisch be- und entlastet. Die Kraft wird an der Hauptachse des oberen Riegels eingeleitet, wodurch eine Aussteifungsbelastung in der Elementebene simuliert wird. Bei jedem Zyklus wird die Belastung um 200 N gesteigert. Der Vorversuch wird abgebrochen, solange sich die Verformung des Prototypen noch im elastischen Bereich befindet. Als Grenzwert für die Belastung im Vorversuch wird für elastisch verklebte Prototypen eine Kopfverschiebung von  $h/300$  angesetzt (Grenzverformungskriterium). Das bedeutet, dass die Lastzyklen solange gesteigert werden, bis eine Kopfverschiebung von 8,3 mm auftritt. Bei den semi-elastisch verklebten Prototypen wird die Grenzkopfverschiebung für die Zyklusbelastungen auf  $h/350$ , also 7,1 mm fixiert. Diese Grenzwerte dienen zur Festlegung von  $F_{\max, \text{est}}$  für die Bruchlastversuche. Die Be- und Entlastung erfolgt wegeregelt mit einer Kolbenvorschubgeschwindigkeit von 5 mm / min.

### 5.5.3 Vorgehensweise Bruchversuch

Der anschließende Bruchlastversuch wird mit dem bereits in den Vorversuchen belasteten Prototypen durchgeführt. In Anlehnung an die ÖNORM EN 594 erfolgt dabei ein Belastungsablauf, der sich aus einem Stabilisierungs-Lastzyklus, einem Steifigkeits-Lastzyklus und der Belastung bis zum Bruch zusammensetzt.

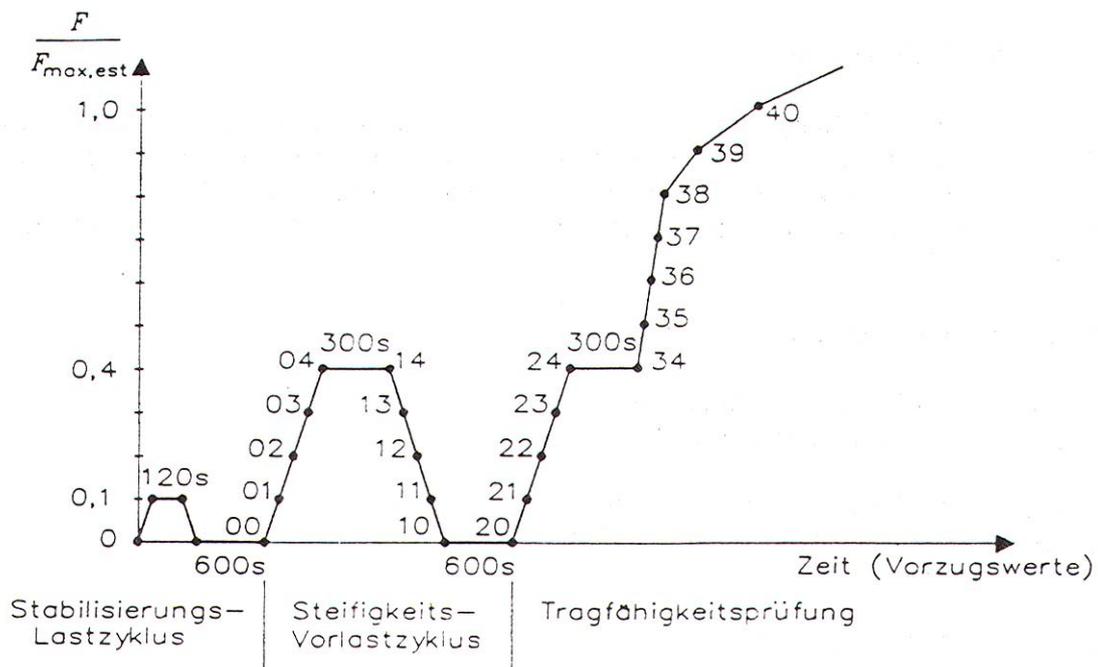


Abbildung 88: Belastungszyklen für eine Wandscheibenprüfung nach ÖNORM EN 594

Die Lastzyklen werden aus der Norm übernommen, wobei die angesetzten Kräfte nach Abbildung 88 0,1 bzw. 0,4 x  $F_{\max, \text{est}}$  betragen. Nach ÖNORM EN 594 ist für  $F_{\max, \text{est}}$  die geschätzte maximale Wandscheibenlast einzusetzen. Für die elastisch verklebten Prototypen wird hier jene Kraft verwendet, die beim Grenzverformungskriterium der Vorversuche erreicht wurde (= Maximalkraft des jeweiligen Zyklus).  $F_{\max, \text{est}}$  liegt bei allen elastisch verklebten Prototypen in der Gegend von 2,80 kN.

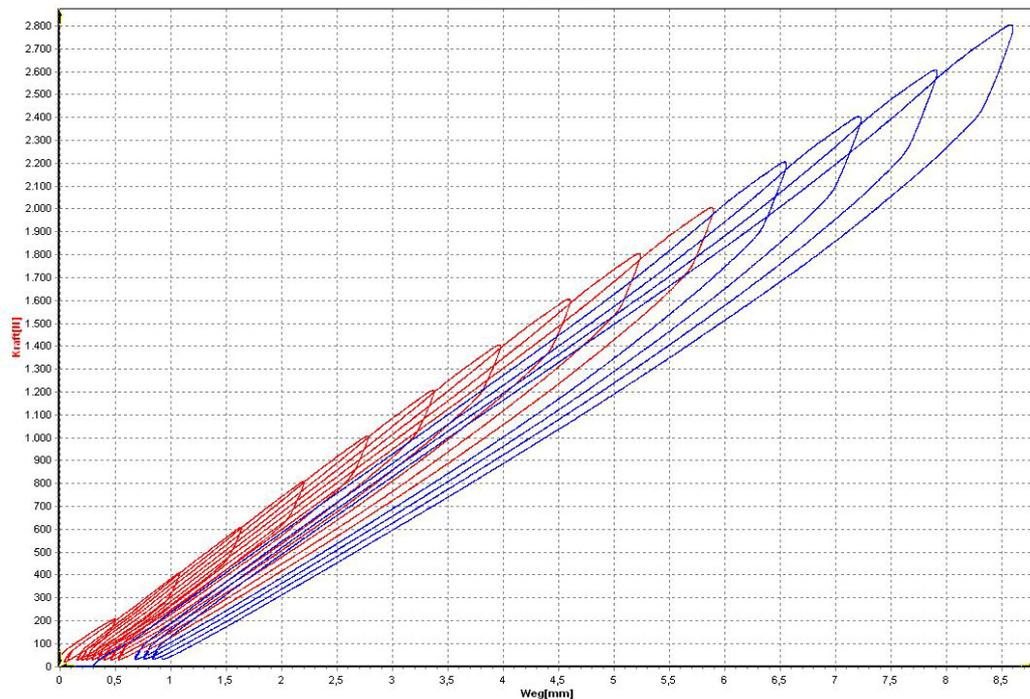
Da bei den Vorversuchen der beiden semi-elastisch verklebten Prototypen ein markant unterschiedliches Verformungsverhalten festgestellt wurde, welches auf die unterschiedliche Verschraubungssystematik zurückzuführen ist, wären nun auch unterschiedliche Werte für  $F_{\max, \text{est}}$  anzusetzen. Es wurde allerdings für beide Prototypen  $F_{\max, \text{est}}$  mit 7,75 kN abgeschätzt. Die Begründung liegt in der Tatsache, dass bei beiden Prototypen der selbe Klebstoff verwendet wurde und dieser auch das voraussichtliche Bruchkriterium sein wird. Da den Einflüssen des Stabilisierungslastzyklus und des Steifigkeitslastzyklus im vorliegenden Versuchsprozess eine sekundäre Rolle eingeräumt wird (eine Vorbelastung hat in den Vorversuchen bereits stattgefunden), erscheint diese Festlegung von  $F_{\max, \text{est}}$  angebracht.

Die Belastungszeiten der einzelnen Zyklen entsprechen den Vorgaben aus der Norm. Die Be- und Entlastung im Kraftbereich von 0 bis  $0,4 \times F_{\max, \text{est}}$  erfolgt mit einer Geschwindigkeit von 2 mm / min. Ab  $0,4 \times F_{\max, \text{est}}$  wird die Geschwindigkeit auf 4 mm / min gesteigert.

## 5.6 Ergebnisse

### 5.6.1 Prototyp P1 – Koppelrahmen auf Aluprofil

#### 5.6.1.1 Vorversuch



x-Achse	Weg D1
y Achse	Kraft
v Belastung	5 mm/min
v Entlastung	5 mm/min
Haltezeit bei $F_{\max}$	0 sec
Haltezeit bei $F_{\min}$	0 sec
Kraftsteigerung	+ 200 N / Zyklus
rot	Zyklus 1 bis 10
blau	Zyklus 11 bis 14

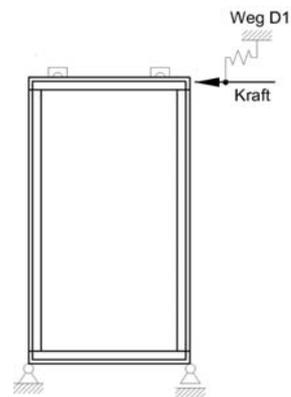


Abbildung 89: Verformungsverhalten – Prototyp P1

- bleibende Verformung

Nach jedem Zyklus kann eine bleibende Kopfverschiebung im Kraft-Weg-Diagramm abgelesen werden. Nach Durchlaufen von zehn Zyklen bleiben 0,9 mm Kopfverschiebung im System.

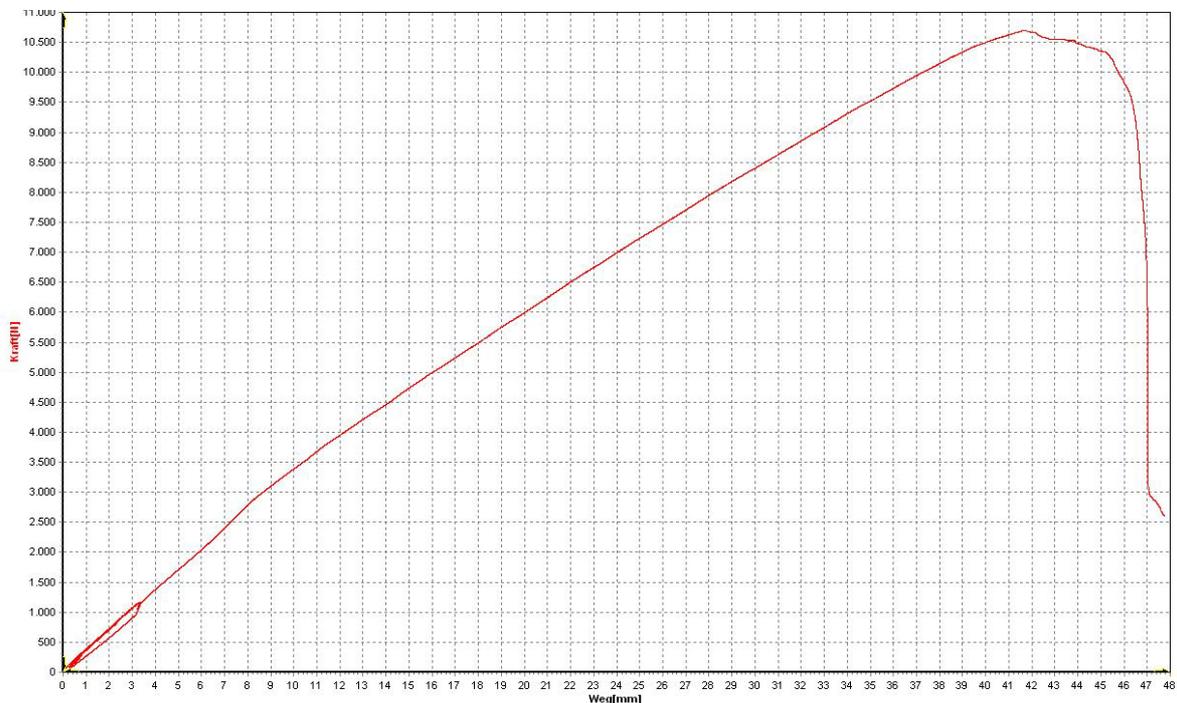
- Belastungsverhalten

Es ist ersichtlich, dass sich die Belastungskurve bei jedem Zyklus um den Anteil der bleibenden Verformung aus dem vorhergehenden Zyklus verschiebt. Deren Winkel bleibt annähernd unverändert, es ist lediglich ein geringes Abflachen festzustellen. Bei stark überhöhter Darstellung der Belastungskurve ist eine Muldenbildung im oberen Drittel der Belastungslinie zu erkennen. Diese Mulde tritt bei allen vier mit Silikon geklebten Prototypen in unterschiedlichen Ausprägungen auf.

- Entlastungsverhalten

Charakteristisch für die Entlastung ist der zunächst steilere Abfall der Kurve, welche nach einem Kraftabfall von etwa einem Sechstel recht abrupt flacher wird.

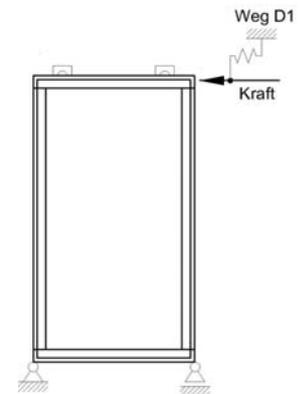
### 5.6.1.2 Bruchversuch



x-Achse	Weg D1
y Achse	Kraft
v von 0 bis 0,4 x Fmax, est	2 mm/min
v ab 0,4 x Fmax, est	4 mm/min
Fmax, est	2,800 kN

Abfolge:

Haltezeit bei 0,1 x Fmax, est	120 sec
Haltezeit unbelastet	600 sec
Haltezeit bei 0,4 x Fmax, est	300 sec
Haltezeit unbelastet	600 sec
Haltezeit bei 0,4 x Fmax, est	300 sec
Bruchbelastung	



**Abbildung 90: Verformungsverhalten – Bruchversuch – Prototyp P1**

- Belastungsverhalten

Ein deutlicher Knick zeigt sich in der Belastungskurve bei etwa 2,80 kN Horizontalbelastung (=Maximalkraft des Vorversuches). Nach diesem Knick wird die Kurve etwas flacher. Dieser Effekt tritt bei allen elastisch verklebten Prototypen auf.

- Bruchverhalten

Der Anriss begann in der Ecke bei der Zugverankerung im Quadrant IV und schritt hauptsächlich entlang des rechten Stieles nach oben. Anteilig riss die Klebefuge ausgehend vom Anriss entlang der Fußschwelle in Richtung Quadrant III. Der Riss blieb allerdings auf den Eckbereich im Quadrant IV beschränkt. Es trat ausschließlich Kohäsionsbruch in der Klebefuge auf. Im Bereich der Zugverankerung konnte keine plastische Verformung festgestellt werden.



Abbildung 91: Kohäsionsbruch



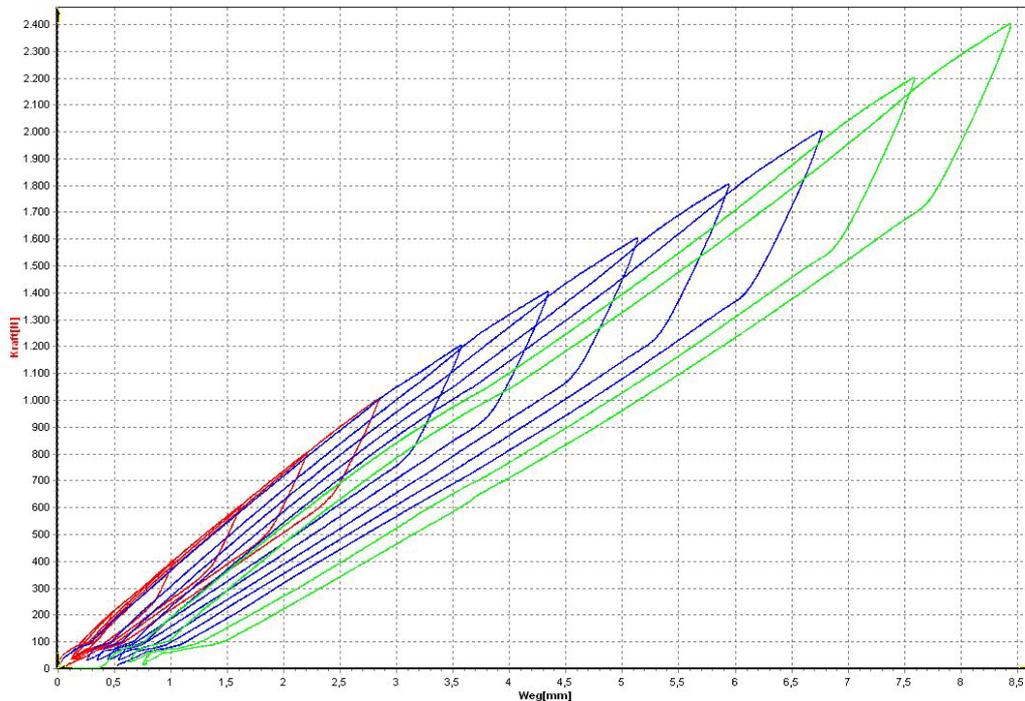
Abbildung 92: Kohäsionsbruch in der Klebefuge – Quadrant IV

Tabelle 30: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse – Prototyp P1

<b>Horizontallast bei H/500 Kopfverschiebung</b>	1,752 kN
<b>Bruchlast:</b>	10,692 kN
<b>Bruchverschiebung</b>	41,60 mm

## 5.6.2 Prototyp P2 – Koppelrahmen an Sperrholzsteg

### 5.6.2.1 Vorversuch



x-Achse	Weg D1
y Achse	Kraft
v Belastung	5 mm/min
v Entlastung	5 mm/min
Haltezeit bei $F_{max}$	0 sec
Haltezeit bei $F_{min}$	0 sec
Kraftsteigerung	+ 200 N / Zyklus
rot	Zyklus 1 bis 5
blau	Zyklus 6 bis 10
grün	Zyklus 11 und 12

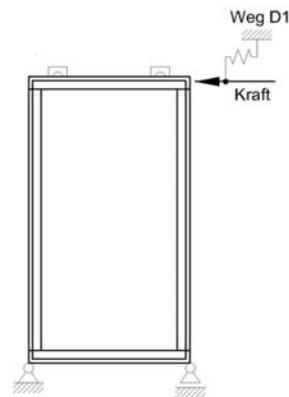


Abbildung 93: Verformungsverhalten – Prototyp P2

- bleibende Verformung

Nach jedem Zyklus kann eine bleibende Kopfverschiebung im Kraft-Weg-Diagramm abgelesen werden. Nach Durchlaufen von zwölf Zyklen bleiben 0,75 mm Kopfverschiebung im System.

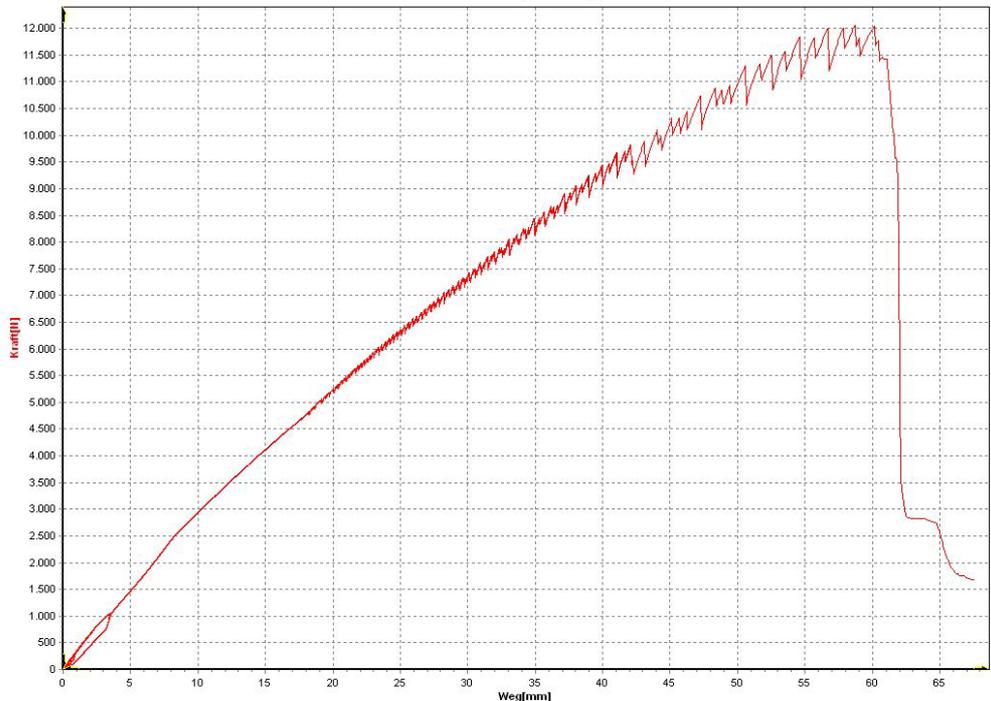
- Belastungsverhalten

Bei diesem Versuch erkennt man, dass sich die Belastungslinie erst ab dem fünften Zyklus merklich zu verschieben beginnt. Die Linie selbst kann als parallel verschoben angesehen werden, ihr Winkel bleibt unverändert. Wird sie stark überhöht dargestellt, ist eine Muldenbildung in der oberen Hälfte der Belastungslinien zu erkennen. Diese Mulde tritt bei allen vier mit Silikon geklebten Prototypen in unterschiedlichen Ausprägungen auf.

- Entlastungsverhalten

Wie bei Prototyp P1 ist auch hier der zunächst steilere Abfall der Kurve klar ersichtlich. Nach einem Kraftabfall von etwa einem Viertel flacht die Kurve abrupt ab.

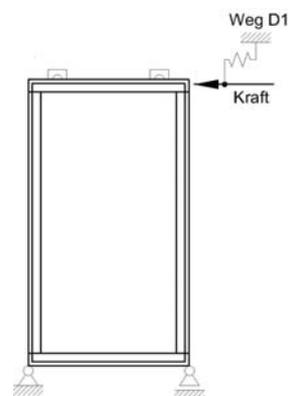
### 5.6.2.2 Bruchversuch



x-Achse	Weg D1
y Achse	Kraft
v von 0 bis 0,4 x Fmax, est	2 mm/min
v ab 0,4 x Fmax, est	4 mm/min
Fmax, est	2,400 kN

Abfolge:

Haltezeit bei 0,1 x Fmax, est	120 sec
Haltezeit unbelastet	600 sec
Haltezeit bei 0,4 x Fmax, est	300 sec
Haltezeit unbelastet	600 sec
Haltezeit bei 0,4 x Fmax, est	300 sec
Bruchbelastung	



**Abbildung 94: Verformungsverhalten – Bruchversuch – Prototyp P2**

- Belastungsverhalten

Ein deutlicher Knick zeigt sich in der Belastungskurve bei etwa 2,50 kN Horizontalbelastung (~Maximalkraft des Vorversuches). Nach diesem Knick wird die Kurve etwas flacher. Dieser Effekt tritt bei allen elastisch verklebten Prototypen auf.

Die Zacken in der Belastungskurve sind auf Reibungseffekte in der Kopfführung (Lager C, D) zurückzuführen. Nach Adaptierung der Führung für die folgenden Versuche ist diese Reaktion nicht mehr aufgetreten.

- Bruchverhalten

Das Versagen des Prototypen begann mit einem Anriss in der Klebefuge im Quadrant I, genau im Eckbereich bei der Lasteinleitung. Von dort aus riss die Klebefuge in beide Richtungen (entlang des rechten Stieles nach unten und entlang der Kopfschwelle nach links) weiter.



**Abbildung 95: Kohäsionsbruch in der Klebefuge – Quadrant II**

Es war deutlich zu erkennen, dass die Glasscheibe nach dem Anriss in der Ecke nicht nur in ihrer Ebene rotierte, sondern auch aus der Ebene drang. Die Glasecke im Quadrant I hob sich deutlich vom Holzrahmen ab. Es lag also ein dreidimensionaler Spannungszustand in der Klebefuge vor. In der Endlage bei maximaler Verformung hob sich die Glasecke in Quadrant I ca. 12 mm von ihrer ursprünglichen Position in z-Richtung ab.



**Abbildung 96: Kohäsionsbruch in der Klebefuge – Quadrant II**

Der Klebstoff brach kohäsiv in der Klebefuge, es konnte keine Haftungsfehlstellen an Holz oder Glas erkannt werden. Es konnte auch kein Glasbruch oder Holzbruch festgestellt werden.



**Abbildung 97: Anriss bei der Kraftereinleitung – die Verklebung in der unteren Elementhälfte bleibt intakt**

**Tabelle 31: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse – Prototyp P2**

<b>Horizontallast bei H/500 Kopfverschiebung</b>	1,572 kN
<b>Bruchlast:</b>	12,052 kN
<b>Bruchverschiebung</b>	58,74 mm

### 5.6.3 Prototyp P3 – Koppelrahmen flach, von außen verschraubt

#### 5.6.3.1 Vorversuch

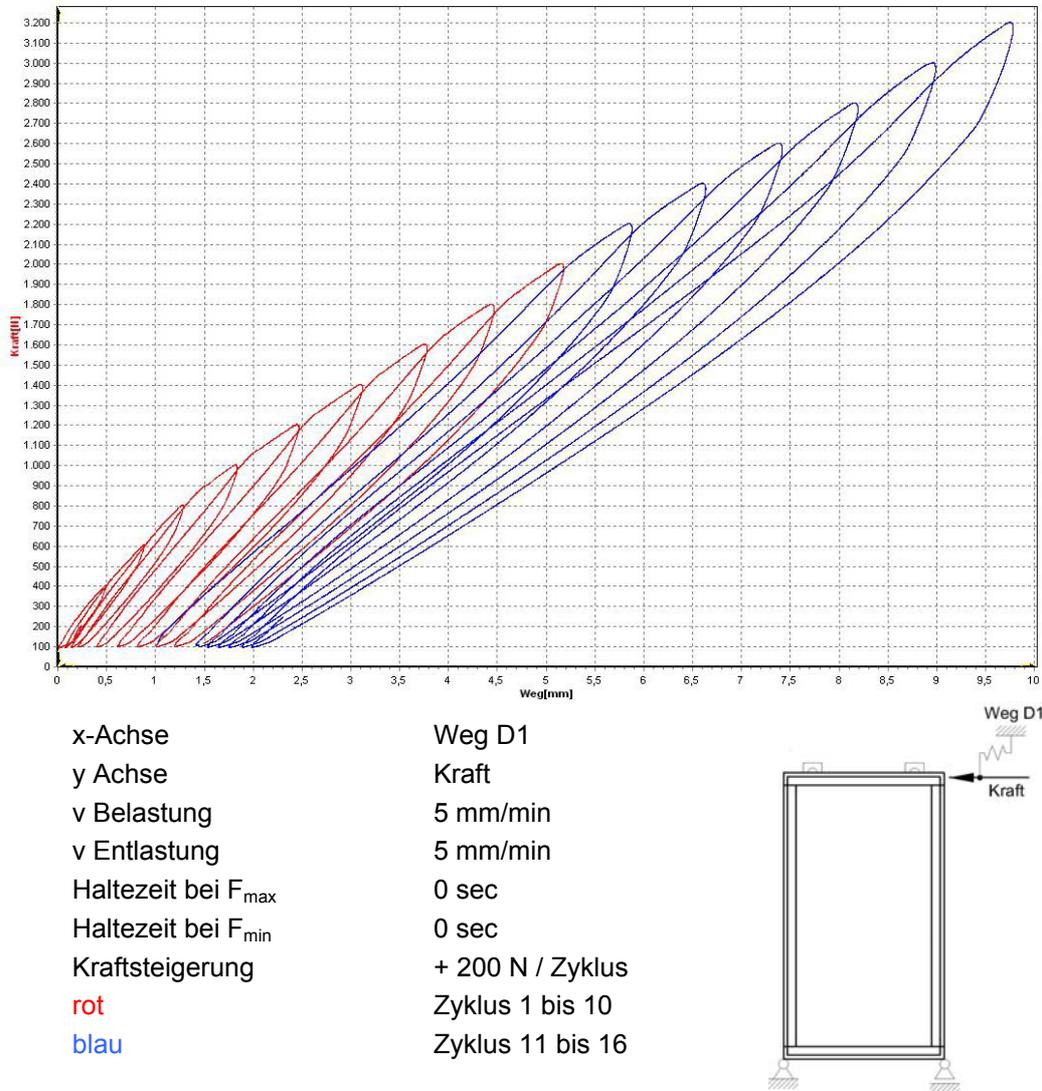


Abbildung 98: Verformungsverhalten – Prototyp P3

- bleibende Verformung

Nach jedem Zyklus kann eine bleibende Kopfverschiebung im Kraft-Weg-Diagramm abgelesen werden. Nach Durchlaufen von sechzehn Zyklen bleiben 1,98 mm Kopfverschiebung im System.

- Belastungsverhalten

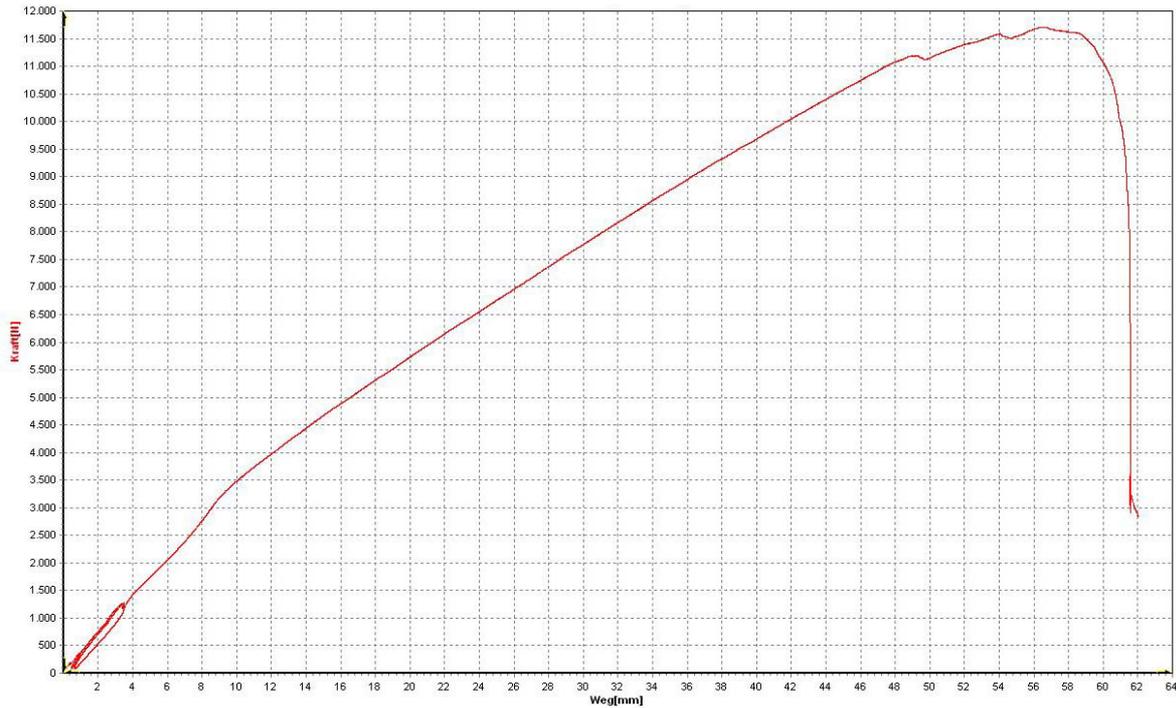
Die Belastungslinien verschieben sich mit jedem Zyklus um einen Anteil der bleibenden Verformung. Die Linie selbst wird mit zunehmender Anzahl der Zyklen flacher. Die Ausprägung einer Mulde in der oberen Hälfte der Belastungskurven wird mit jedem Zyklus kontinuierlich stärker. Diese Mulde tritt bei allen vier mit Silikon geklebten Prototypen in unterschiedlichen Ausprägungen auf. Auffallend ist bei diesem Vorversuch, dass die Belastungslinie bei jedem Zyklus nach passieren der Höchstkraft aus dem vorhergehenden

Zyklus knickt und mit flacherem Winkel weiterverläuft. Dieser Effekt ist bei den ersten Zyklen ausgeprägter.

- Entlastungsverhalten

Auch hier ist, analog zu den anderen elastisch verklebten Systemen ein zunächst steilerer Abfall der Kurve erkennbar. Nach einem Kraftabfall von etwa einem Sechstel flacht die Kurve ab, wobei es sich hier um einen eher sanften Übergang vom Steilen ins Flache handelt.

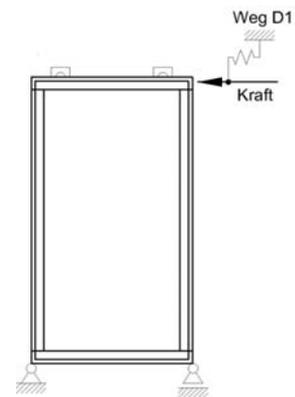
### 5.6.3.2 Bruchversuch



x-Achse	Weg D1
y Achse	Kraft
v von 0 bis 0,4 x Fmax, est	2 mm/min
v ab 0,4 x Fmax, est	4 mm/min
Fmax, est	3,000 kN

Abfolge:

Haltezeit bei 0,1 x Fmax, est	120 sec
Haltezeit unbelastet	600 sec
Haltezeit bei 0,4 x Fmax, est	300 sec
Haltezeit unbelastet	600 sec
Haltezeit bei 0,4 x Fmax, est	300 sec
Bruchbelastung	



**Abbildung 99: Verformungsverhalten – Bruchversuch – Prototyp P3**

- Belastungsverhalten

Ein deutlicher Knick zeigt sich in der Belastungskurve bei etwa 3,20 kN Horizontalbelastung (=Maximalkraft des Vorversuches). Nach diesem Knick wird die Kurve etwas flacher. Dieser Effekt tritt bei allen elastisch verklebten Prototypen auf.

- Bruchverhalten

Das Versagen des Prototypen wurde durch zwei Anrisse eingeleitet. Zuerst erfolgte in der Ecke beim Krafteinleitungspunkt ein Anriss mit Rissfortpflanzung entlang des rechten Stieles nach unten. Kurz darauf begann der zweite Anriss in der Ecke im Quadrant II.



**Abbildung 100: Kohäsionsbruch in der Klebefuge – Kopfschwelle**

Dieser Riss pflanzte sich hauptsächlich entlang der Kopfschwelle in Richtung Krafteinleitung fort, jedoch auch anteilig entlang des linken Stieles nach unten. Nach Erreichen der Maximallast erfolgte ein rasches Durchreißen etwa der letzten 40 cm der Klebefuge an der Kopfschwelle.



**Abbildung 101: Kohäsionsbruch der Klebefuge – Ecke Quadrant II**



**Abbildung 102: Kohäsionsbruch der Klebefuge – Stiel Quadrant II**

Ein dritter Anriss konnte in der Ecke des Quadranten IV festgestellt werden. Hier riss die Klebefuge von der Ecke ausgehend entlang des rechten Stieles etwa 30 cm nach oben.

Grundsätzlich trat Adhäsionsbruch in der Klebefuge auf. In einem kurzen, etwa 8 cm langen Teilstück der Verklebung, im oberen Bereich des linken Stieles trat auch Adhäsionsversagen in der BFU-Koppelrahmenleiste auf. Es konnte kein Glasbruch festgestellt werden.

**Tabelle 32: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse – Prototyp P3**

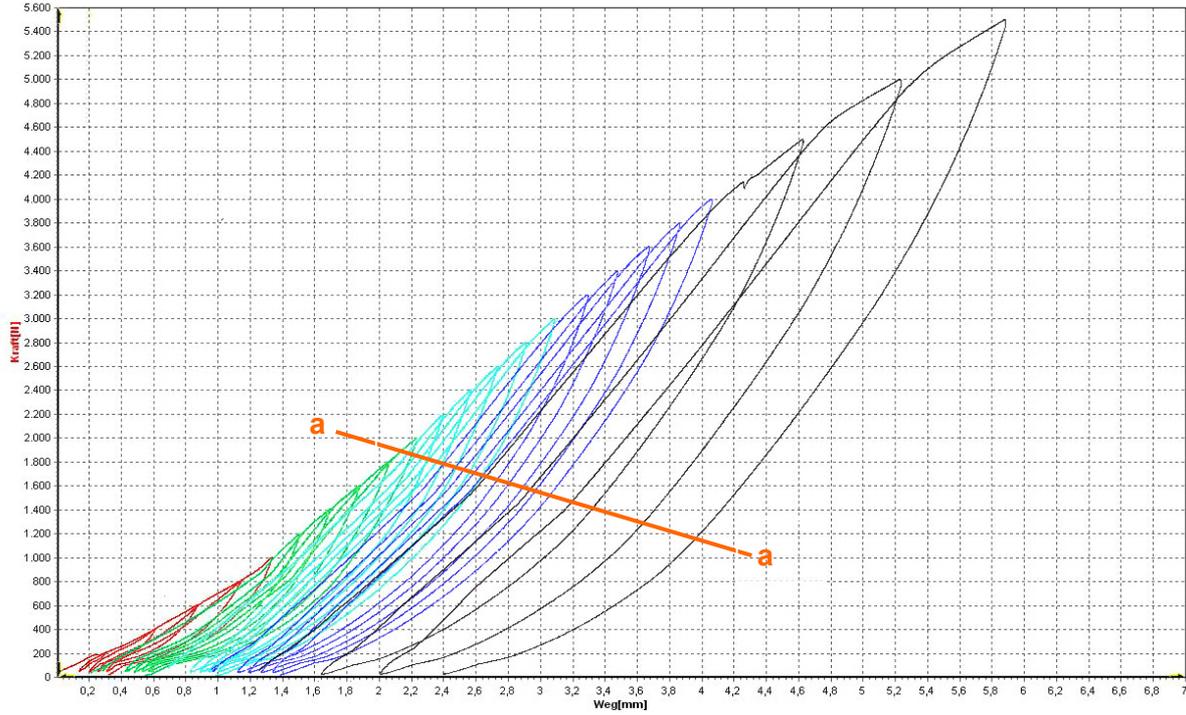
<b>Horizontallast bei H/500 Kopfverschiebung</b>	1,963 kN
<b>Bruchlast:</b>	11,706 kN
<b>Bruchverschiebung</b>	56,46 mm



**Abbildung 103: Versagen der Klebefuge bei Volllast – die Verklebung der unteren Verbundelementhälfte bleibt weitestgehend intakt**

## 5.6.4 Prototyp P4 – Koppelrahmen flach, von außen verschraubt

### 5.6.4.1 Vorversuch



x-Achse	Weg D1
y Achse	Kraft
v Belastung	5 mm/min
v Entlastung	5 mm/min
Haltezeit bei $F_{max}$	0 sec
Haltezeit bei $F_{min}$	0 sec
Kraftsteigerung	+ 200 N / Zyklus + 300 N / Zyklus ab Zyklus 21
rot	Zyklus 1 bis 5
grün	Zyklus 6 bis 10
cyan	Zyklus 11 bis 15
blau	Zyklus 16 bis 20
schwarz	Zyklus 21 bis 23

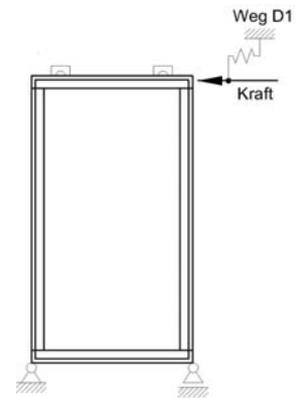


Abbildung 104: Verformungsverhalten – Prototyp P4

- bleibende Verformung

Nach jedem Zyklus kann eine bleibende Kopfverschiebung im Kraft-Weg-Diagramm abgelesen werden. Nach Durchlaufen von 21 Zyklen bleiben 2,40 mm Kopfverschiebung im System.

- Belastungsverhalten

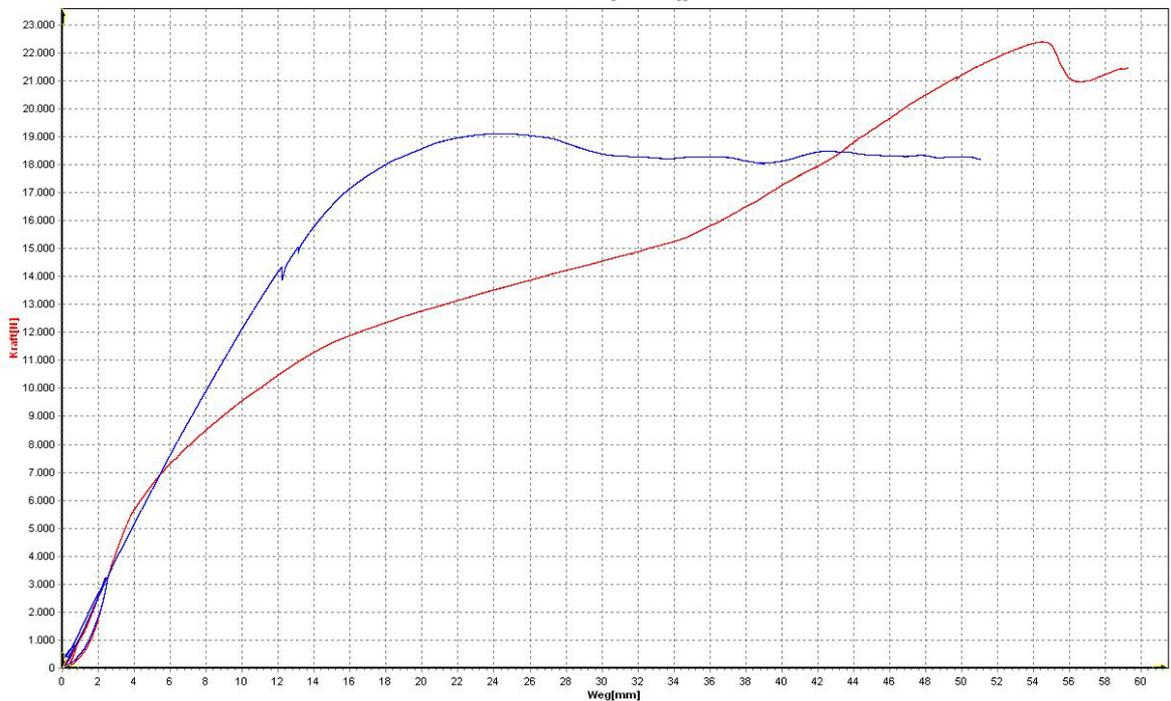
Die Belastungslinien verschieben sich mit jedem Zyklus um einen Anteil der bleibenden Verformung. Ab dem neunten Zyklus bildet sich bei etwa 1,80 kN ein Knick aus und die

Belastungslinie wird steiler. Mit jedem folgenden Zyklus knickt sie bei einem geringeren Lastniveau sodass bei Zyklus 21 der Knick bei 1,40 kN auftritt (siehe Abbildung 104, Linie aa). Weiters ist ab Zyklus 20 nach passieren der Höchstkraft aus dem vorhergehenden Zyklus ein Abflachen der Kurve feststellbar.

- Entlastungsverhalten

Die Entlastungskurve zeigt sich als konkave Kurve mit stärkerer Wölbung im jeweils untersten Lastbereich der Zyklen. Im Gegensatz zu den elastisch verklebten Systemen ist bei diesem semi-elastisch verklebten Prototypen kein Knick in der Entlastungskurve festzustellen, der Verlauf ist harmonisch.

### 5.6.4.2 Bruchversuch



x-Achse	Weg D1
y Achse	Kraft
v von 0 bis 0,4 x Fmax, est	2 mm/min
v ab 0,4 x Fmax, est	4 mm/min
Fmax, est	7,750 kN

Abfolge:

Haltezeit bei 0,1 x Fmax, est	120 sec
Haltezeit unbelastet	600 sec
Haltezeit bei 0,4 x Fmax, est	300 sec
Haltezeit unbelastet	600 sec
Haltezeit bei 0,4 x Fmax, est	300 sec
Bruchbelastung	

rot	1. Versuch
blau	2. Versuch mit adaptierter Zugverankerung

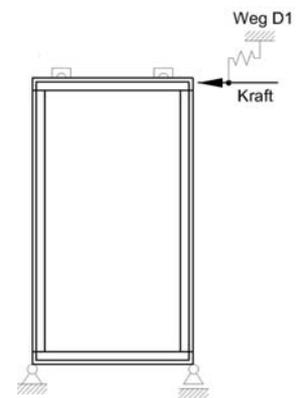


Abbildung 105: Verformungsverhalten – Bruchversuch – Prototyp P4

- Belastungsverhalten

Ab etwa 5,50 kN Horizontalbelastung flacht die Belastungskurve ab und verläuft annähernd linear bis zu einer Belastung von ungefähr 11,50 kN. Danach flacht Sie erneut ab. Zu einer Versteifung des Systems kommt es bei etwa 15,50 kN bis das Versagen bei 22,387 kN eintritt.

- Bruchverhalten

Im Verlauf des Versuches hat sich gezeigt, dass die vorgesehene Zugverankerung für die Lastbereiche, in denen sich die semi-elastisch verklebten Prototypen bewegen, im Zusammenspiel mit deren steifem Verformungsverhalten nicht ausreicht. Es hat sich im Lastbereich von etwa 5,50 bis 8,00 kN ein Versagen der Klemmplatte und deren Verschraubung abgezeichnet (siehe Abbildung 106). Der Versuch wurde trotzdem bis zu einer Belastung von 22,39 kN weitergeführt. Bei dieser Last hat sich der erste signifikante Lastabfall gezeigt, wonach der Versuch abgebrochen wurde.



**Abbildung 106: Versagen der Zugverankerung – Quadrant IV**

Nach Untersuchung des Prototyps konnten keine Fehlstellen oder Brüche festgestellt werden, weder an der Verklebung noch an der Verschraubung der Verbundelemente. Deshalb wurde ein erneuter Bruchversuch mit dem selbem Prototypen durchgeführt, wobei die Zugverankerung adaptiert wurde (siehe Abbildung 86). Die Vorgehensweise bei der wiederholten Versuchsdurchführung blieb dieselbe. Es zeigte sich, dass selbst der vorgeschädigte Prototyp ein ausgeprägtes elastisches Verformungsverhalten aufwies. Nach einem Lasteinbruch bei etwa 14,20 kN begann der Bereich der plastischen Verformung. Nach Erreichen der Höchstlast zeigte sich eine konstante Systemverformung bei einer in etwa gleichbleibenden Belastung von 18,20 kN. Grund dafür war das gleichförmige Herausziehen der Zugblechverschraubung aus dem Stiel (Quadrant IV).



**Abbildung 107: Versagen der  
Zugblechverschraubung**



**Abbildung 108: Schädigung des Stieles**

Nach Erreichen der Maximalkraft im zweiten Versuch konnte weder ein Klebstoffversagen, noch ein Holzbruch beim Koppelrahmen erkannt werden. Es wurde auch kein Glasbruch festgestellt. Der Koppelrahmen war nach dem zweiten Versuch noch bündig und fest auf dem Haupttrahmen verschraubt. Es konnte kein optischer Mangel festgestellt werden. Nach Zerlegen des Prototypen wurden bei Stielen und Schwellen des Haupttrahmens leichte Lochlaibung der Schraubenlöcher in Faserrichtung erkannt. Die Schrauben der Koppelrahmenbefestigung waren nicht verformt. Bei den Schraubenlöchern im Koppelrahmen und in den Stielen waren keine plastischen Verformungen augenscheinlich.

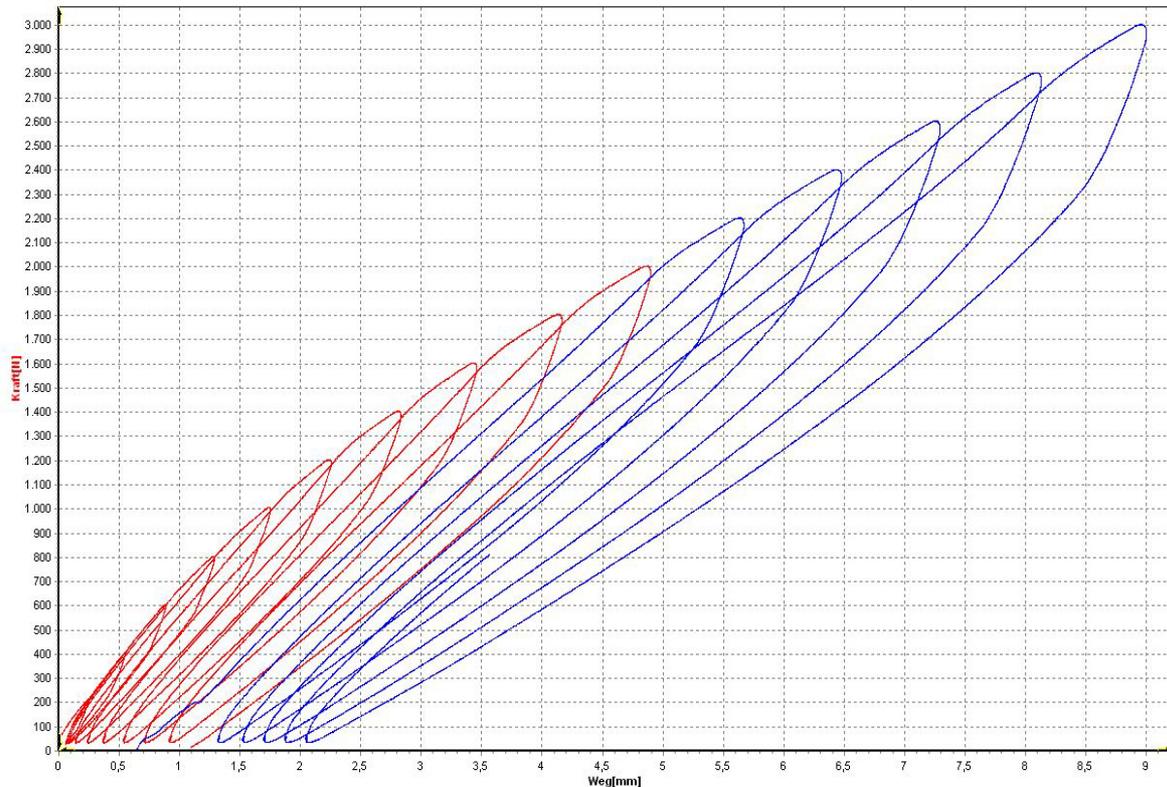
Des Weiteren waren im Eckbereich des Haupttrahmens, Quadrant III, Eindrückungen des Koppelrahmens am Haupttrahmen erkennbar.

**Tabelle 33: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse – Prototyp P4**

<b>Horizontallast bei H/500 Kopfverschiebung</b>	4,850 kN
<b>Bruchlast (bei 1.Versuch)</b>	22,387 kN
<b>Bruchverschiebung(bei 1.Versuch)</b>	59,24 mm

## 5.6.5 Prototyp P5 – Koppelrahmen schräg verschraubt

### 5.6.5.1 Vorversuch



x-Achse	Weg D1
y Achse	Kraft
v Belastung	5 mm/min
v Entlastung	5 mm/min
Haltezeit bei $F_{max}$	0 sec
Haltezeit bei $F_{min}$	0 sec
Kraftsteigerung	+ 200 N / Zyklus
rot	Zyklus 1 bis 10
blau	Zyklus 11 bis 15

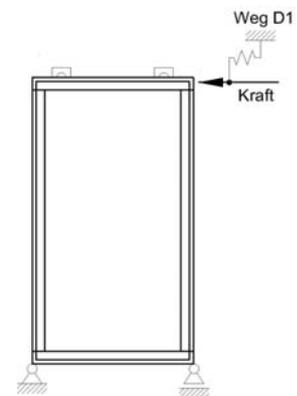


Abbildung 109: Verformungsverhalten – Prototyp P5

- bleibende Verformung

Nach jedem Zyklus kann eine bleibende Kopfverschiebung im Kraft-Weg-Diagramm abgelesen werden. Nach Durchlaufen von fünfzehn Zyklen bleiben 2,04 mm Kopfverschiebung im System.

- Belastungsverhalten

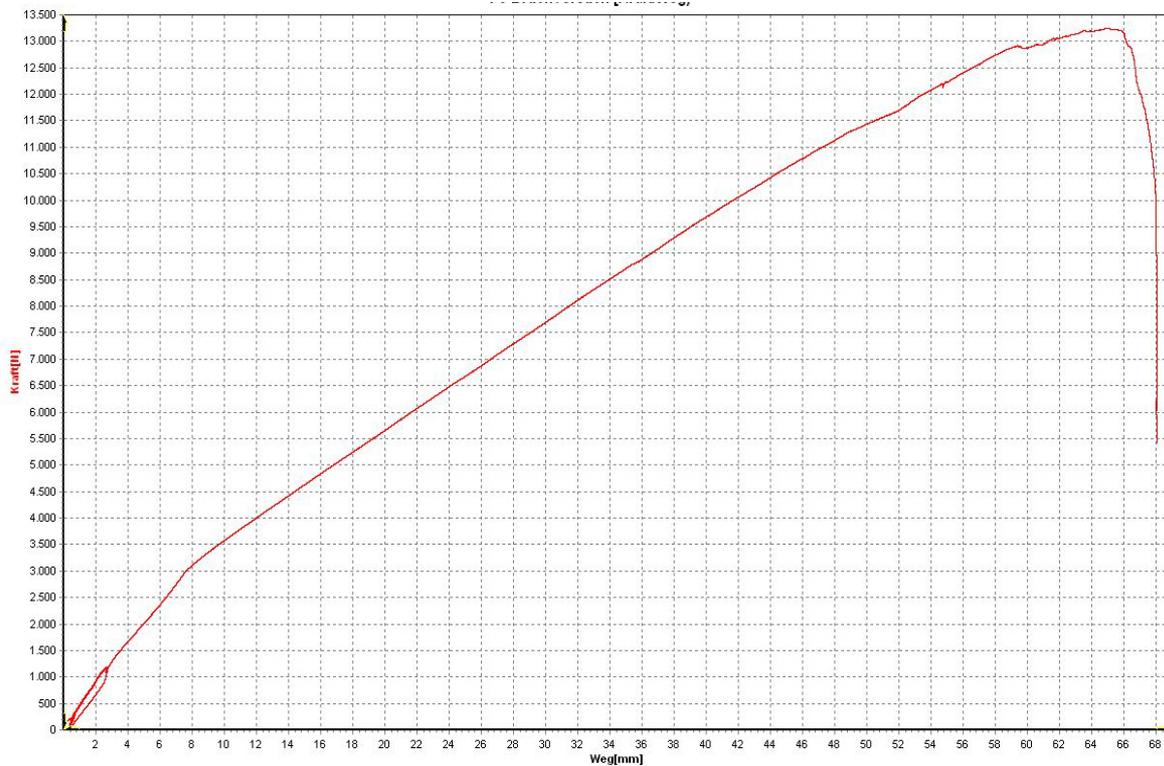
Die Belastungslinien verschieben sich mit jedem Zyklus um einen Anteil der bleibenden Verformung. Die Linie selbst wird mit zunehmender Anzahl der Zyklen flacher. Die

Ausprägung einer Mulde in der oberen Hälfte der Belastungskurven wird mit jedem Zyklus kontinuierlich stärker. Diese Mulde tritt bei allen vier mit Silikon geklebten Prototypen in unterschiedlichen Ausprägungen auf. Wie auch bei Prototyp P3 knickt die Belastungslinie bei jedem Zyklus nach Passieren der Höchstkraft aus dem vorhergehenden Zyklus sanft und verläuft mit flacherem Winkel weiter.

- Entlastungsverhalten

Analog zu den anderen elastisch verklebten Systemen ist zunächst ein steilerer Abfall der Kurve erkennbar. Nach einem Kraftabfall von etwa einem Sechstel flacht die Kurve ab, wobei es sich hier, wie bei Prototyp P3, um einen eher sanften Übergang vom Steilen ins Flache handelt.

### 5.6.5.2 Bruchversuch



x-Achse	Weg D1
y Achse	Kraft
v von 0 bis 0,4 x Fmax, est	2 mm/min
v ab 0,4 x Fmax, est	4 mm/min
Fmax, est	3,000 kN

Abfolge:

Haltezeit bei 0,1 x Fmax, est	120 sec
Haltezeit unbelastet	600 sec
Haltezeit bei 0,4 x Fmax, est	300 sec
Haltezeit unbelastet	600 sec
Haltezeit bei 0,4 x Fmax, est	300 sec
Bruchbelastung	

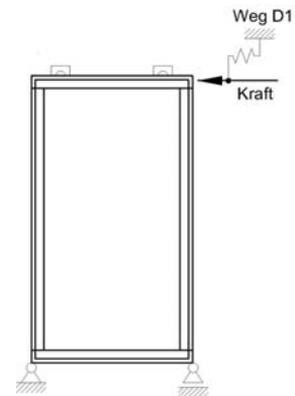


Abbildung 110: Verformungsverhalten – Bruchversuch – Prototyp P5

- Belastungsverhalten

Ein deutlicher Knick zeigt sich in der Belastungskurve bei etwa 3,00 kN Horizontalbelastung (=Maximalkraft des Vorversuches). Nach diesem Knick wird die Kurve etwas flacher. Dieser Effekt tritt bei allen elastisch verklebten Prototypen auf.

- Bruchverhalten

Während der Belastung war eine deutliche Gesamtrotation der Glasscheibe zu erkennen. Der erste Anriss erfolgte in der Ecke des Quadranten III, von wo aus er sich hauptsächlich entlang der Fußschwelle in Richtung Zugverankerung ausbreitete. Gleichzeitig war auch ein Risswachstum entlang des linken Stieles nach oben, sowie ausgehend von der Ecke in Quadrant IV ebenfalls entlang des rechten Stieles nach oben, festzustellen.



**Abbildung 111: Kohäsionsbruch im Klebstoff – Quadrant IV**

Die Rissfortpflanzung entlang der Fußschwelle erfolgte zunächst sehr langsam und steigert sich mit kleiner werdendem Restquerschnitt der Klebefuge. Die Rissspitze wanderte dabei im Dickenverlauf der Klebefuge (hier 6mm) zick-zack-förmig hin und her. Der letzte abrupt versagende Teil der Klebefuge riss rasch und mittig im Dickenverlauf gerade durch.

Neben der deutlichen Biegung der Stiele unter Vollast war auch ein Abheben der Glasscheibe von der Rahmenkonstruktion erkennbar (siehe nachfolgende Abbildungen).



Abbildung 112: Prototyp versagt im unteren Bereich



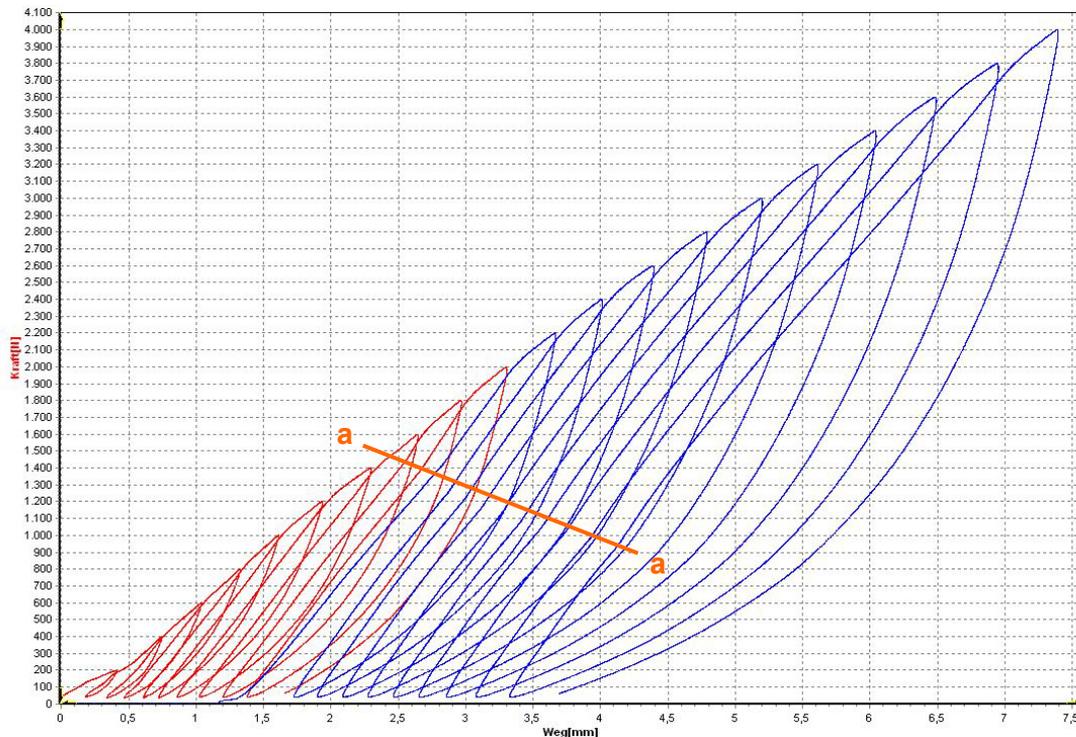
Abbildung 113: Biegung des rechten Stieles bei Vollast – Quadrant IV

Tabelle 34: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse – Prototyp P5

Horizontallast bei H/500 Kopfverschiebung	2,007 kN
Bruchlast:	13,237 kN
Bruchverschiebung	64,80 mm

## 5.6.6 Prototyp P6 – Koppelrahmen schräg verschraubt

### 5.6.6.1 Vorversuch



x-Achse	Weg D1
y Achse	Kraft
v Belastung	5 mm/min
v Entlastung	5 mm/min
Haltezeit bei $F_{max}$	0 sec
Haltezeit bei $F_{min}$	0 sec
Kraftsteigerung	+ 200 N / Zyklus
rot	Zyklus 1 bis 10
blau	Zyklus 11 bis 20

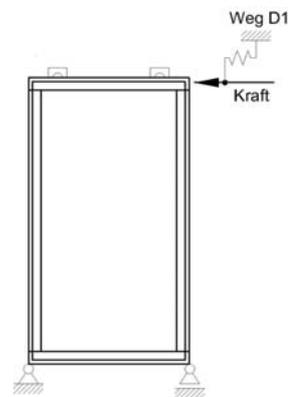


Abbildung 114: Verformungsverhalten – Prototyp P6

- bleibende Verformung

Nach jedem Zyklus kann eine bleibende Kopfverschiebung im Kraft-Weg-Diagramm abgelesen werden. Nach Durchlaufen von 20 Zyklen bleiben 3,66 mm Kopfverschiebung im System.

- Belastungsverhalten

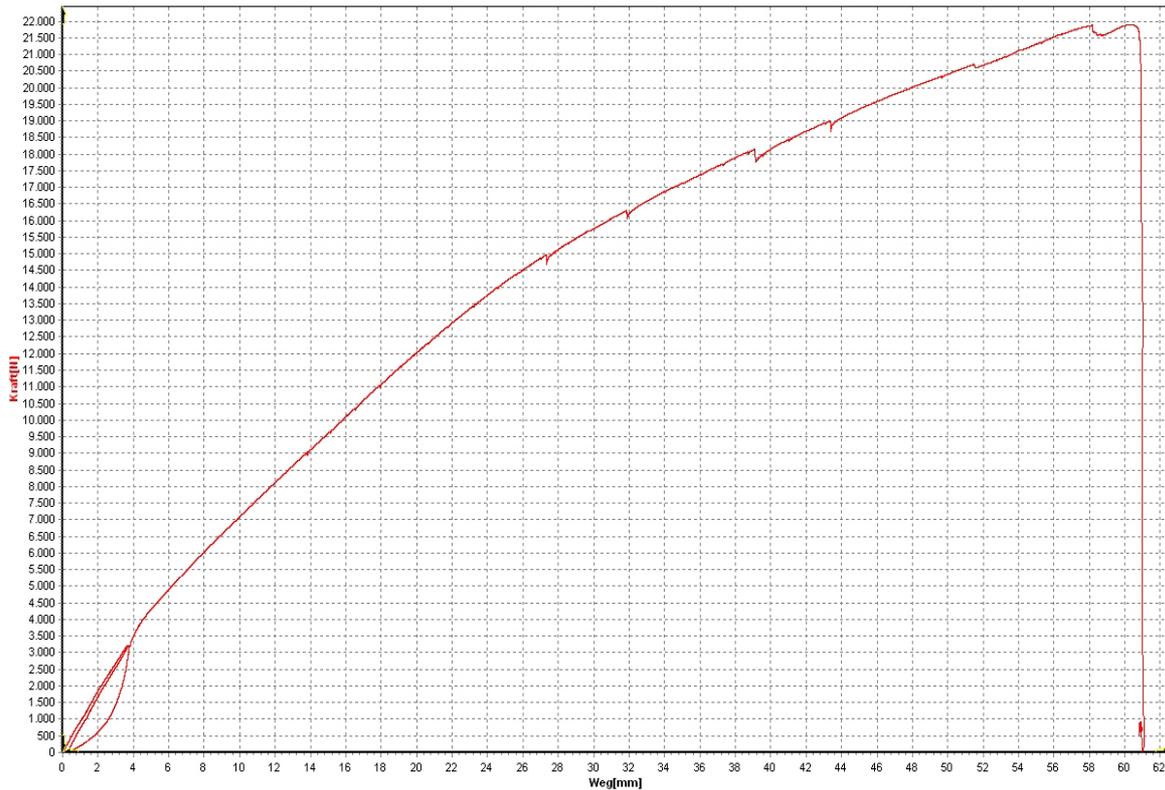
Die Belastungslinien verschieben sich mit jedem Zyklus um einen Anteil der bleibenden Verformung. Die Linien bleiben annähernd exakt parallel zueinander. Ab dem achten Zyklus bildet sich bei etwa 1,50 kN eine kleine Mulde aus, ähnlich wie der Knick bei Prototyp P4. Die Belastungslinie wird hingegen nicht steiler. Mit jedem folgenden Zyklus tritt diese Mulde bei einem geringeren Lastniveau auf, sodass sie bei Zyklus 20 bei 1,00 kN aufscheint. Bei

nahezu allen Zyklen wird die Belastungslinie nach passieren der Höchstkraft aus dem vorhergehenden Zyklus flacher.

- Entlastungsverhalten

Die Entlastungskurve zeigt sich als ausgeprägt konkave Kurve mit starker Wölbung. Im Gegensatz zu den elastisch verklebten Systemen ist auch bei diesem semi-elastisch verklebten Prototypen kein Knick in der Entlastungskurve festzustellen, der Verlauf ist harmonisch.

### 5.6.6.2 Bruchversuch



x-Achse	Weg D1
y Achse	Kraft
v von 0 bis 0,4 x Fmax, est	2 mm/min
v ab 0,4 x Fmax, est	4 mm/min
Fmax, est	7,750 kN

Abfolge:

Haltezeit bei 0,1 x Fmax, est	120 sec
Haltezeit unbelastet	600 sec
Haltezeit bei 0,4 x Fmax, est	300 sec
Haltezeit unbelastet	600 sec
Haltezeit bei 0,4 x Fmax, est	300 sec
Bruchbelastung	

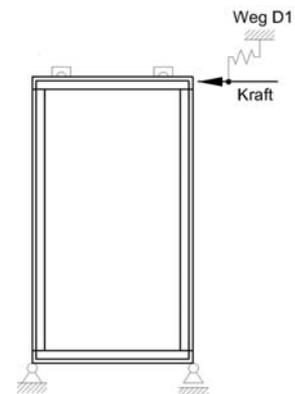


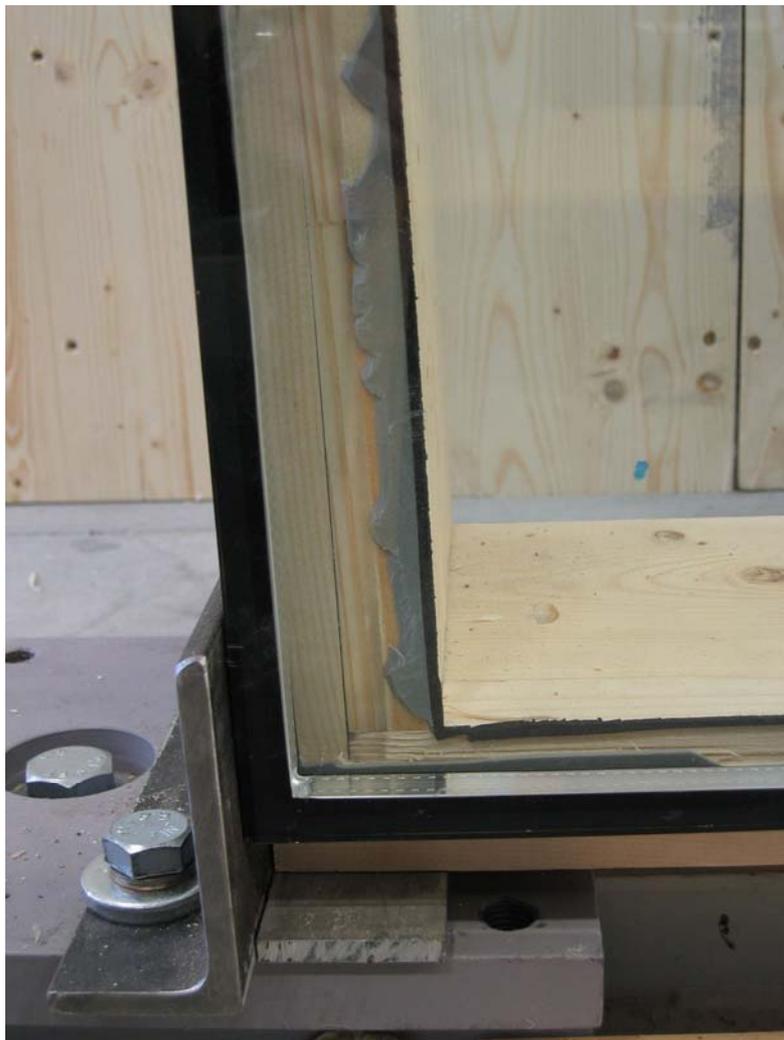
Abbildung 115: Verformungsverhalten – Bruchversuch – Prototyp P6

- Belastungsverhalten

Nachdem die Maximallast aus den Vorversuchen (etwa 4,00 kN) überschritten wird flacht die Belastungskurve etwas ab und steigt danach annähernd linear weiter an. Ab etwa 13,00 kN beginnt die Steigung langsam abzunehmen. Ein erster geringer Lasteinbruch stellt sich bei etwa 15,00 kN ein, gefolgt von einem zweiten bei 16,20 kN. Weitere treten bei 18,10 kN, bei 19,00 kN, sowie bei 20,50 kN auf. Der letzte Lasteinbruch bei 21,80 kN leitet das Totalversagen des Prototypen ein.

- Bruchverhalten

Der Anriss erfolgte in der Ecke des Quadranten III und riss von dort aus entlang des linken Stieles nach oben und entlang der Fußschwelle von links nach rechts.



**Abbildung 116: Anriss in der Ecke des Quadranten III**

Infolge trat in der Ecke im Quadranten IV in der vertikalen Koppelrahmenleiste Holzbruch auf, der sich nach oben in Richtung Quadrant I fortpflanzte. An einem etwa 8 cm langen Teil dieses Bruches konnte ein reiner Kohäsionsbruch des Klebstoffes festgestellt werden.



**Abbildung 117: Holzbruch bei der Zugverankerung in Quadrant IV**

Der Bruch entlang des linken Stieles war durch eine Mischung aus Kohäsionsbruch im Klebstoff und Kohäsionsbruch im Holz der Koppelrahmenleiste gekennzeichnet, wobei der Holzbruchanteil deutlich überwog. Der Bruch an der Fußschwelle zeigte zu etwa gleichen Teilen Kohäsionsbruch im Holz und in der Klebefuge wobei auch an einem etwa 30 cm langen Teilstück ein Adhäsionsversagen zwischen Klebstoff und Glas festgestellt werden musste. Ein zweiter Anriss von kleinem Ausmaß zeigte sich in der Klebefuge in der Ecke bei der Krafteinleitung in Quadrant I. Hierbei handelte es sich um Kohäsionsbruch im Klebstoff.

Bei den Schrauben der Koppelrahmenbefestigung am linken Stiel konnte keine Verformung festgestellt werden. Hingegen waren die Schrauben im Bereich des Holzbruches in Quadrant IV stark verformt. In der Kopfschwelle waren deutliche Eindrückungen der Schrauben in Faserrichtung zu erkennen.

Während dem Versuch war ein leichtes Abheben der Hauptrahmenecke im Quadrant IV erkennbar. Dies war auf geringe Verformungen der Zugverankerung (Verschraubung, Lasche und Holz) zurückzuführen.



**Abbildung 118: Versagen des Verbundelementes im unteren Bereich**

**Tabelle 35: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse – Prototyp P6**

<b>Horizontallast bei H/500 Kopfverschiebung</b>	2,893 kN
<b>Bruchlast:</b>	21,894 kN
<b>Bruchverschiebung</b>	60,39 mm

## 5.7 Diskussion

### 5.7.1 Umsetzbarkeit der Prototypen in die Baupraxis

Für die Akzeptanz der vorliegenden Konstruktionslösungen in der Baupraxis sind mehrere Faktoren ausschlaggebend.

Eine wirtschaftliche und prozesssichere Herstellbarkeit muss gegeben sein. Die Klebstoffindustrie bietet mit ihren hochmodernen Klebesystemen auch vollautomatische

Applikationslösungen für die Industrie an. Der eigenständig durchgeführte Bau der Prototypen hat gezeigt, dass auch mittelständische Betriebe in der Lage sein werden, bei entsprechend eingehaltenen Grundregeln, Holz-Glas-Verbundelemente zu verkleben. Von entscheidender Bedeutung für den handwerklichen Klebprozess sind die Topfzeit und die Konsistenz des Klebstoffes. Das Fügen großer Elemente ist anwendungstechnisch am schwierigsten, aber machbar. Zur Erfassung von Fehlstellen in der Verklebung sind Qualitätssicherungsmaßnahmen zu setzen. Die Herstellungsgenauigkeit der Verbundelemente ist relativ hoch.

Je nach Verschraubungssystematik erfolgt die Montage von außen oder von innen. Betrachtet man den gesamten Arbeitsablauf vom Einheben der Verbundelemente bis zum Abdichten der Fugen, wird eine Montage von außen in der Regel wirtschaftlicher sein. Zudem wird die Optik der Pfosten-/Riegelkonstruktion nicht durch Schrauben etc. beeinträchtigt. Auf innenseitige Abdeckleisten o.Ä. kann verzichtet werden.

Ein Ausgleich von Achsmaßtoleranzen der vormontierten Pfosten und Riegel sollte in Abhängigkeit von der Vorfertigungsgenauigkeit konstruktiv vorgesehen werden. Die Konstruktionsansätze der Prototypen P4 und P5 sind dazu am besten geeignet. P1 und P2 können geringe Toleranzen durch Verformungen in der Klebefuge ausgleichen, Eigenspannungen in der Verklebung sind jedoch Folge.

## **5.7.2 Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen der Prototypen**

Die Prototypen basieren zum Teil auf wesentlich unterschiedlichen Konstruktionssystemen. Ein direkter Vergleich an Hand von quantitativen Versuchsergebnissen gibt zwar Auskunft über die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Prototypen, soll aber an dieser Stelle nicht im Vordergrund stehen. Ein Vergleich der Konstruktionsmittel (Verklebung, Verschraubung, etc.) gibt objektiv Aufschluss über deren Eignung und Auswirkung auf die jeweilige Konstruktionslösung.

Durch die folgenden Darstellungen soll kein Anspruch auf statistisch gesicherte Aussagen gestellt werden, da es sich um die Interpretation einer Prototypen-Versuchsreihe handelt. Es sollen jedoch Tendenzen und qualitative Merkmale aufgezeigt werden.

### **5.7.2.1 Bleibende Verformungen**

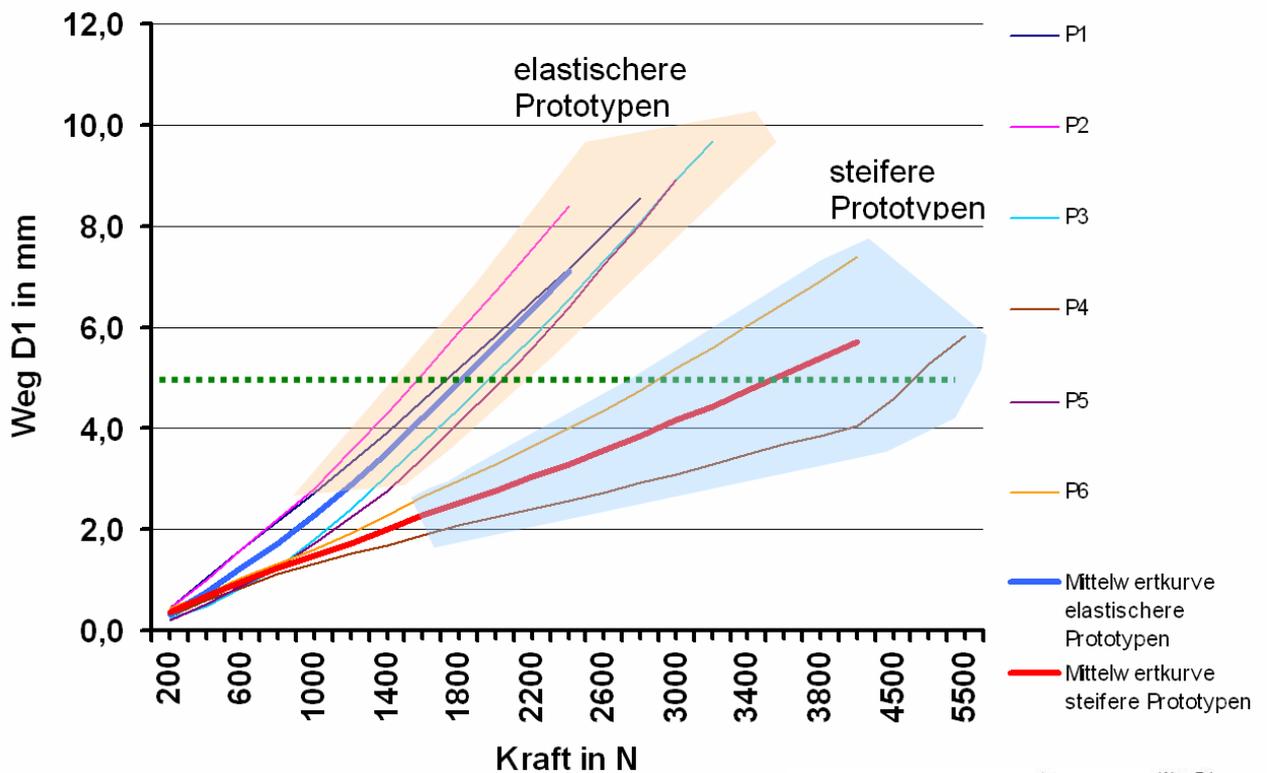
Bei den Vorversuchen aller Prototypen sind bleibende Verformungen aufgetreten. Diese sind nicht auf die Verklebung zurückzuführen. Die Ursache liegt hier im Wesentlichen im Verformungsverhalten der Verschraubung des Koppelrahmens der Verbundelemente mit der Haupttrahmenkonstruktion. Der hier verwendete Prüfaufbau, im Speziellen die Anordnung und Ausbildung der Lagerungen der Versuchskörper spielt nur eine untergeordnete Rolle.

### **5.7.2.2 Verformungsmechanismus**

Bei der Gegenüberstellung des Verformungsverhaltens der Prototypen aus den Vorversuchen sind folgende Faktoren wesentlich:

- äußere Lagerungsebene (Klebstoffuge)
  - P1, P2, P3 und P5 sind elastisch verklebt
  - P4 und P6 sind semi-elastisch verklebt
- innere Lagerungsebene (Verschraubung der Koppelrahmen)
  - P1 und P2 sind seitlich von innen verschraubt

- P3 und P4 sind von außen verschraubt
- P5 und P6 sind schräg von innen verschraubt
- Hauptrahmensteifigkeit
  - P1 hat eine höhere Hauptrahmenbiegesteifigkeit durch das angeschraubte Aluminiumprofil
  - P2, P3, P4, P5 und P6 haben nahezu identische Hauptrahmenbiegesteifigkeiten
- Randbedingungen
  - Eckverschraubungen und Verankerungsrandbedingungen des Hauptrahmens sind bei allen Prototypen identisch.



x-Achse

y Achse

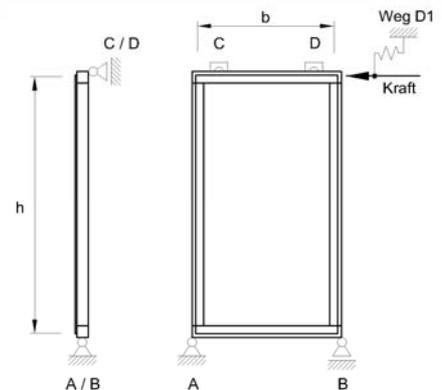
.....

Weg D1

Kraft

Weg D1 =  $h/500$

Dargestellt sind die Verformungen bei der jeweiligen Maximallast der einzelnen Zyklen aus den Vorversuchen. Je flacher die Kurve desto steifer das Gesamtverformungsverhalten. Zahlenwerte siehe



**Abbildung 119: Vergleich der horizontalen Kopfverschiebung der Prototypen aus den Vorversuchen**

Vergleicht man die Belastungskurven aus den Vorversuchen der einzelnen Prototypen (hier im Speziellen das Verformungsverhalten, Abbildung 119), so bietet sich eine Einteilung der Prototypen in zwei Kurvenscharen an. Die erste Schar gruppiert die elastischeren

Prototypen, die zweite Schar gruppiert die steiferen Prototypen. Der Übergang zwischen den beiden Gruppen ist fließend.

In Abbildung 119 lässt sich des Weiteren ablesen, dass die äußere Lagerungsebene (Verklebung) die Steigung der Belastungslinien stärker beeinflusst als die innere Belastungsebene (Verschraubung).

Die beiden steiferen Prototypen P4 und P6 unterscheiden sich nur durch die innere Lagerungsebene. Bei beiden wurde derselbe semi-elastische Klebstoff verwendet. Betrachtet man deren Belastungskurven, so zeigt sich, dass sich die innere Lagerungsebene von P4 (flache Koppelrahmenleiste von außen verschraubt) deutlich steifer verhalten muss als die von P6 (Koppelrahmenleisten schräg von innen verschraubt).

Die beiden Prototypen P3 und P5 unterscheiden sich ebenfalls nur durch die Ausbildung der inneren Lagerungsebene. Bei beiden wurde derselbe elastische Klebstoff verwendet. Hier kann jedoch kein signifikanter Unterschied in der Gesamtsteifigkeit der zwei Systeme abgelesen werden. Dies bestätigt die Annahme, dass die äußere Lagerungsebene die Gesamtsteifigkeit der Konstruktion durch den größeren Abstand zur Hauptrahmenebene wesentlich stärker beeinflusst als die innere Lagerungsebene. Würde man also die innere Lagerungsebene unverschieblich steif ausführen (würde einer direkten Verklebung der Glasscheibe auf Pfosten und Riegel gleichkommen), kann man bei elastisch verklebten Verbundelementen von keiner wesentlichen Vergrößerung der Gesamtsteifigkeit ausgehen.

P1 und P2 stehen in diesem Vergleich etwas am Rande, zählen aber eindeutig zur Schar der elastischeren Systeme. Bei P1 (Aluminiumprofil) und P2 (Sperrholzfeder) sind zwar sowohl die innere als auch die äußere Lagerungsebene im Wesentlichen identisch, jedoch unterscheiden sich die Steifigkeiten der Hauptrahmenquerschnitte. In Abbildung 119 ist erkennbar, dass P1 ein steiferes Verformungsverhalten aufzeigt, was also auf die Erhöhung der Steifigkeit des Hauptrahmenquerschnittes durch das angeschraubte Aluminiumprofil zurückzuführen ist.

Wesentliche Erkenntnisse sind, dass

- die Steifigkeit der Verklebung den größten Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit der Konstruktion hat.
- sich bei elastisch verklebten Verbundelementen die Steifigkeit der Verschraubung nicht wesentlich auswirkt.
- sich bei steif verklebten Verbundelementen die Steifigkeit der Verschraubung wesentlich auswirkt.
- die Biegesteifigkeit des Hauptrahmens eine untergeordnete Rolle spielt.

Tabelle 36: Horizontale Kopfverschiebung der Prototypen in mm aus den Vorversuchen

Kraft in N	P1	P2	P3	P4	P5	P6
200	0,46	0,44	0,23	0,29	0,22	0,44
400	1,05	1,01	0,47	0,60	0,53	0,74
600	1,60	1,59	0,86	0,86	0,87	1,03
800	2,16	2,18	1,26	1,13	1,26	1,32
1000	2,74	2,82	1,80	1,33	1,72	1,61
1200	3,33	3,55	2,42	1,52	2,22	1,93
1400	3,93	4,31	3,07	1,70	2,78	2,29
1600	4,55	5,10	3,73	1,89	3,40	2,64
1800	5,19	5,91	4,42	2,07	4,11	2,96
2000	5,84	6,73	5,13	2,25	4,83	3,30
2200	6,51	7,57	5,80	2,40	5,61	3,65
2400	7,18	8,42	6,55	2,57	6,41	4,01
2600	7,86		7,33	2,73	7,23	4,38
2800	8,55		8,10	2,91	8,06	4,78
3000			8,91	3,09	8,94	5,19
3200			9,70	3,29		5,60
3400				3,47		6,05
3600				3,67		6,48
3800				3,86		6,94
4000				4,06		7,39
4500				4,60		
5000				5,30		
5500				5,85		

### 5.7.2.3 Versagensmechanismus

In Folge werden die versagenskritischen Konstruktionselemente der untersuchten Prototypen diskutiert.

- Aussteifungsebene (Glasscheibe)

Trotzdem die verklebte, also aussteifende, Glasscheibe bei allen Prototypen aus nur 6 mm dünnem Floatglas bestand, hat keine Konstruktion durch Glasbruch versagt. Ein ausgeprägter Beulzustand der Glasscheibe konnte nicht beobachtet werden.

- äußere Lagerungsebene (Klebefuge)

Bei allen untersuchten Prototypen versagte die Tragfähigkeit der äußeren Lagerungsebene. Die erreichten Bruchkräfte sind sowohl bei den elastisch als

auch bei den semi-elastisch verklebten Prototypen beträchtlich. Das elastische Verformungsvermögen der Klebefuge ist in Kombination mit dem Verformungsvermögen der Verschraubung ausschlaggebend für die Höhe des Gebrauchstauglichkeitsniveaus.

- Innere Lagerungsebene (Verschraubung)

Bei den hier untersuchten Verschraubungssystemen wurde kein charakteristisches Versagen festgestellt. Lediglich örtlich kam es zu plastischen Verformungen der Schrauben oder des Holzes. Wird die Anzahl der Schrauben entlang des Koppelrahmens jedoch reduziert, so ist mit einem Tragfähigkeitsverlust in der Verschraubungsebene zu rechnen. Die Klebefugenebene weist dann eine höhere Festigkeit auf als die Verschraubungsebene. Das elastische Verformungsvermögen der Verschraubung ist in Kombination mit dem Verformungsvermögen der Verklebung ausschlaggebend für die Höhe des Gebrauchstauglichkeitsniveaus.

- Hauptrahmen

Die Hauptrahmenbiegesteifigkeit spielt in Bezug auf das Gesamtverformungsverhalten der Konstruktion eine untergeordnete Rolle. Ein Tragfähigkeitsversagen der Pfosten oder Riegel wird nicht erwogen.

Die Betrachtung der vorliegenden Versuchsergebnisse zeigt, dass das Bruchlastniveau in erster Linie von den Eigenschaften des verwendeten Klebstoffes abhängt. Bei allen Versuchen versagte letztendlich die Tragfähigkeit der äußeren Lagerungsebene (Verklebung).

Der Vergleich der charakteristischen Belastungswerte der Prototypen zeigt, analog zu den Erkenntnissen aus den vorangegangenen Projektschritten, dass auch bezogen auf das Bruchversagen eine Einteilung in elastischere und steifere Prototypen schlüssig erscheint. Je steifer, resp. tragfähiger der verwendete Klebstoff ist, desto höher liegt das Bruchlastniveau der äußeren Lagerungsebene. Wie hoch das Bruchlastniveau zumindest liegen soll entscheidet das Einsatzgebiet (Fassade, Wintergartenbau, Holzskelettbau,...).

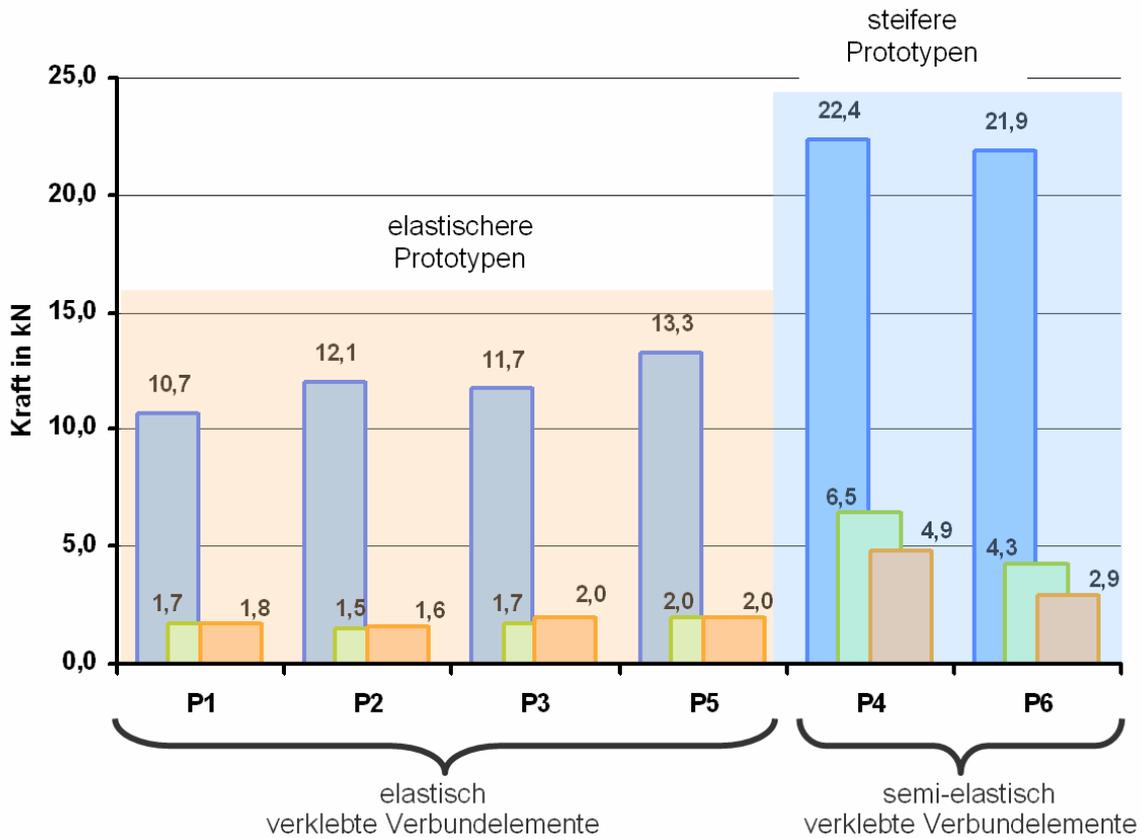
**Tabelle 37: Charakteristischer Belastungswerte der Prototypen**

	P1	P2	P3	P5	P4	P6
<b>Kraft bei Versagen aus dem Bruchversuch</b>	10,7	12,1	11,7	13,3	22,4	21,9
<b>Kraft bei Weg <math>D1 = h/500</math> aus dem Vorversuch</b>	1,7	1,5	1,7	2,0	6,5	4,3
<b>Kraft bei Weg <math>D1 = h/500</math> aus dem Bruchversuch</b>	1,8	1,6	2,0	2,0	4,9	2,9

elastisch verklebte  
Verbundelemente
semi-elastisch verklebte  
Verbundelemente

In Abbildung 120 sind neben den Bruchlasten der Prototypen auch die Gebrauchstauglichkeitslasten angegeben. Also jene Lasten, bei denen die gerade noch

zulässige Verformung von  $h/500$  (der Elementhöhe) auftritt. Vergleicht man nun das Gebrauchstauglichkeitsniveau mit dem Bruchlastniveau so kann festgestellt werden, dass eine deutliche Sicherheitsreserve für den Tragfähigkeitsverlust vorhanden ist, wenn die Dimensionierung nach der Gebrauchstauglichkeit erfolgt. Das bedeutet, dass bei den elastischeren Prototypen etwa 13 bis 17% und bei den steiferen Prototypen etwa 13 bis 22% der Kurzzeit-Tragfähigkeit ausgenutzt werden würde.



x-Achse Prototyp  
y Achse Kraft

blau Kraft bei Versagen aus dem Bruchversuch  
grün Kraft bei Weg D1=h/500 aus dem Bruchversuch  
orange Kraft bei Weg D1=h/500 aus dem Vorversuch

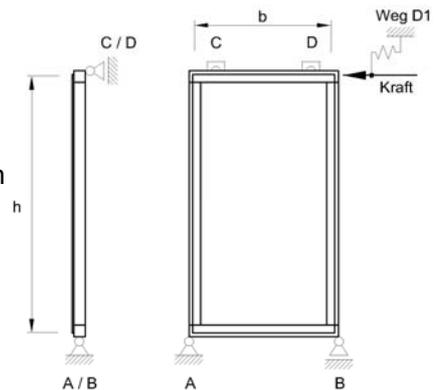


Abbildung 120: Vergleich charakteristischer Belastungswerte der Prototypen

## **6 Beitrag zur sicheren Bemessung von Holz-Glas-Verbund-Wandscheiben**

### **6.1 Versagenskriterien**

Bewertet man das Versagen von HGV-Elementen, so kann man gemäß den Regeln der statischen Nachweisführung eine Einteilung in Tragfähigkeitsversagen, Gebrauchstauglichkeitsversagen und in Stabilitätsverlust vornehmen. Ein Verlust der Tragfähigkeit liegt im Speziellen dann vor, wenn die entstehenden Spannungen in einem Bauteil dessen Festigkeit übersteigen. Ein Verlust der Gebrauchstauglichkeit tritt ein, wenn sich das HGV-Element derart verformt, dass sich die Kopfschwelle der Haupttragkonstruktion um  $\frac{1}{500}$  der Elementhöhe horizontal in Belastungsrichtung verschiebt. Bei Stabilitätsverlust führt Beulen der Glasplatte zum Bruch derselben oder die druckbelasteten Hauptrahmenhölzer knicken aus.

#### **6.1.1 Tragfähigkeit**

Die Betrachtung der vorliegenden Versuchsergebnisse zeigt, dass das Bruchlastniveau in erster Linie von den Eigenschaften des verwendeten Klebstoffes abhängt. Bei allen Versuchen versagte zuerst die äußere Lagerungsebene (Verklebung) und in Folge die innere Lagerungsebene (Verschraubung) oder Koppelrahmen.

Auf Grund der Erfahrungen aus den Prototypenversuchen kann die Hypothese aufgestellt werden, dass bei einem Einsatz von Klebstoffen mit höheren Festigkeiten die Aussteifungsebene (Glasscheibe) an den Stellen mit ausgeprägten Spannungskonzentrationen (zB. Glasecke beim zugbelasteten Auflager) versagen wird. Werden zusätzlich Glasscheiben mit höheren Festigkeiten verwendet so wird die innere Lagerungsebene (Verschraubung) versagen, sofern von einer vernünftigen Haupt- und Koppelrahmenkonstruktion ausgegangen werden kann. Je nach Ausbildung der Konstruktionsdetails und Wahl der Materialien kann man also innerhalb des Konstruktionstyps „Koppelrahmen auf Haupttragwerk“ das Tragfähigkeitsniveau heben oder senken. Aus sicherheitstechnischen Gründen ist es nun aber vorteilhaft das Versagenskriterium zu kennen und es somit zuordenbar zu machen. Ein wesentliches

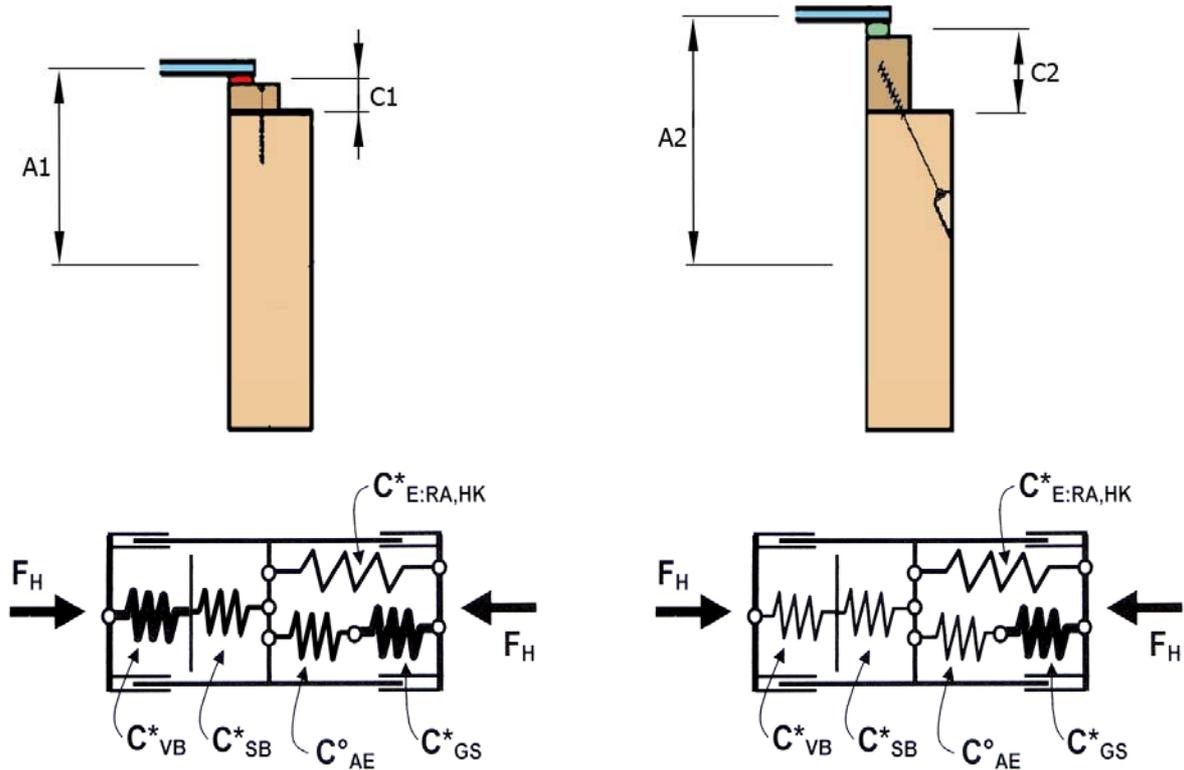
Merkmal einer verklebten HGV-Konstruktion sollte es sein, das versagende Konstruktionsmittel (zB. Klebefuge) konstruktiv festzulegen und somit das Tragfähigkeitsniveau mit hinreichender Wahrscheinlichkeit vorhersehbar zu machen. Die äußere Lagerungsebene als Sollbruchstelle zu sehen, und deshalb mit der Konstruktion abgestimmte Klebstoffe zu verwenden, würde also durchaus Sinn machen. Das Versagensverhalten der Konstruktion bleibt transparent und ist in einem Sicherheitskonzept praktikabel umsetzbar. Es ist jedoch notwendig die Konstruktion genau abzustimmen und somit als Konsequenz der konstruktiven Definition der Versagensform eine Verringerung des Tragfähigkeitsniveaus in Kauf zu nehmen. Da bei den diskutierten Konstruktionstypen die Gebrauchstauglichkeitsgrenze weitaus früher erreicht wird als die Tragfähigkeitsgrenze erscheint dies als durchaus akzeptabel.

Ein Stabilitätsverlust wäre in Form von Knickversagen des druckbelasteten Stieles oder Beulversagen der Glasscheibe denkbar. Bei den untersuchten Scheibenformaten konnte kein signifikantes Beulverhalten festgestellt werden. Vielmehr scheint eine elastische linienförmige Lagerung der Glasscheibe ein Ausbilden von Spannungskonzentrationen in der umlaufenden Lagerung zu reduzieren. Durch die Nachgiebigkeit des elastischen Klebstoffes lotrecht zur Scheibenebene werden auch Spannungsspitzen durch ein mögliches Aufschüsseln der Glasscheibenecken gut verteilt. Die Klebefuge wird dabei zusätzlich zum Längs- und Querschub mit Zug oder allenfalls Druck aus der Ebene belastet. Somit stellt sich in den Eckbereichen bei Auftreten von Aufschüsseln ein dreidimensionaler Spannungszustand ein. Dies ist natürlich entscheidend von der Scheibengeometrie abhängig.

Beim druckbelasteten Stiel wirkt sich der Einsatz von HGV-Elementen besonders vorteilhaft aus. Da dessen schwache Knickachse in der Regel in der Aussteifungsebene liegt kann der Stiel durch die direkte Koppelung an die Aussteifungsscheibe entlang seiner gesamten Länge als elastisch gelagert gelten. Bei herkömmlichen Glasfassaden wird Ausknicken in der Aussteifungsebene insbesondere bei hohen Glasformaten ausschlaggebend, wenn über den Stiel auch Vertikallasten aus dem Bauwerk abgeleitet werden. Somit kann dem aussteifenden HGV-Element nicht nur die Rolle der Gebäudeaussteifung zugesprochen werden, sondern auch die Stabilisierung druckbelasteter und knickgefährdeter Stäbe im Tragwerk.

### **6.1.2 Gebrauchstauglichkeit**

Da sich die untersuchten Konstruktionstypen im Wesentlichen durch die Ausbildung der inneren und der äußeren Lagerungsebene unterscheiden, legt wohl die Kombination der Steifigkeiten dieser beiden Ebenen, bei gleicher Hauptrahmensquerschnittssteifigkeit, die Gesamtsteifigkeit des jeweiligen Prototypen fest. Erhöht man die Steifigkeit der Klebefuge so wird sich die Verformung in der weicheren Verschraubungsebene des Koppelrahmens einstellen und natürlich sinngemäß umgekehrt. Somit liegt es auf der Hand, dass das Anheben des Gebrauchstauglichkeitsniveaus am effektivsten durch eine Steifigkeitssteigerung beider Lagerungsebenen erfolgen kann. Es empfiehlt sich jedoch aus baupraktischer Sicht, die Klebefugenebene als weichstes Konstruktionsmittel zu belassen. So kann von einem duktilen Versagensverhalten der Konstruktion ausgegangen werden und die Haupttragkonstruktion wird im Schadensfall nicht beschädigt. Für elastisch oder semi-elastisch verklebte HGV-Elemente ist die Verformung in Scheibenebene resp. die longitudinale Kopfschwellenverschiebung entscheidend und mit  $h/_{500}$  begrenzt.



**HGV-Typ 1**  
 semielastisch verklebt  
 flache Koppelrahmenleisten  
 Verschraubung von außen

**HGV-Typ 2**  
 elastisch verklebt  
 massive Koppelrahmenleisten  
 Verschraubung von innen

- A1 Abstand der Aussteifungsebene zur Hauptachsenebene an einer kompakten HGV-Konstruktion
- C1 Abstand der Lagerungsebenen zueinander an einer kompakten HGV-Konstruktion
- A2 Abstand der Aussteifungsebene zur Hauptachsenebene an einer massiveren HGV-Konstruktion
- C2 Abstand der Lagerungsebenen zueinander an einer massiveren HGV-Konstruktion
- $C^{\circ}_{AE}$  Ersatzfedersteifigkeit der Klebefuge
- $C^*_{SB}$  Ersatzfedersteifigkeit der Stabglieder zufolge Schubbiegung
- $C^*_{VB}$  Ersatzfedersteifigkeit der Verbindungsmittlebene
- $C^*_{GS}$  Ersatzfedersteifigkeit der Glasscheibe
- $C^*_{E:KR, HK}$  Ersatzfedersteifigkeit der Eckausbildung der Koppelrahmen- und Hauptkonstruktionsstöße

**Abbildung 121: Vergleich der Steifigkeiten eines steifen und eines weichen HGV-Elementes auf Basis Federmodell NIEDERMAIER, P. (2002)**

## 6.2 Versagensmechanismen

### 6.2.1 Aussteifungsebene - Glasscheibe

Es konnte bei den diskutierten Konstruktionstypen festgestellt werden, dass die Belastung der Glasscheibe in Scheibenebene bei üblichen Glasformaten im Fenster- und Fassadenbau signifikant unter den Möglichkeiten bleibt. Dies trifft bei der Verwendung von elastischen Klebstoffen mit ausreichender Sicherheit zu. Auch semi-elastische Klebstoffe sind in der Lage für den vorliegenden Anwendungsfall Spannungskonzentrationen derart zu verteilen, dass das Belastungsniveau im Glas sicher unter dem Bruchniveau liegt. Definiert man also eine maximale Steifigkeit des Klebstoffes für ein ungünstiges Scheibenformat könnte man den Bruch der Glasscheibe durch Belastungen in Scheibenebene weitgehend ausschließen. Maßgebend für die Scheibe wäre somit die Biegebelastung durch lotrechten Wind. Für diesen Lastfall liegen bereits deterministische und semiprobabilistische Nachweismodelle vor.

### 6.2.2 Äußere Lagerungsebene – Klebefuge

Bei Betrachtung der Schubspannungsverläufe entlang der Klebefuge erkennt man das kritische Spannungsmaximum jeweils in den Ecken der Konstruktion. Sofern kein Fehler in der Klebefuge vorliegt wird der Anriss also in einer der Ecken beginnen. Bei den durchgeführten Versuchen wurde in seltenen Fällen auch festgestellt, dass mehrere Initialrisse auftreten können. Also beispielsweise startet der Primärriss in der Ecke der Lasteinleitung und pflanzt sich entlang der Kopfschwelle fort und ein Sekundärriss beginnt ab einem gewissen Lastniveau diagonal gegenüber in der Ecke des Druckauflagers. Die Klebefuge versagt, sofern sie elastisch oder semi-elastisch ist, duktil und vorhersehbar. Auch wenn die Klebefuge entlang des Stieles bis zur Hälfte der Stielhöhe durchgerissen ist bleibt eine überraschend hohe Resttragfähigkeit gegeben (siehe Abbildungen Abbildung 112, Abbildung 113 und Abbildung 118). Die Verformung des Systems nimmt jedoch stark zu. Je steifer der Klebstoff, desto abrupter versagt natürlich das System.

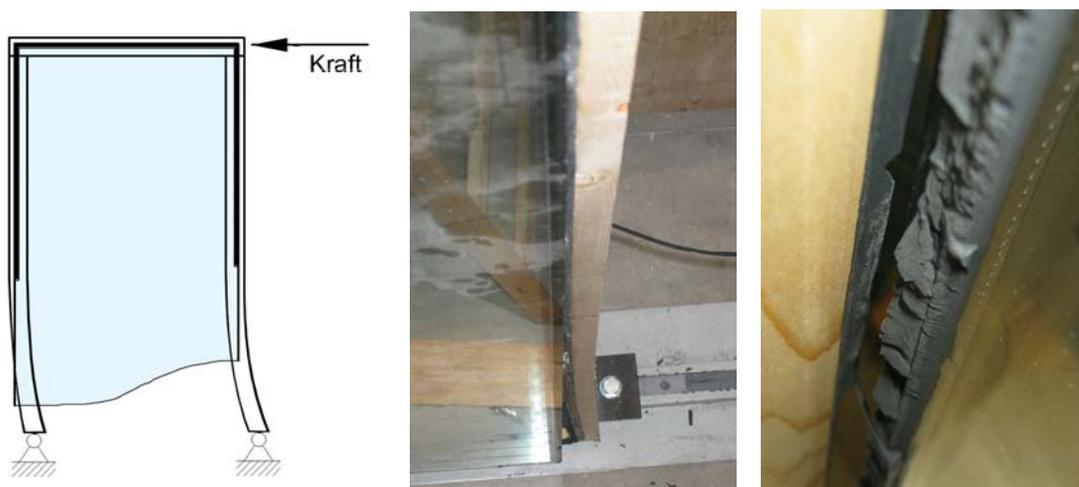


Abbildung 122: Versagen der Klebefuge mit Aktivierung der Biegesteifigkeit des Hauptrahmenstieles



**Abbildung 123: Versagen der Klebefuge mit Aktivierung der Biegesteifigkeit des Hauptrahmenstieles**

### 6.2.3 Innere Lagerungsebene – Verschraubung

Vereinfachend kann gesagt werden, dass die Belastung der inneren Lagerungsebene (Verschraubung) analog der Belastung der äußeren Lagerungsebene (Klebefuge) ist. Die Gesamtsteifigkeit der Verschraubung sollte also entsprechend hoch gewählt werden, wenn die Klebefuge das Versagensniveau festlegen soll. Somit werden die Tragfähigkeit und der Versagensmechanismus der Konstruktion vorhersehbar und einschätzbar. Fällt die Steifigkeit der Verschraubungsebene gering aus, im Vergleich zur Klebefugensteifigkeit, wird der Initialbruch auch in einer Ecke der Konstruktion auftreten, da dort die Schubspannungen am größten sind.



**Abbildung 124: Versagensform d) nach Abbildung 125 der Koppelrahmenverschraubung im Vorversuch**

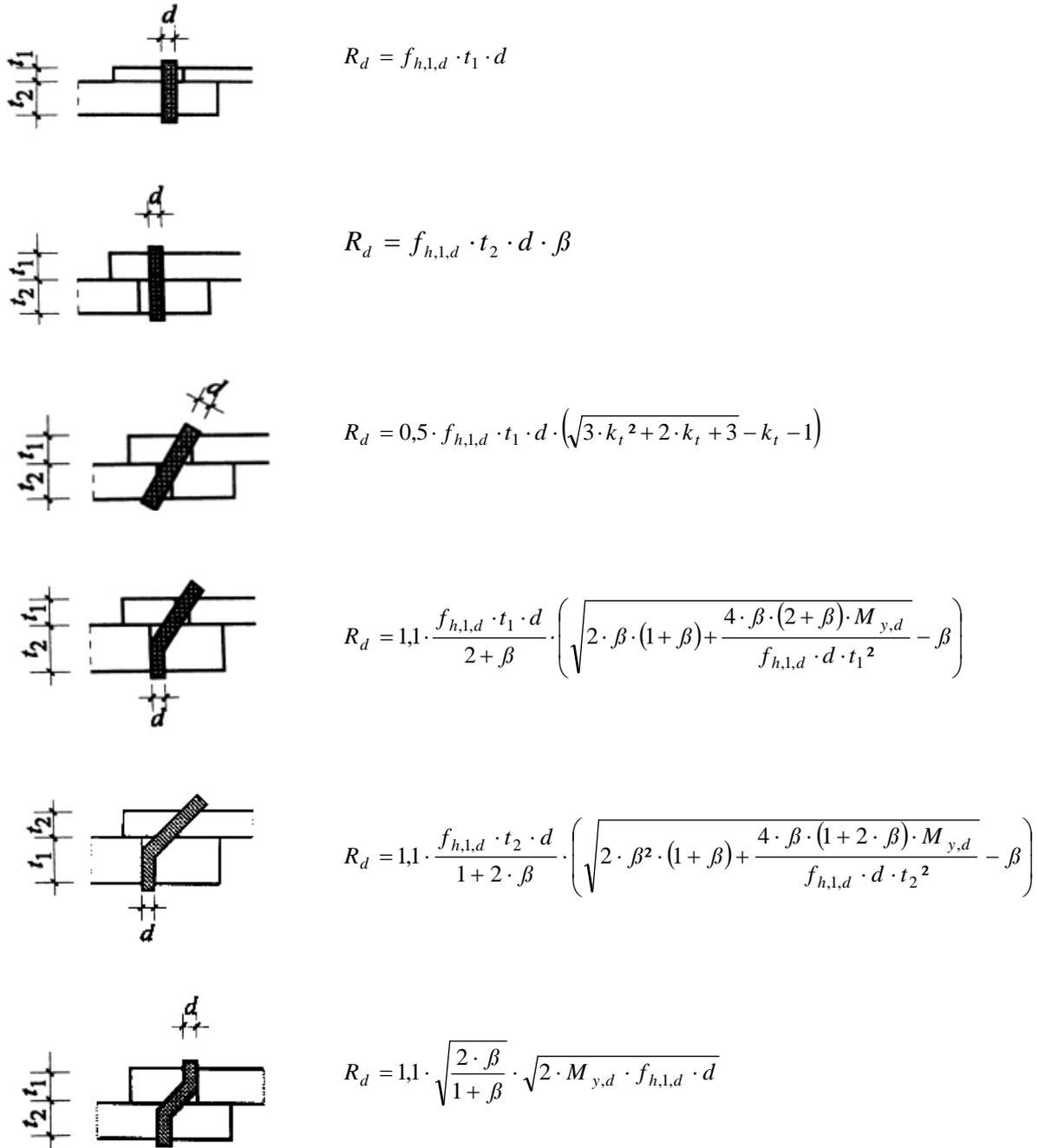
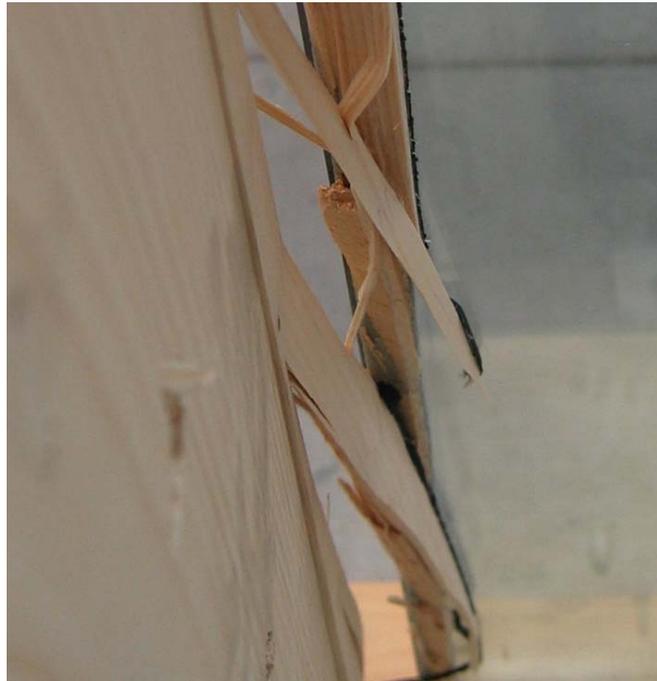


Abbildung 125: Versagen der Verbindungsmittel nach Eurocode 5 mit Bemessungswert der Tragfähigkeit  $R_d$  für  $\beta \neq 1$  pro Scherfuge und Verbindungsmittel (SCHNEIDER, K. (1998))

### 6.2.4 Koppelrahmen

Wenn die Tragfähigkeit und Steifigkeit des Klebstoffes und der Verschraubung entsprechend hoch sind so muss der Koppelrahmen eine hinreichende Materialfestigkeit aufweisen. Erschwerend kommt hinzu, dass er konstruktionsbedingt filigran ausgeführt werden sollte. Auch der Umstand, dass die Befestigungsmittelabstände zu den Koppelrahmenkanten sehr gering ausfallen und auch die normativen Mindestwerte unter Umständen sogar

unterschriften werden, muss bei der Wahl des Koppelrahmenwerkstoffes berücksichtigt werden.



**Abbildung 126: Versagen des Koppelrahmens**

### **6.2.5 Hauptrahmen**

Die Belastung des Hauptrahmens wird für den vorliegenden Anwendungsfall hauptsächlich durch das Abtragen der vertikalen Bauwerkslasten geprägt. Maßgebend und relevant wird somit der druckbelastete Stiel. Hierbei überlagert sich die vertikale Bauwerkslast mit der Druckresultierenden aus der horizontalen Belastung der Wandscheibe. Bei der Betrachtung der Knickstabilität des Druckstiels sollte die günstige Einspannungswirkung in der Wandscheibenebene jedenfalls berücksichtigt werden (siehe Kapitel 6.1.1).

## **6.3 Bemessung**

### **6.3.1 Sicherheitskonzepte**

Um die Anforderungen an ein Bauwerk im Sinne der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu erfüllen müssen die Abmessungen der Konstruktion und die verwendeten Materialien so gewählt werden, dass während der Nutzungsdauer des Bauwerks die Beanspruchbarkeit  $R$  (Widerstand der Konstruktion) mit hinreichender Wahrscheinlichkeit größer als die Beanspruchung  $S$  (Einwirkungen auf die Konstruktion) ist.

Die Ungleichung

$$S \leq R \quad (3)$$

mit

S	Einwirkungen auf die Konstruktion
R	Widerstand der Konstruktion

stellt dabei die Grenzzustandsfunktion dar. Sicherheit ist dann gegeben, wenn der Sicherheitsabstand  $Z$  größer Null ist.

$$Z = R - S \geq 0 \quad (4)$$

mit

Z	Sicherheitsabstand
---	--------------------

$R$  und  $S$  sind naturgemäß streuende Größen. Daher unterliegt der Bemessungsprozess einem gewissen Risiko. Dieses Risiko wird in globalen Sicherheitskonzepten (deterministisches Sicherheitskonzept) durch Sicherheitsfaktoren und bei Teilsicherheitskonzepten (semiprobabilistisches und probabilistisches Sicherheitskonzept) durch Teilsicherheitsbeiwerte mathematisch erfasst. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden dabei auf Grundlage der Probabilistik hergeleitet.

### 6.3.1.1 Deterministischer Ansatz

Das deterministische Sicherheitskonzept fasst die Summe aller Unsicherheiten auf Basis von Erfahrungswerten zusammen und bestimmt daraus eine abgeminderte Materialfestigkeit. Es werden somit alle Risiken und Streuungen in einem globalen Sicherheitsfaktor abgebildet.

$$S \leq \frac{R}{\eta} \quad (5)$$

mit

S	Einwirkungen auf die Konstruktion
R	Widerstand der Konstruktion
$\eta$	Globalsicherheitsfaktor

Der Vorteil liegt in der einfachen Anwendung, da für die Widerstandsseite die zuständigen Grenzwerte normativ festgelegt sind und im Rahmen der Bemessung keine Sicherheitsüberlegungen getroffen werden müssen. Der Nachteil liegt in der ungenauen Darstellung der Realität. Diese Form der Nachweisführung gilt nicht mehr als Stand der Technik, eignet sich aber gut für überschlägige Bemessungen.

### 6.3.1.2 Probabilistischer Ansatz

Die Probabilistik beruht auf der Versagenswahrscheinlichkeit der Gesamtkonstruktion. Es muss die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der verschiedenen Einwirkungen auf alle Teile der Gesamtkonstruktion bekannt sein. Ebenso ist auf der Widerstandsseite die genaue Kenntnis über das Materialverhalten der Bauteile und deren Zusammenspiel notwendig. Probabilistische Lösungsverfahren sind mathematisch sehr aufwendig und sollten daher eher für spezielle Einsatzfälle gewählt werden, bei denen herkömmliche Nachweisverfahren keine hinreichenden Ergebnisse liefern können. Es ist notwendig geeignete Modelle für die Versagenswahrscheinlichkeit der Gesamtstruktur zu finden und somit die Sicherheitsanforderungen entsprechend Einwirkung und Widerstand zu erfüllen und nachzuweisen. Da deren Verteilungen nicht beschränkt werden ergibt sich je nach Sicherheitsabstand  $Z$  ein Überschneidungsbereich. Die Fläche dieses Überschneidungsbereiches ist die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$ .

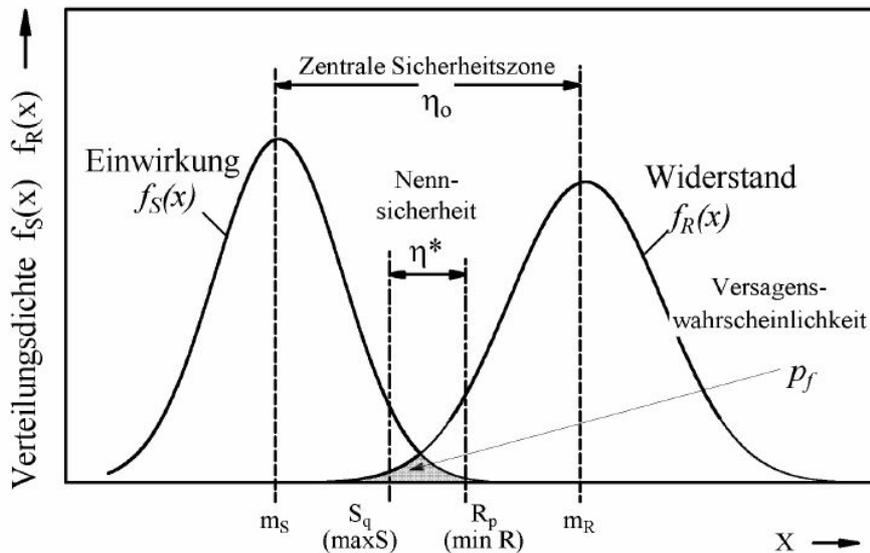


Abbildung 127: Verteilung von Einwirkung und Widerstand mit Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$

$$p_f = \int_0^{\infty} \int_0^{r-s} f_s(s) \cdot f_R(r) \cdot ds \cdot dr \quad (6)$$

mit

- $p_f$             Versagenswahrscheinlichkeit der Gesamtkonstruktion
- $f_s(s)$         Funktion der Einwirkung
- $f_R(r)$         Funktion der Einwirkung

### 6.3.1.3 Semiprobabilistischer Ansatz

Semiprobabilistische Nachweisformen werden in den meisten aktuellen Normen verwendet. Teilsicherheitsbeiwerte, die durch statistische Auswertungen ermittelt wurden, definieren dabei die Sicherheitsreserven in der Gegenüberstellung von Einwirkungen und Materialwiderständen:

$$S_d \leq R_d \quad (7)$$

mit

$$S_d = S_k \cdot \gamma_F \quad (8)$$

$$R_d \leq \frac{R_k}{\gamma_R} \quad (9)$$

mit

$S_d$	Bemessungswert der Einwirkung
$R_d$	Bemessungswert des Widerstandes
$S_k$	charakteristischer Wert der Einwirkung
$R_k$	charakteristischer Wert des Widerstandes
$\gamma_F$	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen
$\gamma_R$	Teilsicherheitsbeiwert für Widerstände

### 6.3.2 Versagenswahrscheinlichkeit von HGV-Gebäudeaussteifungen

Bei komplexen Verbundkonstruktionen wie HGV-Elementen, welche durch das Zusammenspiel einer Vielzahl von Konstruktionsmittel wirken, empfiehlt sich die Anwendung einer probabilistischen oder semiprobabilistischen Nachweisform. Unter Anwendung der Versagenswahrscheinlichkeit

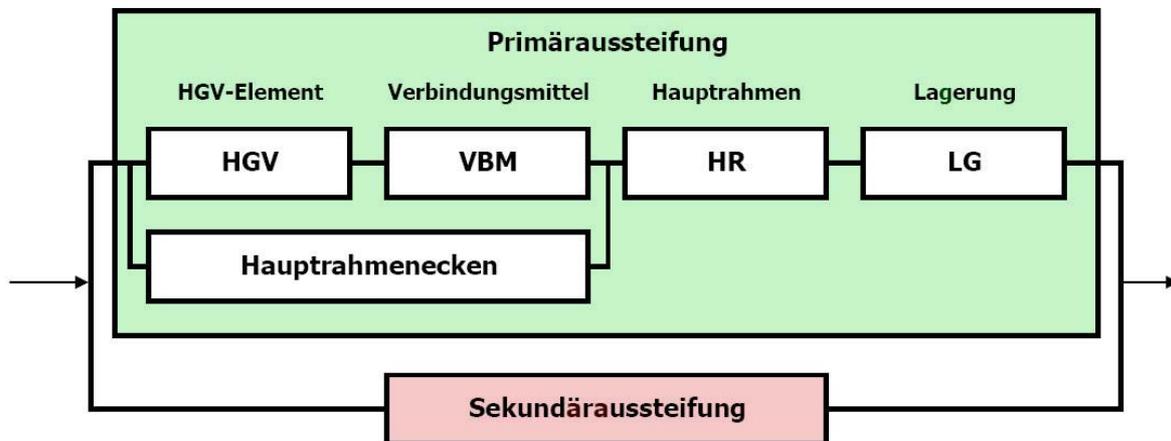
$$p_f = \int_0^{\infty} \int_0^{r=s} f_s(s) \cdot f_R(r) \cdot ds \cdot dr = \int_0^{\infty} f_R(r) \cdot [1 - F_S(r)] \cdot dr \quad (10)$$

mit

$F_S(r)$	Verteilungsfunktion der Einwirkung
----------	------------------------------------

lassen sich Versagenspfade zur Beurteilung der Versagenswahrscheinlichkeit erstellen. Geht man davon aus, dass ein Bauwerk nicht ausschließlich durch HGV-Elemente ausgesteift wird, sondern auch durch andere Systeme, wie herkömmliche Wandscheiben, so kann man eine Einteilung in ein primäres und sekundäres Aussteifungssystem vornehmen. Bei der Wahrscheinlichkeitsbetrachtung bleibt dabei die Reihung irrelevant. Gesamtversagen tritt nun dann ein, wenn die Primäraussteifung und die Sekundäraussteifung versagt. Deren Einzelversagenswahrscheinlichkeiten werden nach den Regeln der Zuverlässigkeitsberechnung von Bauwerken zusammengefasst. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass diese beiden Einzelversagenswahrscheinlichkeiten wiederum aus den

Zuverlässigkeiten der jeweiligen Systembestandteile gebildet werden. Jedes Konstruktionselement hat also einen speziell definierten Einfluss auf die gesamte Systemsicherheit.

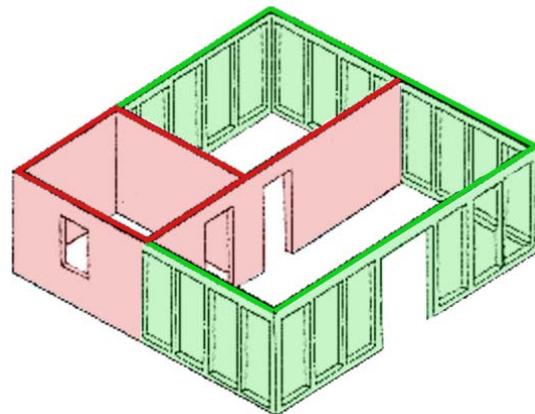


HGV HGV-Element, bestehend aus der Glasscheibe, der Klebefuge und dem Koppelrahmen

VBM mechanische Verbindungsmittel zwischen Koppelrahmen und Hauptrahmen, unter Einbezug des Versagens im Koppelrahmen, im Verbindungsmittel selbst und im Hauptrahmen

HR Hauptrahmenhölzer, unter Betrachtung der Schubbiegebelastung sowie Zug- und Druckbelastung aus Wind, u.U. in Lastkombination mit Belastungen aus dem Bauwerk (Nutzlasten, Schnee, etc.)

LG Lagerung der Hauptrahmenhölzer, im Speziellen der Zugverankerung



**Abbildung 128: Allgemeiner Versagenspfad einer Bauwerksaussteifung mit HGV-Elementen**

Betrachtet man das Verhalten des beschriebenen Bauwerksaussteifungssystems so kann man feststellen, dass ein Versagen der Primäraussteifung dann auftritt, wenn

- das HGV-Element beispielsweise durch Klebstoffbruch, Glasbruch oder zu starker Verformung versagt und die Biegesteifigkeit der Hauptrahmenecken überschritten wird,
- oder die Verbindungsmittel beispielsweise durch Spaltbruch des Koppelrahmens versagen und die Biegesteifigkeit der Hauptrahmenecken überschritten wird,
- oder die Hauptrahmenkonstruktion beispielsweise durch Ausknicken des druckbelasteten Stieles oder Schubbiegebruch versagt,
- oder die Lagerung der Konstruktion, durch Bruch oder zu starker Verformung des Zugverankerungsbleches versagt.

Nach den allgemeinen Berechnungsverfahren zur Zuverlässigkeit von Systemen nach SCHNEIDER, J. (1996) ergibt sich durch die Serienschaltung der Einzelversagenswahrscheinlichkeiten die Versagenswahrscheinlichkeit für die Primäraussteifung wie folgt:

$$P_f = P_{\text{Primäraussteifung}} \cdot P_{\text{Sekundäraussteifung}} \quad (11)$$

mit

$$P_{\text{Primäraussteifung}} = 1 - \prod_j \left( (1 - p_{fj}) \cdot \left( 1 - \left( 1 - \prod_i (1 - p_{fi}) \right) \cdot p_{f \text{ Hauptrahmenecken}} \right) \right) \quad (12)$$

mit

$$p_{fi} \in (p_{f \text{ HGV}}, p_{f \text{ VBM}})$$

und

$$p_{fj} \in (p_{f \text{ HR}}, p_{f \text{ LG}})$$

und

$P_f$  Versagenswahrscheinlichkeit der Gesamtaussteifung

Eine weitere Aufschlüsselung der wesentlichen Konstruktionselemente des HGV-Elementes in die einzelnen Konstruktionsmittel zeigt, dass auch diese in Serie zu sehen sind. Bei Versagen eines einzelnen Konstruktionsmittels, wie beispielsweise der Klebefuge, verliert die Gesamtkonstruktion ihre aussteifende Wirkung.

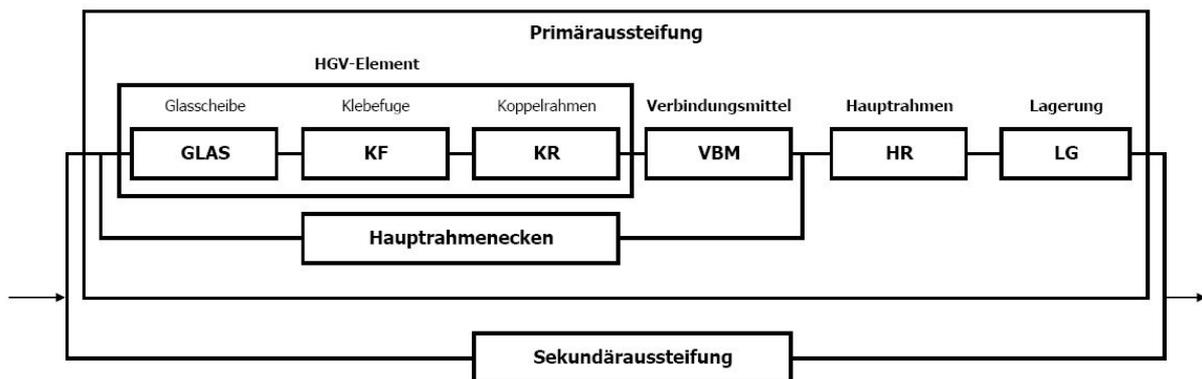


Abbildung 129: Konstruktionsmittel im Versagenspfad der aussteifenden HGV-Konstruktion

Der Berechnungsansatz bleibt also bei dieser Detaillierung identisch, es fließen aber die Einzelversagenswahrscheinlichkeiten der Konstruktionsmittel direkt ein.

$$P_{Pr\text{imäreraussteifung}} = 1 - \prod_j \left( (1 - p_{fj}) \cdot \left( 1 - \left( 1 - \prod_k (1 - p_{fk}) \cdot (1 - p_{fVBM}) \right) \cdot p_{f\text{Hauptrahmenecken}} \right) \right) \quad (13)$$

mit

$$p_{fk} \in (p_{fGLAS}, p_{fKF}, p_{fKR})$$

und

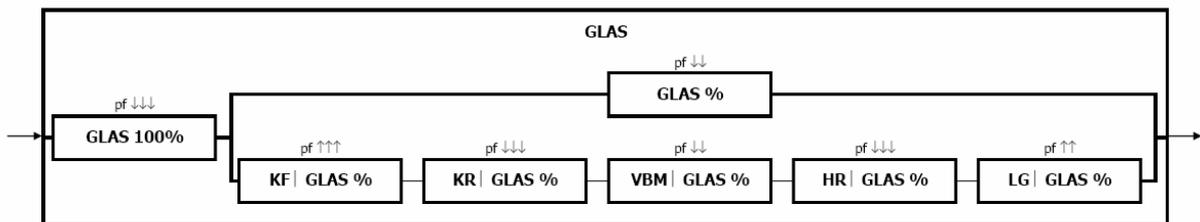
$$p_{fj} \in (p_{fHR}, p_{fLG})$$

Da das Versagen von HGV-Elementen in Form einer Versagenskombination einzelner Konstruktionsmittel sehr wahrscheinlich ist werden in Folge zur weiteren Detaillierung die wesentlichen Einzelversagensmodelle für die betrachteten HGV-Elemente gezeigt. Eine Einschätzung der Einzelversagenswahrscheinlichkeiten auf Basis der Erkenntnisse aus den Versuchen wird zur Versinnbildlichung dargestellt. Die genaue Ermittlung der einzelnen Wahrscheinlichkeitswerte könnte durch statistisch ausgewertete Versuchsreihen erfolgen, welche jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit sind.

### 6.3.3 Versagenswahrscheinlichkeit der wesentlichen HGV-Konstruktionsmittel

#### 6.3.3.1 Versagensmodell Glasscheibe

Versagt beispielsweise die Tragfähigkeit der Glasscheibe stellt sich, insbesondere bei Verbundsicherheitsglas und teilvorgespanntem Glas, eine Restaussteifungsfähigkeit der gesprungenen, aber noch intakt verklebten Glasscheibe ein (siehe dazu auch NIEDERMAIER, P. (2002)).



- GLAS 100%    Komplettversagen der Glasscheibe
- GLAS %      Teilversagen der Glasscheibe
- KF | GLAS %    Klebefugeversagen, wenn die Glasscheibe teilweise versagt
- KR | GLAS %    Koppelrahmenversagen, wenn die Glasscheibe teilweise versagt
- VBM | GLAS %    Verbindungsmittelversagen, wenn die Glasscheibe teilweise versagt
- HR | GLAS %    Hauptrahmenversagen, wenn die Glasscheibe teilweise versagt
- LG | GLAS %    Auflagerversagen, wenn die Glasscheibe teilweise versagt
- pf ↑↑↑        Versagenswahrscheinlichkeit hoch
- pf ↓↓↓        Versagenswahrscheinlichkeit niedrig

Abbildung 130: Versagenspfad der Glasscheibe eines HGV-Elements

Bei Anwendung des dargestellten Versagenspfades für die Glasscheibe im allgemeinen Versagenspfad nach Abbildung 129 versagt das Gesamtsystem mit folgender Wahrscheinlichkeit Pf:

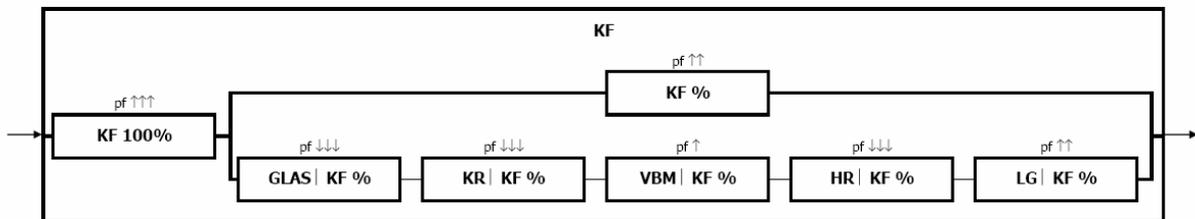
$$P_{f\ GLAS} = 1 - \left(1 - P_{f\ GLAS\ 100\%}\right) \cdot \left(1 - P_{f\ GLAS\ \%} \cdot \left(1 - \prod_j (1 - P_{f\ j})\right)\right) \quad (14)$$

mit

$$P_{f\ j} \in \left(P_{f\ KF\ | \ GLAS\ \%}, P_{f\ KR\ | \ GLAS\ \%}, P_{f\ VBM\ | \ GLAS\ \%}, P_{f\ HR\ | \ GLAS\ \%}, P_{f\ LG\ | \ GLAS\ \%}\right)$$

### 6.3.3.2 Versagensmodell Klebefuge

Versagt die Klebefuge an der Stelle der maximalen Belastung und pflanzt sich von diesem Anriss der Klebefugenbruch mit steigender Belastung fort, so übernehmen zusehends andere Konstruktionsmittel die statische Funktion der gerissenen Fuge. Bei ausreichender Belastbarkeit dieser Konstruktionsmittel wird die Klebefuge zu 100% versagen. Durch Spannungumlagerungen kann es auch vorkommen, dass bei teilweise gerissener Klebefuge beispielsweise die Hauptrahmenstiele versagen. Je steifer der Klebstoff, desto größer wird diese Versagenswahrscheinlichkeit (siehe Abbildung 113).



KF 100%	Komplettversagen der Klebefuge
KF %	Teilversagen der Klebefuge
GLAS   KF %	Glasversagen, wenn die Klebefuge teilweise versagt
KR   KF %	Koppelrahmenversagen, wenn die Klebefuge teilweise versagt
VBM   KF %	Verbindungsmittelversagen, wenn die Klebefuge teilweise versagt
HR   KF %	Hauptrahmenversagen, wenn die Klebefuge teilweise versagt
LG   KF %	Auflagerversagen, wenn die Klebefuge teilweise versagt
pf ↑↑↑	Versagenswahrscheinlichkeit hoch
pf ↓↓↓	Versagenswahrscheinlichkeit niedrig

**Abbildung 131: Versagenspfad der Klebefuge eines HGV-Elements**

Wendet man den dargestellten Versagenspfad für die Klebefuge im allgemeinen Versagenspfad nach Abbildung 129 an so versagt das Gesamtsystem mit folgender Wahrscheinlichkeit Pf:

$$p_{f\ KF} = 1 - \left(1 - p_{f\ KF\ 100\%}\right) \cdot \left(1 - p_{f\ KF\ \%} \cdot \left(1 - \prod_j (1 - p_{f\ j})\right)\right) \quad (15)$$

mit

$$p_{f\ j} \in \left(p_{f\ GLAS\ |KF\ \%}, p_{f\ KR\ |KF\ \%}, p_{f\ VBM\ |KF\ \%}, p_{f\ HR\ |KF\ \%}, p_{f\ LG\ |KF\ \%}\right)$$

### 6.3.3.3 Versagensmodell Verbindungsmittel

Versagen die Verbindungsmittel an der Stelle der maximalen Belastung so übernehmen analog dem „Versagensmodell Klebefuge“ zusehends andere Konstruktionsmittel die statische Funktion der ausgefallenen Verbindungsmittel. Bei ausreichender Belastbarkeit der anderen Konstruktionsmittel wird die gesamte Verbindungsmittelreihe rundum zu 100% versagen. Durch Spannungsumlagerungen kann es auch vorkommen, dass bei nur teilweise ausgefallenen Verbindungsmitteln beispielsweise die Koppelrahmenhölzer in Folge versagen. Bei besser dimensionierten Verbindungsmitteln ist diese Versagenswahrscheinlichkeit (siehe Abbildung 132).

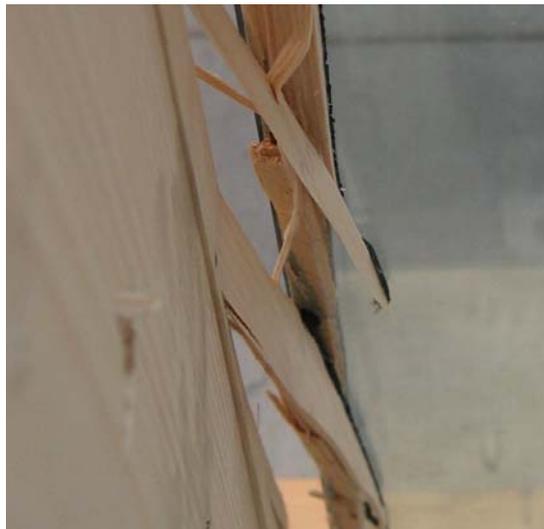
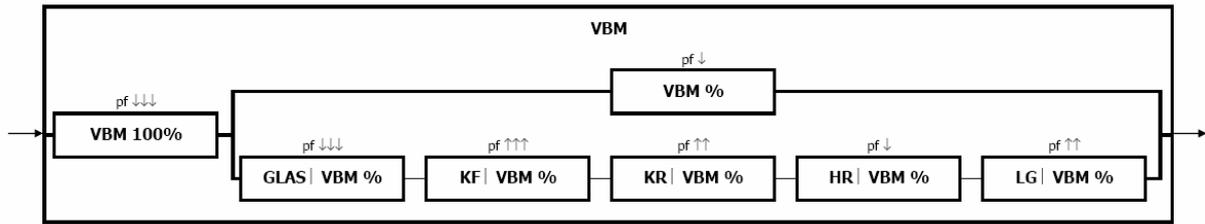


Abbildung 132: Versagen der Koppelrahmenleiste an einem HGV-Element



- VBM 100%      Kompletter Versagen der Verbindungsmittel
- KF %            Teilversagen der Verbindungsmittel
- GLAS | VBM %   Glasversagen, wenn die Verbindungsmittel teilweise versagen
- KF | VBM %      Klebefugenversagen, wenn die Verbindungsmittel teilweise versagen
- KR | VBM %      Koppelrahmenversagen, wenn die Verbindungsmittel teilweise versagen
- HR | VBM %      Hauptrahmenversagen, wenn die Verbindungsmittel teilweise versagen
- LG | VBM %      Auflagerversagen, wenn die Verbindungsmittel teilweise versagen
- pf ↑↑↑          Versagenswahrscheinlichkeit hoch
- pf ↓↓↓          Versagenswahrscheinlichkeit niedrig

**Abbildung 133: Versagenspfad der Verbindungsmittel an einem HGV-Element**

Wendet man den dargestellten Versagenspfad für die Verbindungsmittel im allgemeinen Versagenspfad nach Abbildung 129 an so versagt das Gesamtsystem mit folgender Wahrscheinlichkeit Pf:

$$P_{f VBM} = 1 - (1 - P_{f VBM 100\%}) \cdot \left( 1 - P_{f VBM \%} \cdot \left( 1 - \prod_j (1 - P_{f j}) \right) \right) \quad (16)$$

mit

$$P_{f j} \in (P_{f GLAS | VBM \%}, P_{f KF | VBM \%}, P_{f KR | VBM \%}, P_{f HR | VBM \%}, P_{f LG | VBM \%})$$

### 6.3.4 Materialwiderstände

Zur Gegenüberstellung mit den Tragwerkseinwirkungen stellen sich die Materialwiderstände hinsichtlich der Baustofffestigkeiten, -kennwerte, -abmessungen etc. wie folgt dar:

$$R_d = R(f_{1,d}, f_{2,d}, \dots, E_{1,d}, E_{2,d}, \dots, G_{1,d}, G_{2,d}, \dots, a_{1,d}, a_{2,d}, \dots) \quad (17)$$

mit

$f_{i,d}$	Bemessungswerte der Baustofffestigkeiten
$E_{i,d}$	Bemessungswerte der Elastizitätsmodule
$G_{i,d}$	Bemessungswerte der Schubmodule
$a_{i,d}$	Bemessungswerte der geometrischen Größen

Die Bemessungswerte der Baustofffestigkeiten hängen je nach Materialart von unterschiedlichen Faktoren ab. So wird die charakteristische Materialfestigkeit zunächst durch einen Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  geteilt. Für anisotrope Materialien wie Holz und Holzwerkstoffe ist dieser Faktor mit 1,3 festgelegt, für Stahl ist  $\gamma_M=1,0$  zu setzen. Für Klebstoffe ist bis dato kein Teilsicherheitswert beschrieben. Klebstoffe sind zwar in der Regel isotrop, doch beeinflussen Verformungszwängungen durch die Fügeflächen und Einflüsse der Klebefugendicke insbesondere bei elastischen Klebstoffen deren richtungsorientierte Materialeigenschaften.

$$f_{i,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{i,k}}{\gamma_m} \quad (18)$$

mit

$k_{\text{mod}}$	Modifikationsfaktor (0,2 bis 1,1)
$f_{i,k}$	charakteristischer Wert der Baustofffestigkeit
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoffeigenschaften (1,0 bis 1,8)

Der Modifikationsfaktor  $k_{\text{mod}}$  beschreibt die Veränderung der Eigenschaften von gebräuchlichen Bauhölzern und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit der Nutzungsklasse und der Lasteinwirkungsdauer. Die Nutzungsklassen 1 bis 3 klassifizieren dabei die Holzfeuchtigkeit.

Für die Berechnung des Bemessungswertes der Klebstofffestigkeit wird empfohlen, ebenso wie bei Holzwerkstoffen, einen Modifikationsfaktor einzusetzen. Entscheidend sind die Lasteinwirkungsdauer und das bauphysikalische Milieu der Fuge in Abhängigkeit des Klebstofftyps. Da Klebstoffe eine unter Umständen grundverschiedene Lebensdauer je nach Temperatur-, Feuchtigkeits- und Witterungsumfeld sowie UV-Strahlenbelastung aufweisen, kann sinnvoller Weise zwischen Außen- und Innenanwendung bei der Definition des Modifikationsfaktors unterschieden werden.

### 6.3.5 Einwirkungen

Bei tragenden Bauteilen wie Biegeträgern oder Platten unter ständigen oder langzeitlichen Lasten ist die Notwendigkeit ein hohes Lastniveau abzutragen aus wirtschaftlichen und konstruktiven Gründen gegeben. Daher sollen die verwendeten Materialien auch sinnvoller Weise gut ausgenutzt werden und optimalerweise an ihre Tragfähigkeitsgrenzen geführt werden. Im vorliegenden Anwendungsfall „aussteifende Wandscheibe“ ist die Belastungscharakteristik etwas anders. Die Belastung durch Nutzlasten soll hier im Speziellen ausgeschlossen werden. Somit liegt lediglich das Eigengewicht der Glasscheibe als ständige Last an. Windlasten in Scheibenebene und Winddruck und -sog lotrecht auf die Scheibe werden durch die HGV-Konstruktion, resp. die Glasscheibe, abgetragen. Diese kurzzeitigen Belastungen stellen wesentlich geringere Anforderungen an die Tragfähigkeit eines Wandscheibenelementes. Winddruck und -sog lotrecht zur Ebene wirken zwar auch nur kurzzeitig, sind aber bei großformatigen Glasscheiben maßgebend für die Glasdimensionierung. Ständige Lasten aus Imperfektionen, resp. Schiefstellungen lotrechter

lastabtragender Bauteile, können zu zusätzlichen horizontalen Lasten in Scheibenebene führen und sind in Kombination mit anderen horizontalen Belastungen zu setzen. Einwirkungen durch Erdbeben, welche als horizontale Ersatzlasten erfasst werden treten auch nur als kurzzeitige Last auf. Wesentlich ist also, dass HGV-Elemente als aussteifende Wandscheiben weitestgehend nur kurzzeitig belastet werden, insbesondere wenn Sie an ihre Gebrauchstauglichkeits- oder Tragfähigkeitsgrenze geführt werden. Dies ist ein entscheidender Vorteil für die Anwendung elastischer oder semi-elastischer Klebstoffe, da nach derzeitigem Stand der Technik deren Langzeitbelastbarkeit nur ein Bruchteil deren Kurzzeitbelastbarkeit beträgt. Aus diesem Grund würde es sich auch als vorteilhaft erweisen, das Glasscheibeneigengewicht mechanisch abzutragen.

### 6.3.5.1 Bemessungswert für den Grenzzustand der Tragfähigkeit

Das Zusammenstellen der Einzellastfälle zu Lastfallkombinationen als Tragwerkseinwirkung  $S_d$  erfolgt entsprechend dem allgemeinen semiprobabilistischen Ansatz mit Teilsicherheitsbeiwerten und Kombinationsbeiwerten.

$$S_d = \gamma_G \cdot \sum_i G_{k,i} + \gamma_Q \cdot \left( Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_i \cdot Q_{k,i} \right) \quad (19)$$

mit

$\gamma_G$	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen (1,0 bis 1,5)
$\gamma_Q$	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen (0 bis 1,5)
$G_{k,i}$	charakteristische ständige Lasten
$Q_{k,1}$	führende charakteristische veränderliche Last
$Q_{k,i}$	weitere charakteristische veränderliche Lasten
$\psi_i$	Kombinationsbeiwert (0 bis 0,8)

Besonderes Augenmerk ist für den vorliegenden Anwendungsfall auf die Kombination mehrerer Windlasten zu legen. Da für die Bemessung der Klebefuge die Kombination aus Schubspannungen in der Ebene und Zugspannungen aus der Ebene maßgebend erscheint sind die entsprechenden Kombinationswerte einzusetzen. Durch gleichzeitiges einwirken einer horizontalen Windlast in Scheibenebene und Windsog an der Gebäudeseite oder –ecke entsteht ein dreidimensionaler Spannungszustand in der Klebefuge.

### 6.3.5.2 Bemessungswert für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit werden auf Grund des niedrigeren Gefährdungspotentials bei Grenzzustandsüberschreitung keine Teilsicherheitsbeiwerte verwendet, also gleich 1,0 gesetzt. Das Einwirkungs niveau unterscheidet sich dadurch im Vergleich zum Grenzzustand der Tragfähigkeit um den Faktor 1,35 bis 1,5. Dieser Umstand sollte bei der globalen Sicherheitsbetrachtung und der Definition der Versagenswahrscheinlichkeiten bei elastischen Tragwerken, wie dem elastisch verklebten HGV-Element, berücksichtigt werden.

$$S_d = \sum_i G_{k,i} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_i \cdot Q_{k,i} \quad (20)$$

mit

$G_k$	charakteristisches Eigengewicht
$Q_{k,1}$	führende charakteristische veränderliche Last
$Q_{k,i}$	weitere charakteristische veränderliche Lasten
$\psi_i$	Kombinationsbeiwerte (0 bis 0,8)

### 6.3.6 Ansätze für mögliche Bemessungsstrategien für HGV-Elemente

Bei der Gegenüberstellung von Einwirkung und Materialwiderstand bestehen nun verschiedene Möglichkeiten die spezielle Situation von HGV-Elementen zu berücksichtigen. Im Wesentlichen geht es im vorliegenden Falle darum, die Materialeigenschaften des Klebstoffes sicher abzubilden. Da insbesondere bei elastischen Klebstoffen nach heutigem Stand der Technik die Tragfähigkeit im Laufe der Zeit durch Langzeitbelastung oder Umwelteinflüsse abnimmt, ist dieser Umstand auf der Einwirkungsseite und / oder auf der Widerstandsseite zu berücksichtigen.

#### 6.3.6.1 Definition der Bemessungswerte zufolge tatsächlicher Materialkennwerte

Bei vielen Klebstoffen verringert sich bei Langzeitbelastung oder durch langzeitliche Umwelteinflüsse die Tragfähigkeit signifikant. Ein Absinken des Belastungsniveaus unter 20% des ursprünglichen Niveaus ist dabei nicht untypisch. Je nachdem welche Einflussfaktoren vorliegen, könnte ein Modifikationsfaktor die zeitlich veränderlichen Klebstoffeigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit reduzieren. Folgende Faktoren sollten diesen Modifikationsfaktor bestimmen:

- Temperaturumfeld (Umweltklima, Innenklima, Innen- oder Außenanwendung)
- Feuchtigkeitsmilieu (Umweltklima, Innenklima)
- UV-Belastung
- Belastungsdauer
- Belastungsart
- „„

Die Faktoren sollten durch den Klebstoffhersteller auf Basis von gesicherten Versuchsreihen angegeben werden, wodurch der Modifikationsfaktor durch den Ingenieur gewählt und die Tragfähigkeit klebstoffspezifisch definiert werden kann. Diese anwendungsorientierte Anschauung wird eine realistische Darstellung der Tragfähigkeit hervorbringen. Auch der Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoffeigenschaften könnte klebstoffspezifisch angesetzt werden und somit die Zuverlässigkeit der Widerstandsseite richtig formulieren.

#### 6.3.6.2 Definition der Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite für kombinierte Aussteifungssysteme

Ist für die Gebäudeaussteifung neben den HGV-Elementen eine weitere (sekundäre) Konstruktion ansetzbar, so kann diese dazu genutzt werden, das nachteilige Zeitverhalten eines Klebstoffes zu kompensieren. Mit zunehmender Abnahme des Aussteifungsvermögens der HGV-Elemente wird nach und nach die sekundäre Aussteifung aktiviert. Dabei sei dieses Zusammenspiel von Primär- und Sekundäraussteifung im Kontext der Gesamtsicherheitsbetrachtung zu sehen. Als Sekundäraussteifung könnten folgende Elemente dienen:

- steife Rahmenecken
- eingespannte Stiele
- unterstützende Windverbände
- steife Gebäudekerne
- vereinzelte Wandscheibenelemente
- ...

Häufig auftretende Belastungen wie Wind könnten somit durch die primäre Aussteifung übernommen werden. Außergewöhnliche Belastungen, welche dieses Niveau überschreiten, könnten durch die zusätzliche Wirkung der sekundären Aussteifung mit ausreichender Sicherheit abgetragen werden. Es entsteht somit ein „soziales Kombinationsverhalten“ zweier Aussteifungssysteme. Durch diese Diversifikation der Versagenswahrscheinlichkeit wäre im Extremfall der außergewöhnlichen Einwirkung als höchstes Lastniveau mit einem verringerten Teilsicherheitsbeiwert auf der Einwirkungsseite oder einem speziellen Kombinationsbeiwert  $< 1$  eine Reduzierung der Einwirkung denkbar.

## 7 Ergebnis und Ausblicke

### 7.1 Ergebnis

Die vorliegende Arbeit wurde mit dem Ziel durchgeführt, eine praxistaugliche Konstruktion eines wandartigen Holz-Glas-Verbundelementes mit statisch aussteifender Wirkung zu entwickeln und dessen Trag- und Versagensverhalten auf Basis bestehender Bemessungsansätze zu beurteilen. Dies erfolgte im Wesentlichen durch

- die Untersuchung geeigneter Klebstoffe für den statisch wirksamen Verbund von Holz und Glas,
- das analytische Entwickeln von Konstruktionstypen für Holz-Glas-Verbundwandscheiben,
- experimentelle Untersuchungen von Prototypen verschiedener Bauformen und
- die Überleitung der gewonnenen Erkenntnisse in die bemessungsrelevanten Bereiche Tragverhalten, Versagensmechanismen, Versagenswahrscheinlichkeiten sowie Einwirkung und Widerstand

umgesetzt.

#### 7.1.1 Geklebter Verbund von Holz und Glas

Je nach Einsatzgebiet des Holz-Glas-Verbundelementes muss der Klebstoff einen Kompromiss aus Dauerhaftigkeit, Zuverlässigkeit, Verarbeitungssicherheit, Steifigkeit und Festigkeit mit entsprechender Gewichtung der jeweiligen Eigenschaft bieten. Die Frage nach dem richtigen Klebstoff hängt also wesentlich von der Anwendung ab. Insbesondere bei Außenanwendungen sind die Dauerhaftigkeit und das Kriechverhalten als Wesentlich zu bewerten. Dort wäre auch, je nach Stand der Klebstofftechnik, eine Reduzierung der Steifigkeit zugunsten der langzeitlichen Zuverlässigkeit in Kauf zu nehmen.

- *Es wurde gezeigt, dass bei Kurzzeitbelastungen bereits verfügbare Klebemittel wie Silikone, Polyurethane und Acrylate verwendbare Klebeeigenschaften für den Verbund von Holz und Glas aufweisen.*

- *Die Untersuchungen ergaben, dass eine Einteilung in elastische, semi-elastische und steife Klebstoffe sinnvoll erscheint, wobei gezeigt wurde, dass semi-elastische Klebstoffe bei Kurzzeitbelastungen über eine ausreichende mechanische Belastbarkeit für den Einsatz im Hochbau verfügen.*
- *Ein Einfluss der Klebefugengeometrie auf die Festigkeit und Steifigkeit von semi-elastischen Klebstoffen wurde aufgezeigt, wobei sich dieser stark klebstoffspezifisch darstellt.*
- *Für hochbelastete Wandscheibenelemente sollen somit steife oder semi-elastische Klebstoffe verwendet werden, wobei in Fassaden oder Wintergärten mit geringerem Belastungsniveau elastische Systeme ihre Anwendung finden können.*

### **7.1.2 Konstruktive Aspekte**

Um Stärken und Schwächen verschiedener Bauformen von Holz-Glas-Verbundelementen hinsichtlich statischer Wirksamkeit, baupraktischer Umsetzbarkeit und bauphysikalischem Verhalten aufzuzeigen wurden verschiedene Konstruktionslösungen analysiert.

- *Aus statischer Sicht kann festgestellt werden, dass sich die Verformung des Gesamtelementes hauptsächlich in zwei Ebenen abspielt. Die innere Verformungsebene ist dabei die Verschraubung und die äußere die Klebefuge. Ausschlaggebend für die Gesamtverformung der Konstruktion sind zu einem großen Anteil die Steifigkeiten dieser beiden Ebenen, wobei die Kompaktheit der Bauart signifikant ist.*
- *Die Verwendung von Stufenfalzglas für den vorliegenden Anwendungsfall hat bauphysikalische Nachteile.*
- *Die Verwendung von Aluminiumprofilen als Koppelement zeigt sich bauphysikalisch und statisch ungünstig.*
- *Die Herstellbarkeit und Montierbarkeit, das Ausgleichsvermögen von Bautoleranzen, die Austauschbarkeit und die Kompatibilität der Verbundelemente sind für einen praktischen Einsatz entscheidend.*

### **7.1.3 Belastungsverhalten**

Zur Untersuchung und zum Vergleich des Trag-, Verformungs- und Versagensverhaltens verschiedener Konstruktionslösungen wurden Vorversuche im elastischen Bereich sowie Bruchversuche an Hand von Prototypen in realem Maßstab durchgeführt. Zum Einen wurden die Thesen aus dem analytischen Konstruktionsvergleich verifiziert und zum Anderen wurde die Leistungsfähigkeit von elastischen und semi-elastischen Holz-Glas-Verbundelementen aufgezeigt.

- *Die Steifigkeit der Verklebung hat den größten Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit der Konstruktion. Insbesondere bei elastisch verklebten Verbundelementen wirkt sich die Steifigkeit der Verschraubung nicht wesentlich aus.*
- *Stabilitätsverlust oder ein ausgeprägter Beulzustand der Glasscheibe konnte bei elastisch und semi-elastisch verklebten Elementen bei der untersuchten Scheibengeometrie nicht beobachtet werden.*

- *Die erreichten Bruchlastniveaus bei Kurzzeitbelastungen sind sowohl bei den elastisch als auch bei den semi-elastisch verklebten Elementen ausreichend für das untersuchte Anwendungsgebiet.*
- *Das Verformungsniveau und somit die Gebrauchstauglichkeit ist bei den untersuchten elastischen und semi-elastischen Elementen maßgebend.*
- *Die Gebrauchstauglichkeit bei Kurzzeitbelastung der untersuchten elastischen Holz-Glas-Verbundelemente ist als ausreichend für die Anwendung bei niedrig belasteten Konstruktionen einzustufen.*
- *Die Gebrauchstauglichkeit bei Kurzzeitbelastung der untersuchten semi-elastischen Holz-Glas-Verbundelemente ist als ausreichend für die Anwendung im herkömmlichen Hochbau einzustufen.*
- *Bei allen untersuchten elastischen und semi-elastischen Holz-Glas-Verbundelementen liegt das Gebrauchstauglichkeitsniveau bei Kurzzeitbelastung etwa 80% bis 90% unter dem Traglastniveau.*

#### **7.1.4 Konstruktive Umsetzung**

Für die abschließende Entwicklung eines wandartigen Holz-Glas-Verbundelementes wurden die Erkenntnisse aus den Klebstoffanalysen, Konstruktionsvergleichen und experimentellen Untersuchungen verschiedener Prototypen in einer optimierten Konstruktion für die Anwendung im klassischen Holz-Rahmenbau zusammengefasst.

- *Es wurde eine nach Stand der Technik und auf Basis der üblichen Baupraxis patentierte Konstruktionslösung gefunden und ausformuliert.*

#### **7.1.5 Bemessungskonzept**

Um das Tragverhalten auf Basis bestehender Bemessungskonzepte zu beurteilen wurden die Versagenskriterien auf Basis der Erkenntnisse aus den vorgegangenen Untersuchungen beschrieben. Es wurden weiters die Versagensmechanismen der analysierten Konstruktionen und deren Einfluss auf ein sicheres Bemessungskonzept dargestellt. Um einen möglichen Ansatz zur Ermittlung von Teilsicherheitsbeiwerten für Holz-Glas-Verbundelemente aufzuzeigen wurden verschiedene Versagensmodelle formuliert.

- *Hinsichtlich der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit eines Holz-Glas-Verbundelementes sind Einzelversagenswahrscheinlichkeiten der Konstruktionsmittel wie Glasscheibe, Klebefuge, Verschraubung, Holzrahmen, etc. in Serie zu schalten.*
- *Bei möglichen Versagenskombinationen verschiedener Konstruktionsmittel sind diese Einzelversagenswahrscheinlichkeiten parallel zu schalten.*
- *Je nach Konstruktionstyp können sich die Einzelversagenswahrscheinlichkeiten der Konstruktionsmittel äußerst unterschiedlich darstellen.*
- *Ein Festlegen der wesentlichen Konstruktionsparameter wie Klebefuge- und Koppelrahmengenometrie, Klebstofftyp, Befestigungsart, HGV-Elementgeometrie, Pfosten- und Riegelgeometrie, etc. schränkt zwar die konstruktiven Möglichkeiten ein, erscheint aber für eine klare Formulierung eines allgemeinen Teilsicherheitsbeiwertes auf der Widerstandsseite notwendig und sinnvoll.*

- *Zur Ermittlung der Bemessungsfestigkeit der Klebefuge erscheint das Einführen eines Modifikationsbeiwertes zur Darstellung der Nutzungsklasse, Belastungsdauer und Zuverlässigkeitsanforderung sinnvoll.*

## 7.2 Ausblick und Empfehlungen

Die vorliegende Arbeit kann als Weiterführung des Themas Holz-Glas-Verbundelemente gesehen werden, wie es durch KREHER, HAMM und NIEDERMAIER mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Zielen in ihrer Art erstmals behandelt wurde. Die Vertiefung erfolgte mit der Konkretisierung und wissenschaftlichen Betrachtung der Konstruktion an sich, sowie der Überleitung der resultierenden Erkenntnisse in die Bemessungs- und Versagensthematik. Im Zuge der Ausarbeitung konnten wesentliche Schritte zur Weiterentwicklung von Holz-Glas-Verbundelementen auf dem Weg in die Baupraxis gesetzt werden. Trotzdem soll auch angeregt werden, spezielle Themen noch wissenschaftlich aufzuarbeiten und weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten.

### 7.2.1 Klebstoffe

Das Potential verschiedener Klebstoffe wurde sowohl in dieser Arbeit als auch in vorangehenden gezeigt. Im Bereich der Kurzzeitbelastung konnte eine eindrucksvolle statische Leistungsfähigkeit dargestellt werden.

- *Um eine zuverlässige Wirksamkeit über eine sinnvolle Lebensdauer von Holz-Glas-Verbundelementen gewährleisten zu können sind noch weiterführende Untersuchungen notwendig. Kriechversuche, Wasserlagerungsversuche, UV-Strahlungsversuche und Langzeitversuche in Anlehnung an die ETAG 002 könnten weitere Erkenntnisse bringen.*
- *Hinsichtlich Bemessung der Klebefuge wird empfohlen, ein Kleinproben-Prüfprozedere zu formulieren, welches eine charakteristische Steifigkeit, ein realistisches Gebrauchslastniveau und den geeigneten Anwendungsbereich in Form eines Modifikationsbeiwertes hervorbringt. Um eine Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit zu erreichen sollten die Klebstoffhersteller Randbedingungen wie den Klebprozess, Substratmaterial und -beschaffenheit, Fugengeometrie, bauphysikalische Einsatzbereiche, etc. sehr eng eingrenzen.*

### 7.2.2 Konstruktion

Es wurden verschiedene Konstruktionsansätze gezeigt und nach den Gesichtspunkten Statik, Bauphysik und Praxistauglichkeit analysiert. Als Ergebnis dieser Arbeit liegt ein entsprechender Konstruktionstyp vor, der die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Kriterien erfüllt.

- *Als Weiterführung der Konstruktionslösung werden bauphysikalische Langzeitversuche in realem Maßstab empfohlen, um Einflüsse wie Feuchtigkeit, UV-Strahlung, Wind- und Schlagregendichtheit, Zuverlässigkeit, Kondensatbildung, Temperaturverhalten, etc. im Experiment zu untersuchen. Vor allem auf die Abdichtung des HGV-Elementanschlusses und der äußeren Versiegelung sei dabei besonderes Augenmerk zu legen.*

- *Eine spezielle Betrachtung und Adaptierung der Konstruktion zur Anwendung als Innenwandelement erscheint sinnvoll. Auch die Wahl des Klebstoffes kann für die Innenanwendung unterschiedlich ausfallen.*
- *Verfahren zur industriellen Verklebung von Glas im herkömmlichen Fensterbau existieren bereits. Eine Adaptierung dieser Methoden zur Verklebung der Koppelleisten auf Isolierglas erscheint naheliegend und möglich, erfordert jedoch eine spezielle Betrachtung hinsichtlich Qualitätssicherheit. Da die beschriebenen HGV-Elemente eine statische Aufgabe erfüllen sind entsprechende QS-Prüfprozedere zu entwickeln, um insbesondere den Klebprozess abzusichern.*

### **7.2.3 Anwendung in der Baupraxis**

In dieser Arbeit wurde die statische Leistungsfähigkeit baupraktisch umsetzbarer HGV-Elemente unter Kurzzeitbelastungen dargestellt. Die vorliegenden Erkenntnisse bestätigen grundsätzlich die Eignung im Rahmen der durchgeführten Analysen.

- *Weiterführende Untersuchungen im Bereich der Langzeitbelastung durch Eigengewicht und Imperfektion sowie der jederzeit zuverlässigen Abrufbarkeit des Kurzzeitbelastungsniveaus während der gesamten Lebensdauer sind vor einer baupraktischen Anwendbarkeit notwendig.*
- *Die Anwendung von HGV-Elementen ermöglicht sowohl im Innenbereich als auch als Außenwand das optische Auflösen von aussteifenden Wänden. Das wissenschaftliche Aufzeigen der dadurch geschaffenen architektonischen Möglichkeiten würde neue Impulse für Holz-Glas-Architektur nach State-of-the-Art bringen.*

### **7.2.4 Anwendung als Schubfeld im Biegeträger**

Es wurde eine baupraktische Lösung für aussteifende Wände gezeigt.

- *Die vorliegende baupraktisch orientierte Konstruktionslösung könnte auch für Biegeträger angewendet werden. Bei bisherigen Forschungsarbeiten wurde Glas als Schubfeld stets direkt mit den Gurten verklebt um eine bestmögliche statische Leistungsfähigkeit zu erzielen. Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse würden sich auch weiterführende Untersuchungen betreffend der Anwendbarkeit der beschriebenen Konstruktionslösung als mechanisch befestigtes Schubfeld für Biegeträger empfehlen.*

### **7.2.5 Bemessungskonzept**

Auf Basis bestehender Ansätze erfolgte die Betrachtung und Weiterführung der Grundlagen für ein Bemessungskonzept.

- *Für die Formulierung eines allgemeinen Bemessungskonzeptes sollte die Konstruktionsvielfalt beschränkt werden und auf eine allgemeine, klar definierte Konstruktion beschränkt werden. Dazu wird empfohlen die vorgeschlagene Konstruktionsvariante dieser Arbeit als Basis zu verwenden und weiter zu optimieren.*
- *Eine weiterführende Materialforschung im Bereich des Klebstoffes sollte zur Ermittlung klar definierter Kenngrößen für die Formulierung von*

*Modifikationsfaktoren, charakteristischen Festigkeiten und Steifigkeiten sowie Nutzungsklassen durchgeführt werden. Somit könnten Entwicklungsvorgaben für die Klebstoffindustrie festgelegt werden und die Widerstandsseite im Bemessungskonzept beschrieben werden.*

- *Durch Verwendung von steifen Klebstoffen kann das Gebrauchstauglichkeitsniveau und somit die zulässige Belastbarkeit angehoben werden, bis das Tragfähigkeitsniveau maßgebend wird. Da die Versagensform somit eine andere wird wirkt sich dies direkt auf den widerstandsseitigen Teilsicherheitsbeiwert aus. Es erscheint sinnvoll eine Festlegung des Verhältnisses zwischen Tragfähigkeitsversagen und Gebrauchstauglichkeitsversagen aus sicherheitstechnischer und versagenscharakteristischer Sicht abzuwägen und zu untersuchen.*
- *Es wird empfohlen die Wirksamkeit von elastischen oder semi-elastischen HGV-Elementen in Kombination mit steifen Wandscheiben oder Aussteifungskernen zu analysieren.*

## 8 Literaturverzeichnis

BLASS, H. J., FÖRLACHER, R. , STECK, G. (1955): Step 1, Bemessung und Baustoffe, Holzbauwerke nach Eurocode 5, Fachverlag Hold der Arbeitsgemeinschaft Holz e. V.

BRONSTEIN, I. N., SEMENDJAJEW, K. A. (1991): Taschenbuch der Mathematik. Stuttgart: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft

DIN 1249: Flachglas im Bauwesen. Berlin: Beuth-Verlag

E DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Berlin: Beuth-Verlag

E DIN EN 13474-1: Glas im Bauwesen, Bemessung von Glasscheiben, Allgemeine Grundlagen für Entwurf, Berechnung und Bemessung. Berlin: Beuth-Verlag

E DIN EN 13474-2: Glas im Bauwesen, Bemessung von Glasscheiben, Bemessung für gleichmäßig verteilte Belastungen. Berlin: Beuth-Verlag

EN 1288: Glas im Bauwesen. Berlin: Beuth-Verlag

ETAG Nr. 002 (1998): Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen. Brüssel: EOTA

HAAS, C., HALDIMANN, M. (2004): Entwurf und Bemessung von Tragelementen aus Glas - Wissensstandsbericht. Lausanne: EPFL

HABENICHT, G. (1990): Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin: Springer

- HAMM, J. (2000): Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas. Lausanne: EPFL.
- HEINZMANN, R., KOCH, S., THIELEMANN, H.C., WOLF (2001): Elastisches Kleben im Bauwesen. Moderne Industrie
- HENRICI, D. (1983): Trag- und Verformungsverhalten hölzerner Wandscheiben unter Schubbiegung. Holz-Zentralblatt
- KOLBITSCH, A. (2000): Hochbau Band 1. Wien: Institut für Hochbau und Industriebau TU-Wien
- KREHER, K. (2004): Tragverhalten und Bemessung von Holz-Glas-Verbundträgern unter Berücksichtigung der Eigenspannungen im Glas. Lausanne: EPFL
- LUIBLE, A. (2004): Stabilität von Tragelementen aus Glas. Lausanne: EPFL
- NIEDERMAIER, P. (2002): Forschungsvorhaben Holz-Glas-Verbundkonstruktionen, Abschlußbericht September 2002. Rosenheim: IFT-Rosenheim.
- ÖNORM EN 594 (1996): Holzbauwerke, Prüfverfahren, Tragfähigkeit und Steifigkeit von Wänden in Holztafelbauart (Wandscheiben). Wien: Österreichisches Normungsinstitut
- PETERSEN, C. (1992): Statik und Stabilität der Baukonstruktionen. Braunschweig: Vieweg & Sohn
- RASCHPER, N. (1990): Zur Berechnung von Wandscheiben in Holztafelbauart. Braunschweig: TU Carolo-Wilhelma
- SCHINDELLI-BIDINELLI, E., GUTHERZ, W. (1988): Konstruktives Kleben – Ein Lehrgang. Basel: VCH
- SCHITTICH, C., STAIB, G., BALKOW, D., SCHULER, SOBEK (1998): Glasbauatlas. Basel: Birkhäuser
- SCHNEIDER, J. (1996): Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen. Zürich: Hochschulverlag AG an der ETH Zürich
- SCHNEIDER, K. (1998): Bautabellen für Ingenieure. Düsseldorf: Werner Verlag
- SEDLACEK, G., BLANK, K., LAUFS, W., GÜSGEN, J. (1999): Glas im Konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst & Sohn

SHEN, X. (1997): Entwicklung eines Bemessungs- und Sicherheitskonzepts für den Glasbau. VDI-Bericht Nr. 138

SIEBERT, G. (2001): Entwurf und Bemessung von tragenden Bauteilen aus Glas. Berlin: Ernst & Sohn

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften von Fichte .....	47
Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften von Glas.....	47
Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften von SIKA – ELASTOSIL® SG-500 .....	48
Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften von OTTOCHEMIE – NOVASIL® S 42 SP 5322 .....	48
Tabelle 5: Mechanische Eigenschaften von OTTOCHEMIE – OTTOCOLL® P 520 VP 5581 .....	49
Tabelle 6: Mechanische Eigenschaften von SIKA – SIKAFORCE® – 7750 L15 .....	49
Tabelle 7: Mechanische Eigenschaften von SIKA – SIKAFAST® – 5215.....	50
Tabelle 8: Bezeichnungsschlüssel der Probekörper (Beispiel) .....	51
Tabelle 9: Anzahl der Probekörper für die diversen Versuche .....	51
Tabelle 10: Variantenmatrix – Systeme mit Standardisoliervglas .....	75
Tabelle 11: Variantenmatrix – Systeme mit Stufenfalzglas .....	76
Tabelle 12: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V1 A.....	79
Tabelle 13: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V1 B.....	81
Tabelle 14: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V2 .....	83
Tabelle 15: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V3 .....	85
Tabelle 16: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V4 .....	87
Tabelle 17: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V5 .....	89
Tabelle 18: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V6 .....	91
Tabelle 19: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V7 .....	93
Tabelle 20: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V8 .....	95
Tabelle 21: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V9 .....	97
Tabelle 22: Bauphysikalische Kenndaten der Konstruktionsvariante V10 .....	99
Tabelle 23: Beschreibung der Konstruktion - Prototyp P1:.....	107

Tabelle 24: Beschreibung der Konstruktion - Prototyp P2.....	107
Tabelle 25: Beschreibung der Konstruktion - Prototyp P3.....	108
Tabelle 26: Beschreibung der Konstruktion - Prototyp P4.....	108
Tabelle 27: Beschreibung der Konstruktion - Prototyp P3.....	109
Tabelle 28: Beschreibung der Konstruktion - Prototyp P6.....	109
Tabelle 29: Maßabweichungen der hergestellten Prototypen vom Sollmaß in mm .....	114
Tabelle 30: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse – Prototyp P1.....	126
Tabelle 31: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse – Prototyp P2.....	130
Tabelle 32: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse – Prototyp P3.....	134
Tabelle 33: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse – Prototyp P4.....	139
Tabelle 34: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse – Prototyp P5.....	143
Tabelle 35: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse – Prototyp P6.....	148
Tabelle 36: Horizontale Kopfverschiebung der Prototypen in mm aus den Vorversuchen .	152
Tabelle 37: Charakteristischer Belastungswerte der Prototypen.....	153

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prinzip der Aussteifung mit Holz-Glas-Verbundelementen nach einer ausgewählten Konstruktionslösung.....	18
Abbildung 2:	Probekörper für die Bruchversuche und Klimabelastungsversuche.....	20
Abbildung 3:	Bruchbild von vorgespanntem Glas .....	24
Abbildung 4:	Spannungsverteilung entlang der Glasscheibendicke von vorgespanntem (links) und teilvorgespanntem Glas (rechts).....	24
Abbildung 5:	Bruchbild von Floatglas, teilvorgespanntem Glas und vorgespanntem Glas (v.l.n.r.).....	25
Abbildung 6:	Einteilung nach der chemischen Basis (HABENICHT, G. (1990)) .....	27
Abbildung 7:	Einteilung nach dem Abbindemechanismus (HABENICHT, G. (1990)) .....	28
Abbildung 8:	Verformungsverhalten bei der Verklebung unterschiedlicher Werkstoffe .....	30
Abbildung 9:	Grundformen der Klebefugenbelastung (HEINZMANN, R., KOCH, S., THIELEMANN, H.C., WOLF (2001)).....	31
Abbildung 10:	Spannungsverlauf entlang einer Nietereihe (SCHINDELLI-BIDINELLI, E., GUTHERZ, W. (1988)).....	31
Abbildung 11:	Spannungsverlauf entlang einer Schweißnaht (SCHINDELLI-BIDINELLI E., GUTHERZ, W. (1988)).....	32
Abbildung 12:	Spannungsverlauf entlang einer geschäfteten Klebung (SCHINDELLI-BIDINELLI, E., GUTHERZ, W. (1988)).....	32
Abbildung 13:	Festigkeitsaufbau von Klebungen (HEINZMANN, R., KOCH, S., THIELEMANN, H.C., WOLF (2001)).....	33
Abbildung 14:	Schema des Zugscherversuches (HEINZMANN, R., KOCH, S., THIELEMANN, H.C., WOLF (2001)).....	33
Abbildung 15:	Schematische Darstellung typischer Bauweisen im Hochbau (KOLBITSCH, A. (2000)).....	34
Abbildung 16:	Ein-Raster-Wandscheibe nach DIN 1052 .....	35
Abbildung 17:	Verformung einer durch Schub beanspruchten Beplankung (RASCHPER, N. (1990)).....	36

Abbildung 18:	Konstruktion nach HAMM, J. (2000) .....	37
Abbildung 19:	Qualitative Kraftverläufe in der Klebefuge nach HAMM, J. (2000) a) Normalkräfte, b) Querkräfte .....	38
Abbildung 20:	Konstruktion nach NIEDERMAIER, P. (2002).....	40
Abbildung 21:	Ersatzfedermodell nach NIEDERMAIER, P. (2002).....	41
Abbildung 22:	Ablauf des Projektschrittes „Geeignete Klebstoffe für die statisch wirksame Verklebung von Holz und Glas“ .....	43
Abbildung 23:	Probekörper für die Bruchversuche und Klimabelastungsversuche.....	45
Abbildung 24:	Geometrie der Probekörper.....	46
Abbildung 25:	Diverse Kartuschenpressen und Mischdüsen für den Hand- oder Druckluftbetrieb .....	50
Abbildung 26:	Adhäsionsbruch GK .....	52
Abbildung 27:	Mischbruch aus Adhäsionsversagen GK und KH .....	52
Abbildung 28:	Mischbruch aus Adhäsionsversagen KH und Kohäsionsversagen HH.....	52
Abbildung 29:	Mischbruch - hauptsächlich Kohäsionsversagen KK .....	52
Abbildung 30:	Einspannvorrichtung für die Zugversuche.....	53
Abbildung 31:	Einspannvorrichtung für Schubversuche, parallel zur Klebefuge.....	54
Abbildung 32:	Einspannvorrichtung für Schubversuche, quer zur Klebefuge .....	54
Abbildung 33:	Unerwünschter Biegebruch im Glas.....	55
Abbildung 34:	Ablauf der Versuchsreihe KLEBSTOFF .....	56
Abbildung 35:	Ablauf der Versuchsreihe FUGENGEOMETRIE .....	57
Abbildung 36:	E-Modul im Verlauf der Klimawechsel-Zyklen verschiedener Klebstoffe .....	63
Abbildung 37:	E-Modul der Referenzprobe im Vergleich zur Wasserbadprobe.....	64
Abbildung 38:	Vergleich der mittleren Bruchspannungen der untersuchten Klebstoffe .....	65
Abbildung 39:	Vergleich der mittleren Bruchdehnungen der untersuchten Klebstoffe .....	65
Abbildung 40:	Vergleich der mittleren Bruchspannungen der untersuchten Fugengeometrien .....	67
Abbildung 41:	Vergleich der mittleren Bruchdehnungen der untersuchten Fugengeometrien .....	67
Abbildung 42:	Ablauf der „Analyse von Konstruktionssystemen“ .....	70
Abbildung 43:	Schematische Darstellung der Einflussfaktoren - Statik.....	71
Abbildung 44:	Konstruktionssystem V1 A .....	78
Abbildung 45:	Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V1 A.....	79
Abbildung 46:	Konstruktionssystem V1 B .....	80
Abbildung 47:	Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V1 B.....	80
Abbildung 48:	Konstruktionssystem V2.....	82
Abbildung 49:	Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V2 .....	82
Abbildung 50:	Konstruktionssystem V3.....	84
Abbildung 51:	Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V3 .....	84
Abbildung 52:	Konstruktionssystem V4.....	86

Abbildung 53: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V4 .....	87
Abbildung 54: Konstruktionssystem V5.....	88
Abbildung 55: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V5 .....	88
Abbildung 56: Konstruktionssystem V6.....	90
Abbildung 57: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V6 .....	91
Abbildung 58: Konstruktionssystem V7.....	92
Abbildung 59: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V7 .....	92
Abbildung 60: Konstruktionssystem V8.....	94
Abbildung 61: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V8 .....	94
Abbildung 62: Konstruktionssystem V9.....	96
Abbildung 63: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V9 .....	96
Abbildung 64: Konstruktionssystem V10.....	98
Abbildung 65: Wärmeleitverhalten der Konstruktionsvariante V10 .....	98
Abbildung 66: Vergleich des Wärmedurchgangsverhaltens der untersuchten Varianten .....	101
Abbildung 67: Vergleichsbeziehungen der Prototypen .....	103
Abbildung 68: Gegenüberstellung der Konstruktionen der Prototypen .....	105
Abbildung 69: Ablauf des Projektschrittes „Experimentelle Untersuchungen an Prototypen“ .....	106
Abbildung 70: Herstellung der Hauptrahmen auf dem Richttisch (hier Prototyp P2) .....	110
Abbildung 71: Aufgespannter Koppelrahmen.....	112
Abbildung 72: Detail – aufgespannter Koppelrahmen.....	112
Abbildung 73: Seitliches Ausspritzen der Fuge mit einem viskosen Klebstoff .....	113
Abbildung 74: Aufstellen des Rahmens .....	115
Abbildung 75: Montage des Verbund-elementes .....	115
Abbildung 76: Konstruktion mit Seitenanschlag (P1 links) und ohne Seitenanschlag (P4 rechts).....	115
Abbildung 77: bündiger Eckbereich – P1 .....	116
Abbildung 78: leichter Kantensatz – P2 .....	116
Abbildung 79: bündiger Eckbereich – P3 .....	117
Abbildung 80: Eckversatz – P2 .....	117
Abbildung 81: Versuchsbau für die Belastungsversuchen an den Prototypen.....	118
Abbildung 82: Prüfaufbau – Lagerung, Krafteinleitung und Wegmessung.....	119
Abbildung 83: Prüfaufbau Detail C – Krafteinleitungspunkt (Weg D2, D3 und A3).....	120
Abbildung 84: Prüfaufbau Detail A – Fixpunktmessung am Festlager (Weg A1 und A2, Lager A) .....	120
Abbildung 85: Prüfaufbau Detail B – Zugverankerung (Lager BB).....	121
Abbildung 86: Zugverankerung nach der Adaptierung.....	121
Abbildung 87: Prüfaufbau Detail D – Gleitführung der Kopfschwelle (Lager C und D) .....	121

Abbildung 88: Belastungszyklen für eine Wandscheibenprüfung nach ÖNORM EN 594 ..	122
Abbildung 89: Verformungsverhalten – Prototyp P1 .....	124
Abbildung 90: Verformungsverhalten – Bruchversuch – Prototyp P1 .....	125
Abbildung 91: Kohäsionsbruch.....	126
Abbildung 92: Kohäsionsbruch in der Klebefuge – Quadrant IV .....	126
Abbildung 93: Verformungsverhalten – Prototyp P2 .....	127
Abbildung 94: Verformungsverhalten – Bruchversuch – Prototyp P2 .....	128
Abbildung 95: Kohäsionsbruch in der Klebefuge – Quadrant II .....	129
Abbildung 96: Kohäsionsbruch in der Klebefuge – Quadrant II .....	129
Abbildung 97: Anriss bei der Kraffteinleitung – die Verklebung in der unteren Elementhälfte bleibt intakt.....	130
Abbildung 98: Verformungsverhalten – Prototyp P3 .....	131
Abbildung 99: Verformungsverhalten – Bruchversuch – Prototyp P3 .....	132
Abbildung 100: Kohäsionsbruch in der Klebefuge – Kopfschwelle .....	133
Abbildung 101: Kohäsionsbruch der Klebefuge – Ecke Quadrant II .....	134
Abbildung 102: Kohäsionsbruch der Klebefuge – Stiel Quadrant II .....	134
Abbildung 103: Versagen der Klebefuge bei Volllast – die Verklebung der unteren Verbundelementhälfte bleibt weitestgehend intakt.....	135
Abbildung 104: Verformungsverhalten – Prototyp P4 .....	136
Abbildung 105: Verformungsverhalten – Bruchversuch – Prototyp P4 .....	137
Abbildung 106: Versagen der Zugverankerung – Quadrant IV .....	138
Abbildung 107: Versagen der Zugblechverschraubung .....	139
Abbildung 108: Schädigung des Stieles.....	139
Abbildung 109: Verformungsverhalten – Prototyp P5 .....	140
Abbildung 110: Verformungsverhalten – Bruchversuch – Prototyp P5 .....	141
Abbildung 111: Kohäsionsbruch im Klebstoff – Quadrant IV .....	142
Abbildung 112: Prototyp versagt im unteren Bereich .....	143
Abbildung 113: Biegung des rechten Stieles bei Volllast – Quadrant IV .....	143
Abbildung 114: Verformungsverhalten – Prototyp P6 .....	144
Abbildung 115: Verformungsverhalten – Bruchversuch – Prototyp P6 .....	145
Abbildung 116: Anriss in der Ecke des Quadranten III.....	146
Abbildung 117: Holzbruch bei der Zugverankerung in Quadrant IV .....	147
Abbildung 118: Versagen des Verbundelementes im unteren Bereich.....	148
Abbildung 119: Vergleich der horizontalen Kopfverschiebung der Prototypen aus den Vorversuchen .....	150
Abbildung 120: Vergleich charakteristischer Belastungswerte der Prototypen .....	154
Abbildung 121: Vergleich der Steifigkeiten eines steifen und eines weichen HGV-Elementes auf Basis Federmodell NIEDERMAIER, P. (2002).....	157
Abbildung 122: Versagen der Klebefuge mit Aktivierung der Biegesteifigkeit des Haupttrahmenstieles .....	158

Abbildung 123: Versagen der Klebefuge mit Aktivierung der Biegesteifigkeit des Hauptrahmenstieles .....	159
Abbildung 124: Versagensform d) nach Abbildung 125 der Koppelrahmenverschraubung im Vorversuch .....	159
Abbildung 125: Versagen der Verbindungsmittel nach Eurocode 5 mit Bemessungswert der Tragfähigkeit $R_d$ für $\beta \neq 1$ pro Scherfuge und Verbindungsmittel (SCHNEIDER, K. (1998)) .....	160
Abbildung 126: Versagen des Koppelrahmens .....	161
Abbildung 127: Verteilung von Einwirkung und Widerstand mit Versagenswahrscheinlichkeit $p_f$ .....	163
Abbildung 128: Allgemeiner Versagenspfad einer Bauwerksaussteifung mit HGV-Elementen .....	165
Abbildung 129: Konstruktionsmittel im Versagenspfad der aussteifenden HGV-Konstruktion .....	166
Abbildung 130: Versagenspfad der Glasscheibe eines HGV-Elements.....	167
Abbildung 131: Versagenspfad der Klebefuge eines HGV-Elements .....	168
Abbildung 132: Versagen der Koppelrahmenleiste an einem HGV-Element .....	169
Abbildung 133: Versagenspfad der Verbindungsmittel an einem HGV-Element .....	170

## 11 Abkürzungsverzeichnis

$b_D$	Ersatzbreite
$h$	Höhe der Wandscheibe
$l$	Länge der Wandscheibe
GG	Kohäsionsbruch im Glas
GK	Adhäsionsbruch zwischen Glas und Klebstoff
KK	Kohäsionsbruch im Klebstoff
KH	Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Holz
HH	Kohäsionsbruch im Holz
$F_{H, \max}$	maximal zulässigen Horizontalkraft
$u_{\text{zul}}$	maximal zulässige Verschiebung
$C^*_{AE}$	Federsteifigkeit der Aussteifungseinheit
$C^*_{SB}$	Federsteifigkeit der Stabglieder zufolge Schubbiegung
$C^*_{VB}$	Federsteifigkeit der Verbindungsmittlebene
$C^\circ_{AE}$	Ersatzfedersteifigkeit der Klebefuge
$C^*_{GS}$	Ersatzfedersteifigkeit der Glasscheibe
$C^*_{E:KR, HK}$	Ersatzfedersteifigkeit der Eckausbildung der Koppelrahmen- und Hauptkonstruktionsstöße
A	Abstand der Aussteifungsebene zur Hauptachsebene der Primärtragkonstruktion
B	Versatz der Klebefugenachse zur Achse der Primärtragkonstruktion
C	Abstand der Lagerungsebenen zueinander
S	Einwirkungen auf die Konstruktion
R	Widerstand der Konstruktion
Z	Sicherheitsabstand

$p_f$	Versagenswahrscheinlichkeit der Gesamtkonstruktion
$f_s(s)$	Funktion der Einwirkung
$f_R(r)$	Funktion der Einwirkung
$\eta$	Globalsicherheitsfaktor
$S_d$	Bemessungswert der Einwirkung
$R_d$	Bemessungswert des Widerstandes
$S_k$	charakteristischer Wert der Einwirkung
$R_k$	charakteristischer Wert des Widerstandes
$\gamma_F$	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen
$\gamma_R$	Teilsicherheitsbeiwert für Widerstände
$F_s(r)$	Verteilungsfunktion der Einwirkung
$P_f$	Versagenswahrscheinlichkeit der Gesamtaussteifung
$E_{i,d}$	Bemessungswerte der Elastizitätsmodule
$G_{i,d}$	Bemessungswerte der Schubmodule
$a_{i,d}$	Bemessungswerte der geometrischen Größen
$k_{mod}$	Modifikationsfaktor
$f_{i,d}$	Bemessungswerte der Baustofffestigkeiten
$f_{i,k}$	charakteristischer Wert der Baustofffestigkeit
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoffeigenschaften
$\gamma_G$	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen
$\gamma_Q$	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen
$G_{k,i}$	charakteristische ständige Lasten
$Q_{k,1}$	führende charakteristische veränderliche Last
$Q_{k,i}$	weitere charakteristische veränderliche Lasten
$\psi_i$	Kombinationsbeiwert
$G_k$	charakteristisches Eigengewicht
$Q_{k,1}$	führende charakteristische veränderliche Last
$Q_{k,i}$	weitere charakteristische veränderliche Lasten

## Anhang A - Detailergebnisse der Bruchlastversuche

### A 1 Versuchsreihe „Klebstoff“

#### A 1.1 Tabellarische Zusammenfassung

Klebstoff	Belastung	Bruchbild					Bruchspannung N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung %
		GG %	GK %	KK %	KH %	HH %		
S I A	Schub längs	0	0	100	0	0	0,8	115
		0	0	100	0	0	0,9	163
		0	0	100	0	0	0,9	182
		0	0	100	0	0	1,0	177
	Mittelwert	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,9</b>	<b>159</b>
	Schub quer	0	0	100	0	0	0,8	166
		0	0	100	0	0	0,9	143
		0	0	100	0	0	0,8	142
		0	0	100	0	0	0,8	182
	Mittelwert	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,8</b>	<b>158</b>
	Zug	0	0	100	0	0	1,1	87
		0	0	100	0	0	1,1	92
		0	0	100	0	0	1,0	83
		0	0	100	0	0	1,2	92
		0	0	100	0	0	1,2	89
0		0	100	0	0	1,1	88	
Mittelwert	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1,1</b>	<b>88</b>	

Klebstoff	Belastung	Bruchbild					Bruchspannung N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung %
		GG %	GK %	KK %	KH %	HH %		
S I B	Schub längs	0	0	60	40	0	1,0	273
		0	0	70	30	0	1,2	304
	Mittelwert	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>65</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>1,1</b>	<b>288</b>
	Schub quer	0	0	15	80	5	1,2	261
		0	0	20	80	0	1,3	304
	Mittelwert	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>18</b>	<b>80</b>	<b>3</b>	<b>1,3</b>	<b>282</b>
	Zug	0	0	0	30	20	1,3	182
		0	0	0	5	15	1,0	61
Mittelwert	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>1,1</b>	<b>121</b>	

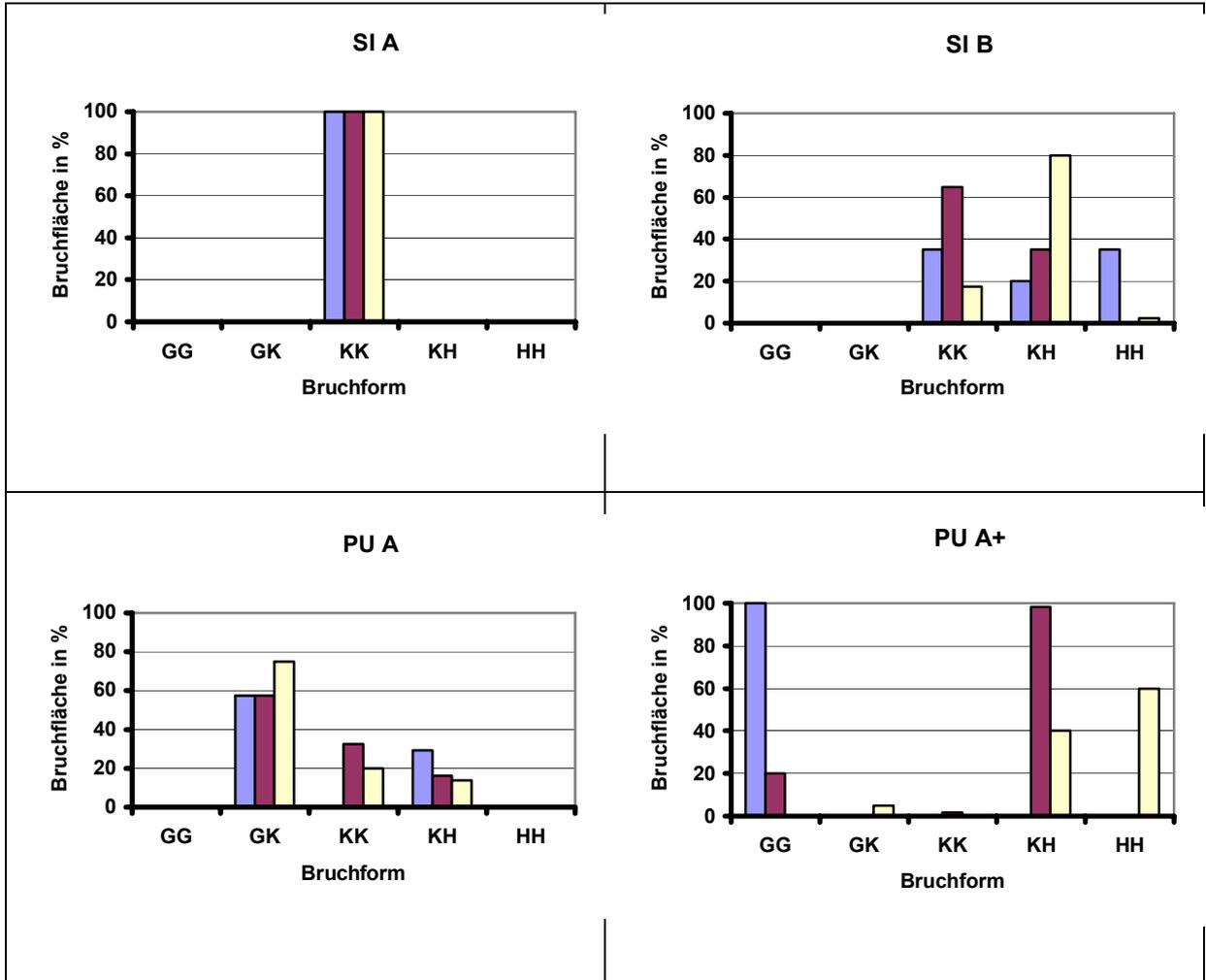
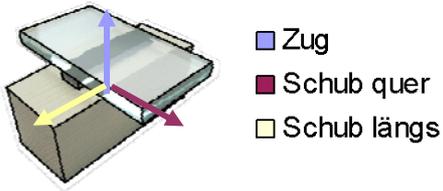
Klebstoff	Belastung	Bruchbild					Bruchspannung N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung %	
		GG %	GK %	KK %	KH %	HH %			
PU A	Schub längs	0	0	50	50	0	0,6	18	
		0	100	0	0	0	1,4	32	
		0	100	0	10	0	1,3	63	
		0	30	80	5	0	0,5	57	
	Mittelwert	<b>0</b>	<b>58</b>	<b>33</b>	<b>16</b>	<b>0</b>	<b>0,9</b>	<b>42</b>	
	Schub quer	0	20	70	5	0	0,2	5	
		0	100	10	0	0	1,0	35	
		0	80	0	80	0	0,5	22	
		0	100	0	0	0	0,8	21	
	Mittelwert	<b>0</b>	<b>75</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>0</b>	<b>0,6</b>	<b>21</b>	
	Zug	0	90	0	0	0	1,8	19	
		0	95	0	0	0	1,4	19	
		0	70	0	0	0	0,9	16	
		0	50	0	45	0	1,4	14	
		0	40	0	55	0	0,9	13	
		0	0	0	75	0	0,8	13	
	Mittelwert	<b>0</b>	<b>58</b>	<b>0</b>	<b>29</b>	<b>0</b>	<b>1,2</b>	<b>16</b>	
	Zusatz- versuche PU A+	Schub längs	30	0	5	95	0	4,2	247
			30	0	0	100	0	3,9	236
0			0	0	100	0	3,7	242	
Mittelwert		<b>20</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>98</b>	<b>0</b>	<b>3,9</b>	<b>242</b>	
Schub quer		0	0	0	30	70	2,0	152	
		0	5	0	50	50	2,3	167	
		0	10	0	40	60	2,4	153	
Mittelwert		<b>0</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>2,2</b>	<b>157</b>	
Zug		100	0	0	0	0	2,3	42	
		100	0	0	0	0	1,9	137	
		100	0	0	0	0	1,8	67	
Mittelwert	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2,0</b>	<b>82</b>		

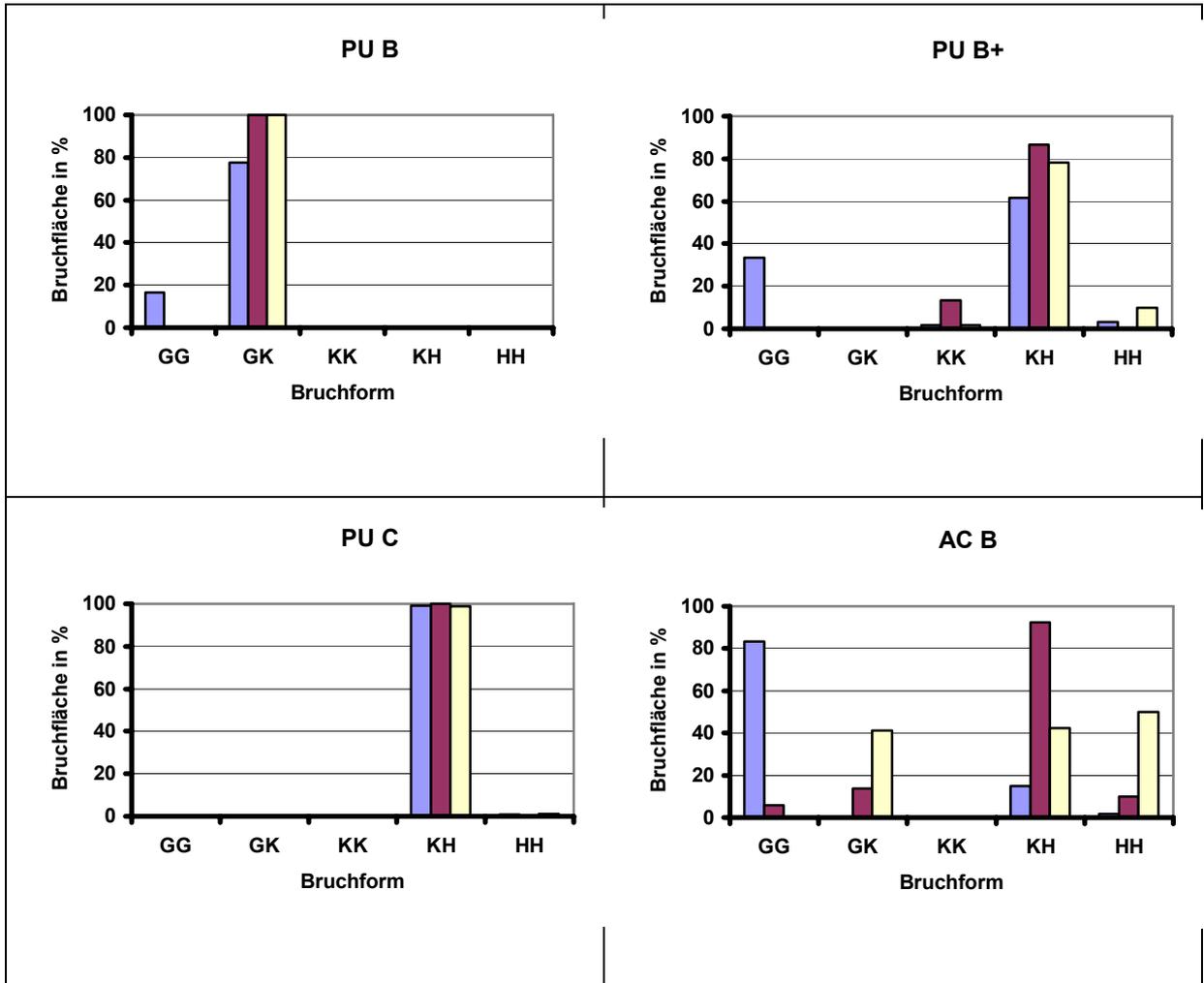
Klebstoff	Belastung	Bruchbild					Bruchspannung N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung %
		GG %	GK %	KK %	KH %	HH %		
PU B	Schub längs	0	100	0	0	0	0,9	39
		0	100	0	0	0	1,1	74
		0	100	0	0	0	0,9	58
		0	100	0	0	0	1,0	53
	Mittelwert	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1,0</b>	<b>56</b>
	Schub quer	0	100	0	0	0	0,8	77
		0	100	0	0	0	1,2	94
		0	100	0	0	0	1,0	57
		0	100	0	0	0	1,0	70
	Mittelwert	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1,0</b>	<b>74</b>
	Zug	0	95	0	0	0	1,6	20
		0	90	0	0	0	1,5	20
		100	0	0	0	0	1,9	22
		0	95	0	0	0	1,1	18
		0	95	0	0	0	1,1	20
0		90	0	0	0	1,8	18	
Mittelwert	<b>17</b>	<b>78</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1,5</b>	<b>19</b>	
Zusatz- versuche PU B+	Schub längs	0	0	40	60	0	0,7	89
		0	0	0	100	0	1,5	108
		0	0	0	100	0	1,5	114
	Mittelwert	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>13</b>	<b>87</b>	<b>0</b>	<b>1,2</b>	<b>104</b>
	Schub quer	0	0	0	95	5	2,0	125
		0	0	0	80	20	1,9	102
		0	0	5	90	5	1,9	98
	Mittelwert	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>88</b>	<b>10</b>	<b>1,9</b>	<b>109</b>
	Zug	100	0	0	0	0	2,0	54
		0	0	0	90	10	1,9	63
0		0	5	95	0	1,6	68	
Mittelwert	<b>33</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>62</b>	<b>3</b>	<b>1,8</b>	<b>62</b>	

Klebstoff	Belastung	Bruchbild					Bruchspannung N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung %
		GG %	GK %	KK %	KH %	HH %		
PU C	Schub längs	0	0	0	100	0	1,5	43
		0	0	0	100	0	1,8	41
		0	0	0	100	0	1,8	44
		0	0	0	100	0	2,2	51
	<b>Mittelwert</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>1,9</b>	<b>45</b>
	Schub quer	0	0	0	100	0	1,6	45
		0	0	0	95	5	2,3	60
		0	0	0	100	0	1,5	39
		0	0	0	100	0	1,4	58
	<b>Mittelwert</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>99</b>	<b>1</b>	<b>1,7</b>	<b>51</b>
	Zug	0	0	0	95	5	2,1	57
		0	0	0	100	0	1,1	51
		0	0	0	100	0	0,7	43
		0	0	0	100	0	1,2	55
		0	0	0	100	0	1,3	51
		0	0	0	100	0	1,3	53
	<b>Mittelwert</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>99</b>	<b>1</b>	<b>1,3</b>	<b>52</b>

Klebstoff	Belastung	Bruchbild					Bruchspannung N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung %
		GG %	GK %	KK %	KH %	HH %		
AC B Fuge 12x3mm	Schub längs	20	5	0	95	5	5,3	109
		0	10	0	100	0	5,4	97
		3	30	0	95	15	5,4	92
		0	10	0	80	20	6,1	115
	<b>Mittelwert</b>	<b>6</b>	<b>14</b>	<b>0</b>	<b>93</b>	<b>10</b>	<b>5,6</b>	<b>103</b>
	Schub quer	0	10	0	10	90	3,1	51
		0	60	0	10	90	3,4	102
		0	90	0	70	0	3,7	78
		0	5	0	80	20	4,3	41
	<b>Mittelwert</b>	<b>0</b>	<b>41</b>	<b>0</b>	<b>43</b>	<b>50</b>	<b>3,6</b>	<b>68</b>
	Zug	100	0	0	0	0	2,7	19
		100	0	0	0	0	2,1	21
		100	0	0	0	0	3,0	48
		100	0	0	0	0	3,0	63
		100	0	0	0	0	2,5	81
		0	0	0	90	10	5,0	97
	<b>Mittelwert</b>	<b>83</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>3,1</b>	<b>55</b>

A 1.2 Durchschnittliches Bruchverhalten





## A 2 Versuchsreihe „Fugengeometrie“

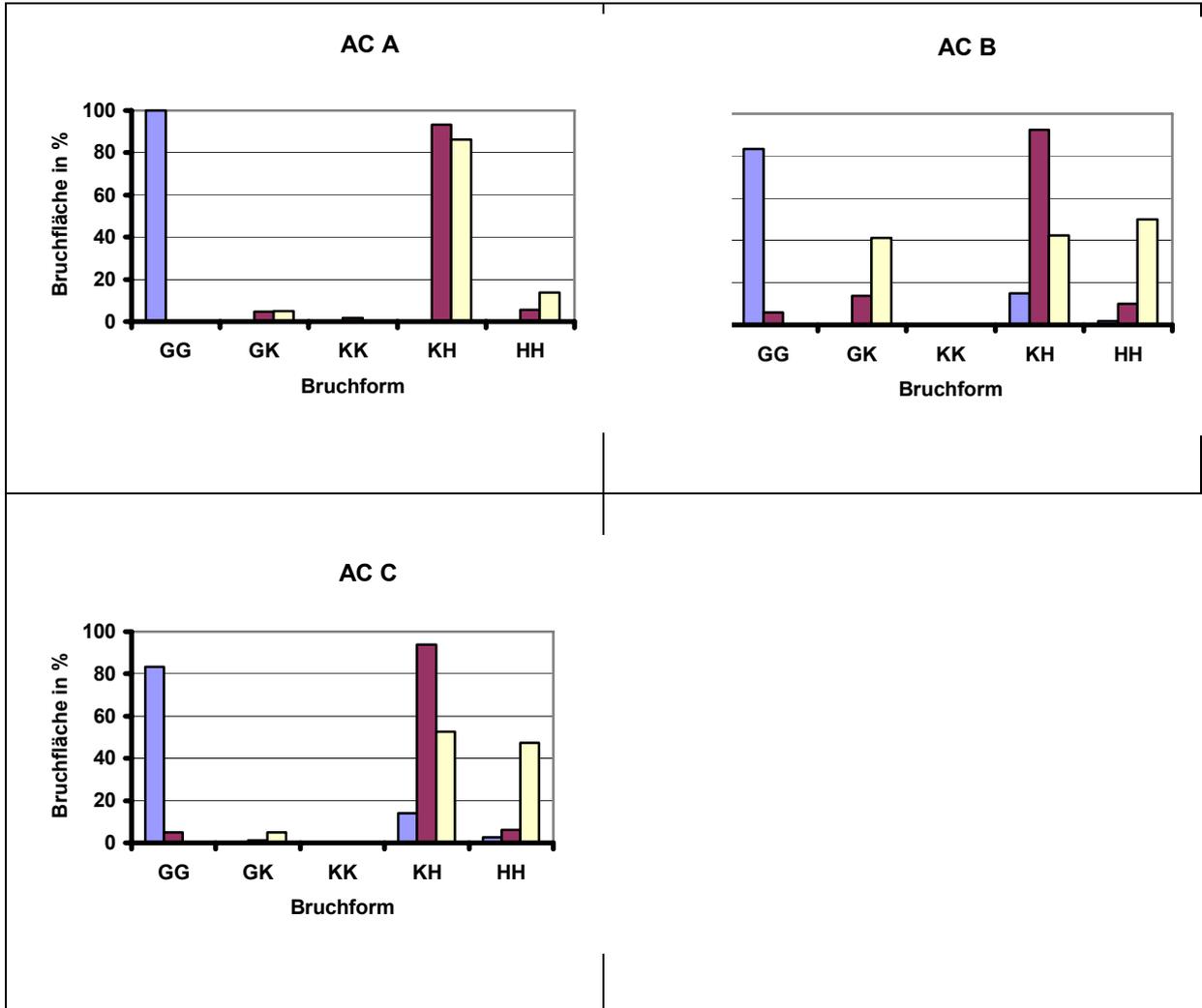
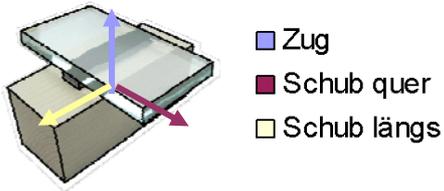
### A 2.1 Tabellarische Zusammenfassung

Klebstoff	Belastung	Bruchbild					Bruchspannung N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung %
		GG %	GK %	KK %	KH %	HH %		
AC A Fuge 12x2mm	Schub längs	0	15	0	90	10	5,5	135
		0	2	7	90	5	7,6	170
		0	0	0	98	2	5,2	182
		0	2	0	95	5	5,7	79
	<b>Mittelwert</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>93</b>	<b>6</b>	<b>6,0</b>	<b>141</b>
	Schub quer	0	5	0	95	5	4,2	85
		0	5	0	90	10	4,0	99
		0	5	0	70	30	4,3	104
		0	5	0	90	10	3,9	82
	<b>Mittelwert</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>86</b>	<b>14</b>	<b>4,1</b>	<b>92</b>
	Zug	100	0	0	0	0	2,2	29
		100	0	0	0	0	2,3	25
		100	0	0	0	0	2,3	25
		100	0	0	0	0	2,8	45
		100	0	0	0	0	2,3	23
		100	0	0	0	0	2,5	49
	<b>Mittelwert</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2,4</b>	<b>33</b>

Klebstoff	Belastung	Bruchbild					Bruchspannung N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung %
		GG %	GK %	KK %	KH %	HH %		
AC B Fuge 12x3mm	Schub längs	20	5	0	95	5	5,3	109
		0	10	0	100	0	5,4	97
		3	30	0	95	15	5,4	92
		0	10	0	80	20	6,1	115
	<b>Mittelwert</b>	<b>6</b>	<b>14</b>	<b>0</b>	<b>93</b>	<b>10</b>	<b>5,6</b>	<b>103</b>
	Schub quer	0	10	0	10	90	3,1	51
		0	60	0	10	90	3,4	102
		0	90	0	70	0	3,7	78
		0	5	0	80	20	4,3	41
	<b>Mittelwert</b>	<b>0</b>	<b>41</b>	<b>0</b>	<b>43</b>	<b>50</b>	<b>3,6</b>	<b>68</b>
	Zug	100	0	0	0	0	2,7	19
		100	0	0	0	0	2,1	21
		100	0	0	0	0	3,0	48
		100	0	0	0	0	3,0	63
		100	0	0	0	0	2,5	81
		0	0	0	90	10	5,0	97
	<b>Mittelwert</b>	<b>83</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>3,1</b>	<b>55</b>

Klebstoff	Belastung	Bruchbild					Bruchspannung N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung %
		GG %	GK %	KK %	KH %	HH %		
AC C Fuge 18x2mm	Schub längs	0	5	0	90	10	5,9	126
		0	0	0	100	0	4,9	78
		0	0	0	90	10	5,7	95
		20	0	0	95	5	5,9	106
	<b>Mittelwert</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>94</b>	<b>6</b>	<b>5,6</b>	<b>101</b>
	Schub quer	0	5	0	95	5	4,2	121
		0	5	0	40	60	5,7	135
		0	5	0	75	25	3,7	100
		0	5	0	0	100	4,3	71
	<b>Mittelwert</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>53</b>	<b>48</b>	<b>4,5</b>	<b>107</b>
	Zug	100	0	0	0	0	1,6	43
		100	0	0	0	0	2,9	41
		100	0	0	0	0	1,5	46
		100	0	0	0	0	1,5	61
		100	0	0	0	0	3,2	48
		0	0	0	85	15	3,7	53
	<b>Mittelwert</b>	<b>83</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>2,4</b>	<b>48</b>

## A 2.2 Durchschnittliches Bruchverhalten

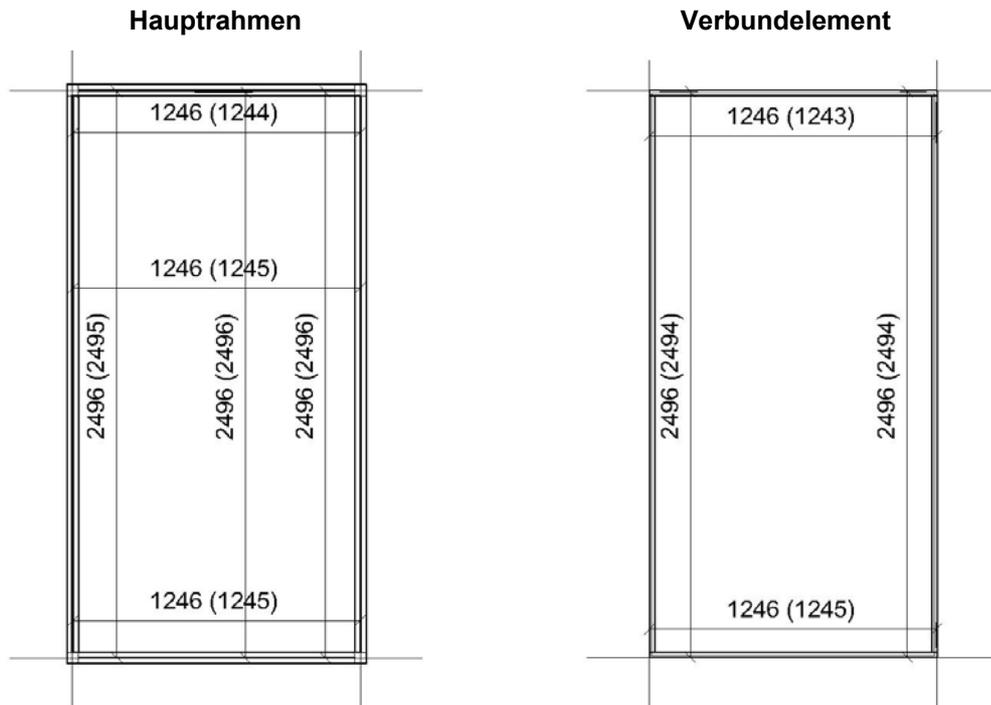




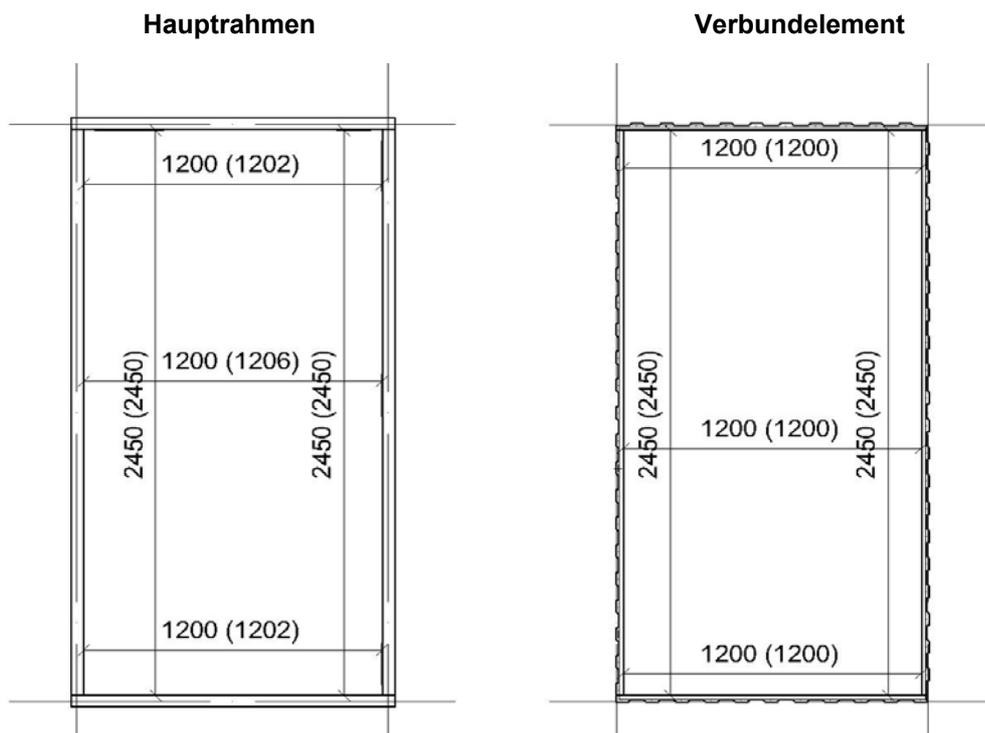
## Anhang B - Maßabweichungen der Prototypen

Hauptrahmen und Verbundelement wurden voneinander unabhängig hergestellt um einen industriellen Arbeitsprozess nachzuvollziehen. Auf eine genaue Maßabstimmung wurde bewusst verzichtet. In den Abbildungen sind die Sollmaße in mm kotiert. In Klammer sind die Istmaße nach der Herstellung angegeben.

### B 1 Prototyp P1

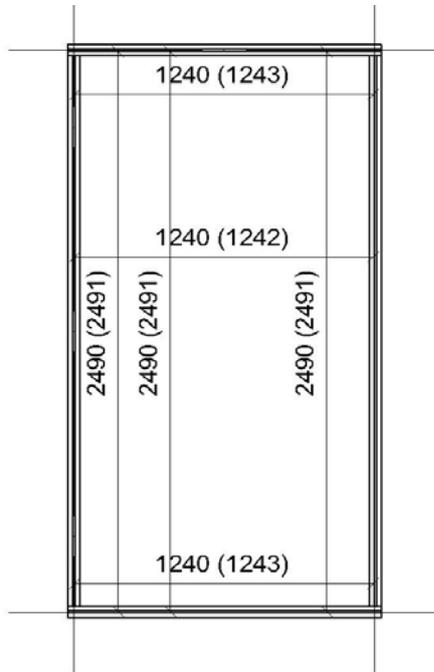


### B 2 Prototyp P2

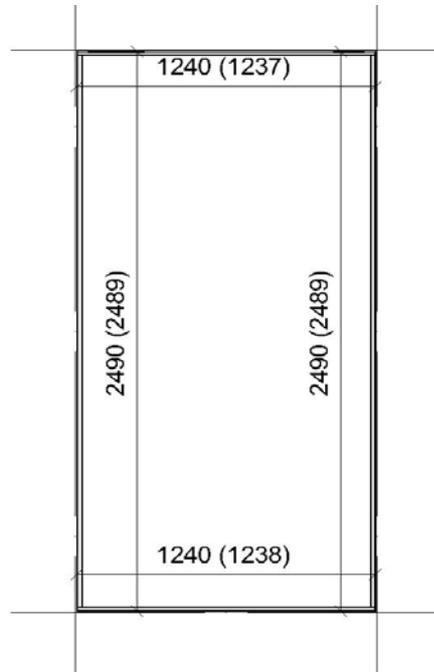


### B 3 Prototyp P3

Hauptrahmen

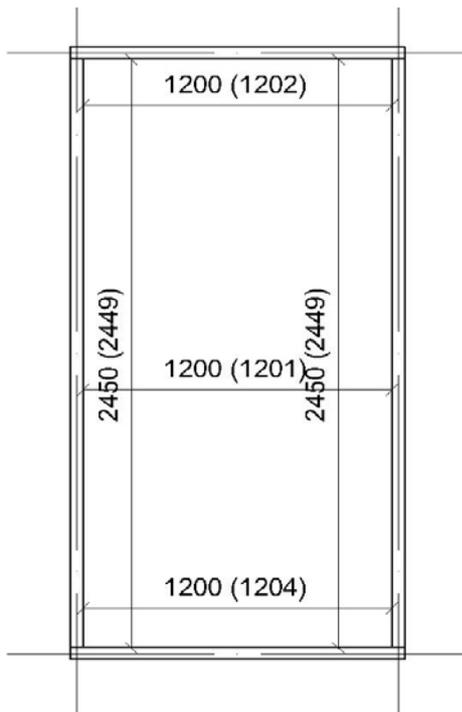


Verbundelement

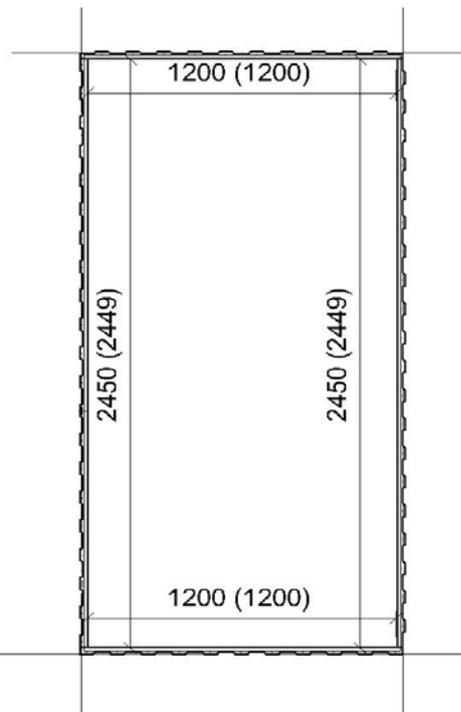


### B 4 Prototyp P4

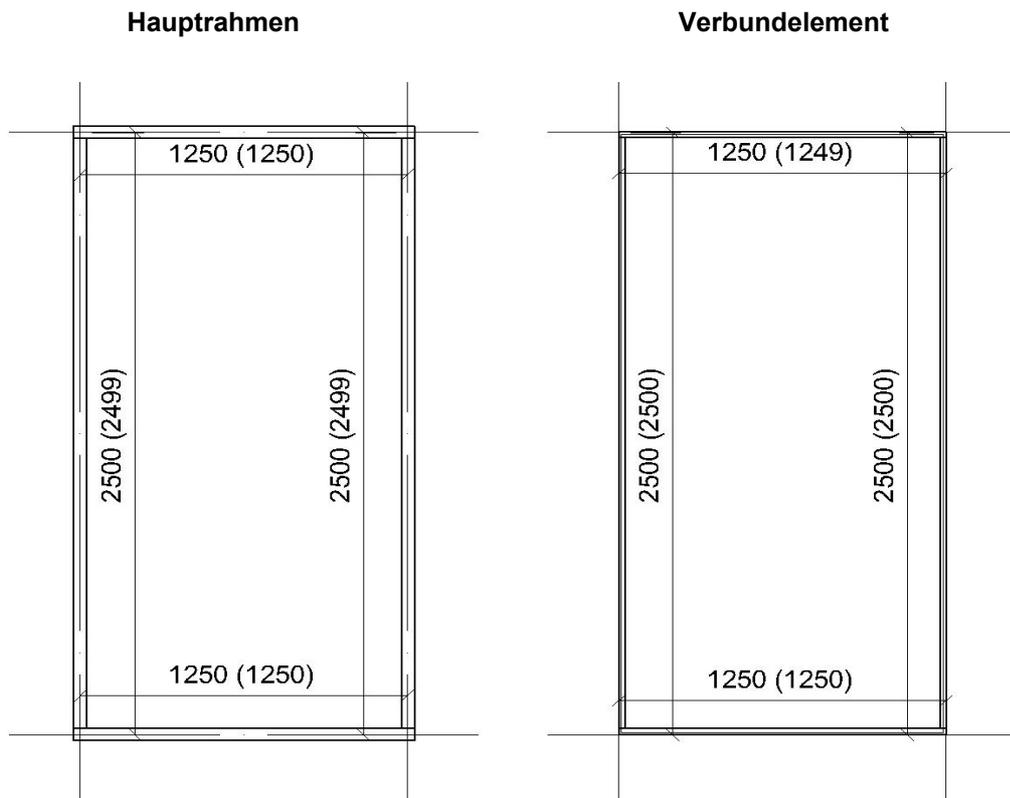
Hauptrahmen



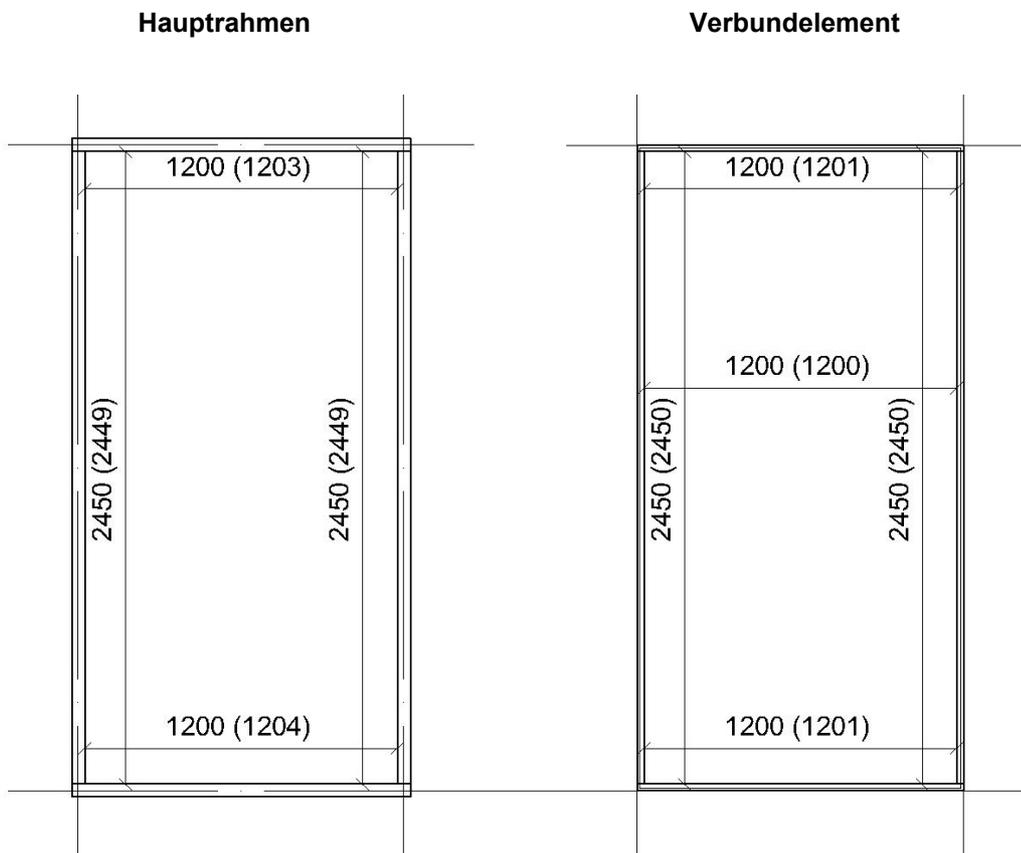
Verbundelement



**B 5 Prototyp P5**



**B 6 Prototyp P6**





## **Anhang C – Pläne der Prototypen**



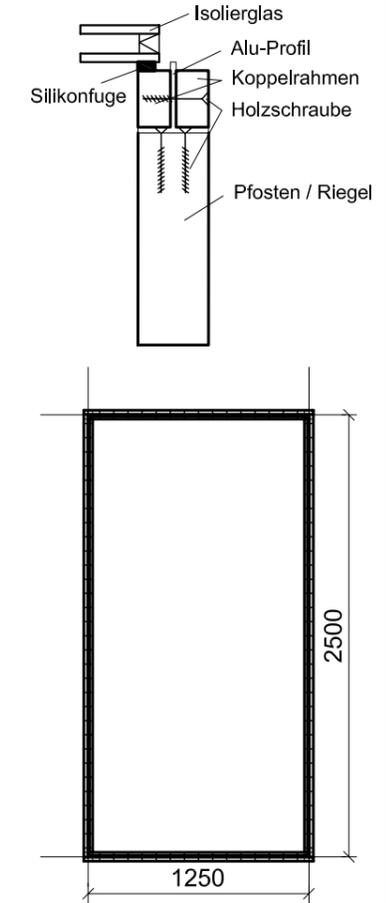
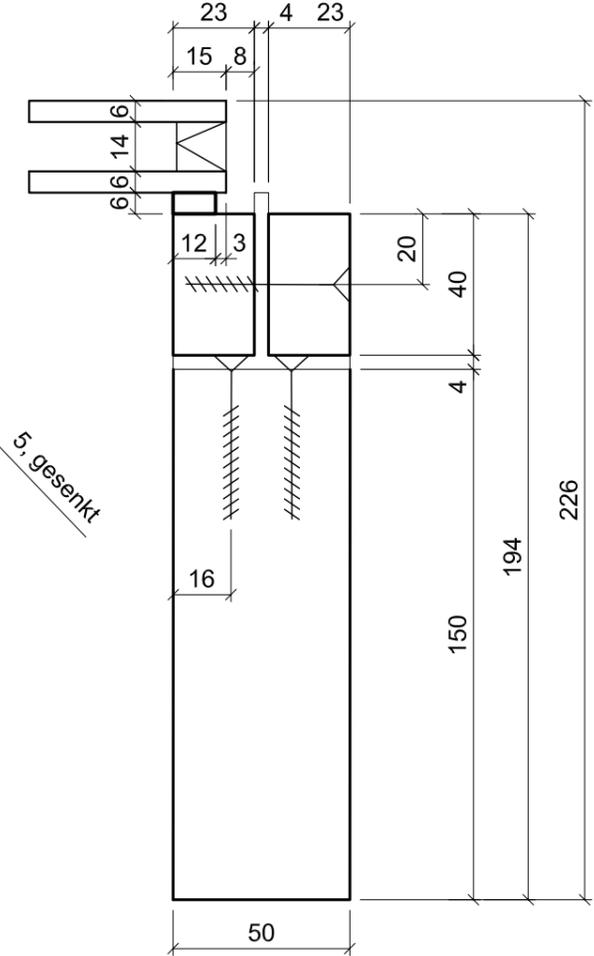
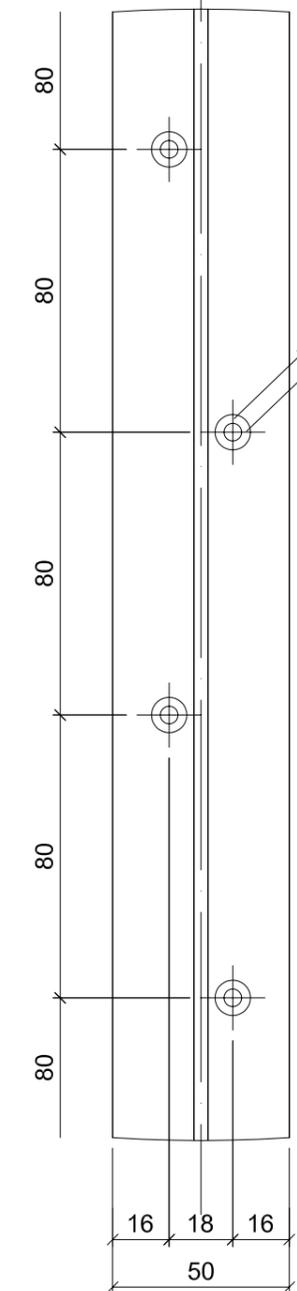
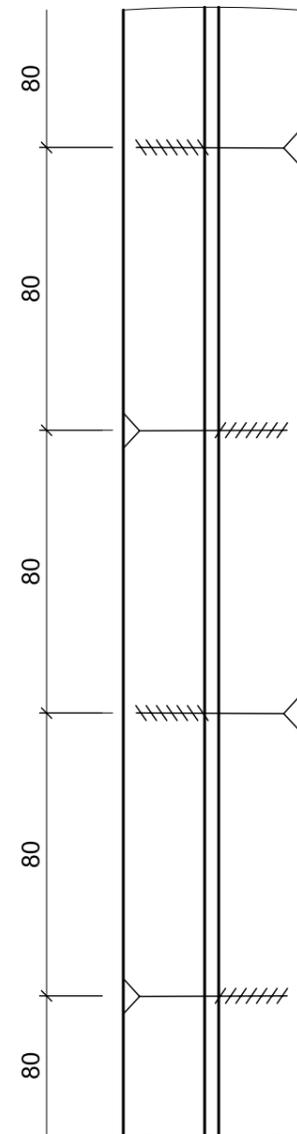
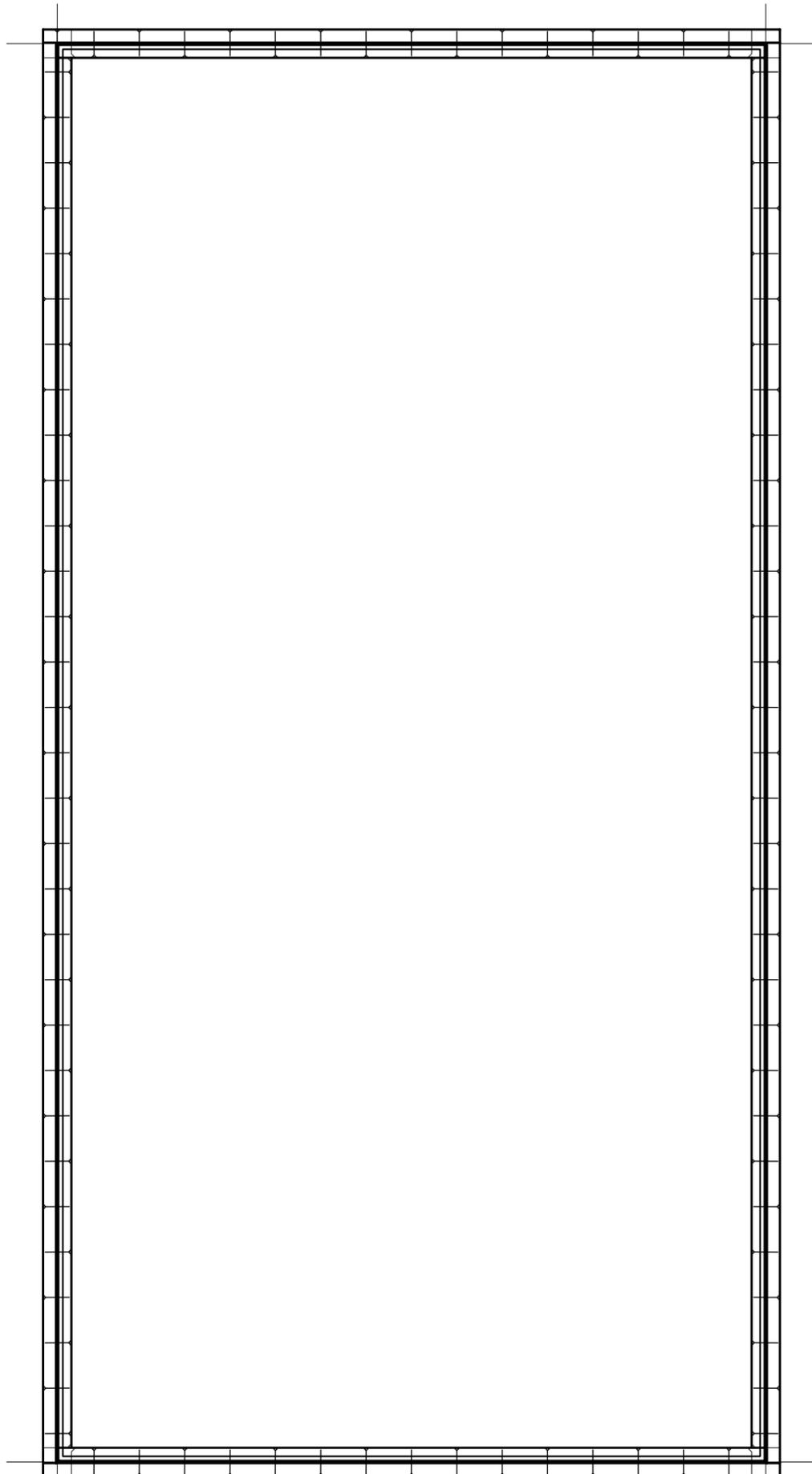
Prüfelement

Verschraubung Koppelrahmen

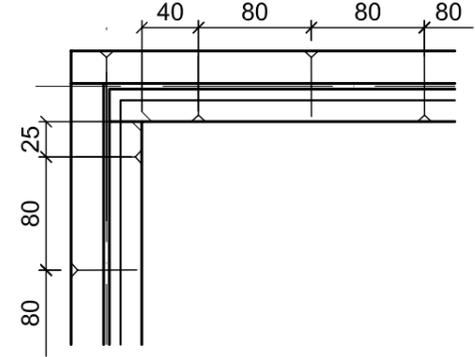
Bohrbild Alu-Profil

Detail Rahmenquerschnitt

Schema



Detail Verschraubung Elementecke



Hauptrahmeneckverschraubung mit 2x120x6cm pro Ecke

Alu-Profile in den Ecken auf Gehrung geschnitten

Hauptriegel liegt auf Hauptpfosten auf, zur Lagesicherung Stoß verschraubt

Koppelrahmenriegel liegt jeweils auf Koppelrahmenpfosten auf

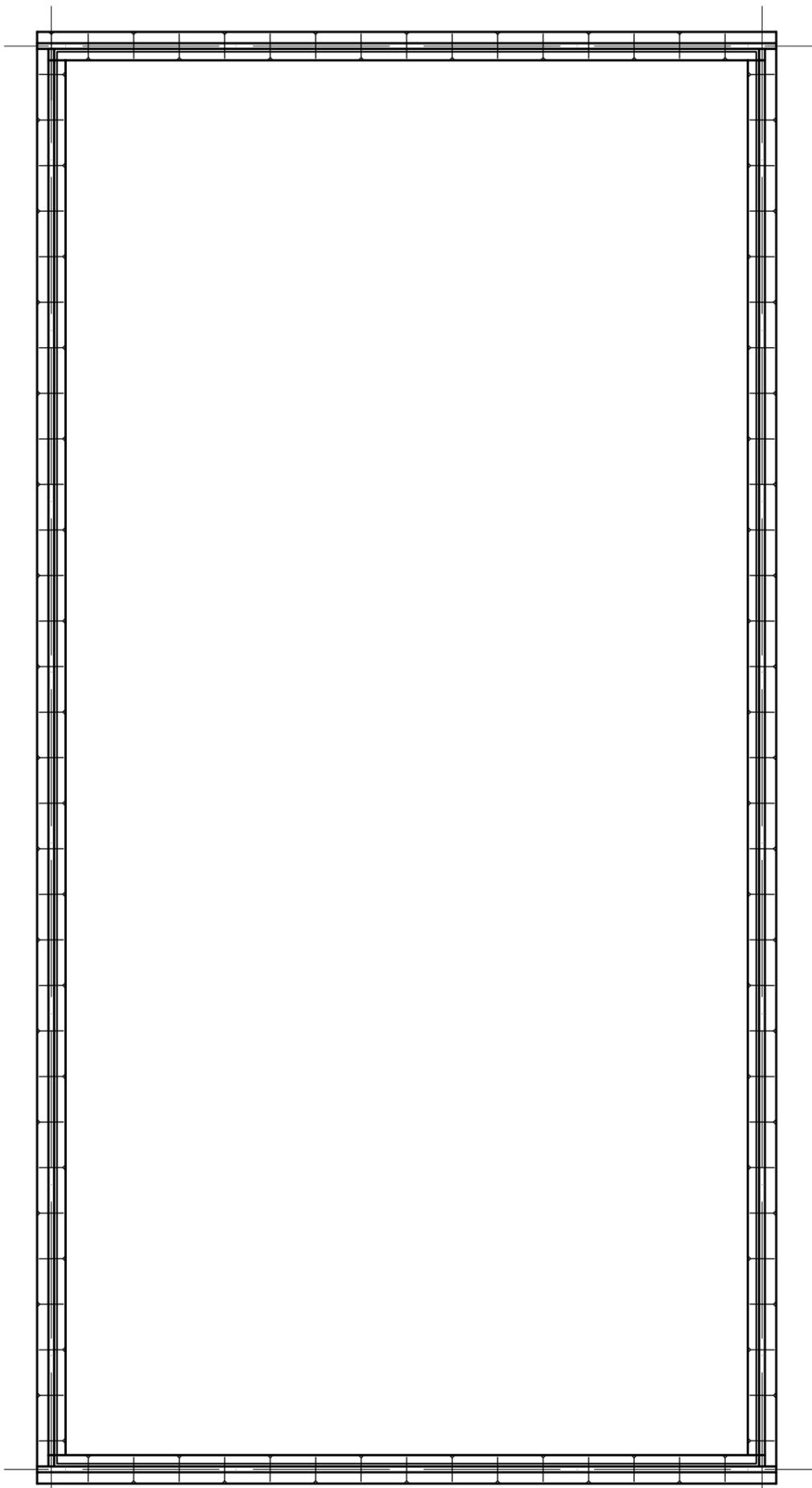
Koppelrahmen nicht vorgebohrt

Pfosten / Riegel nicht vorgebohrt

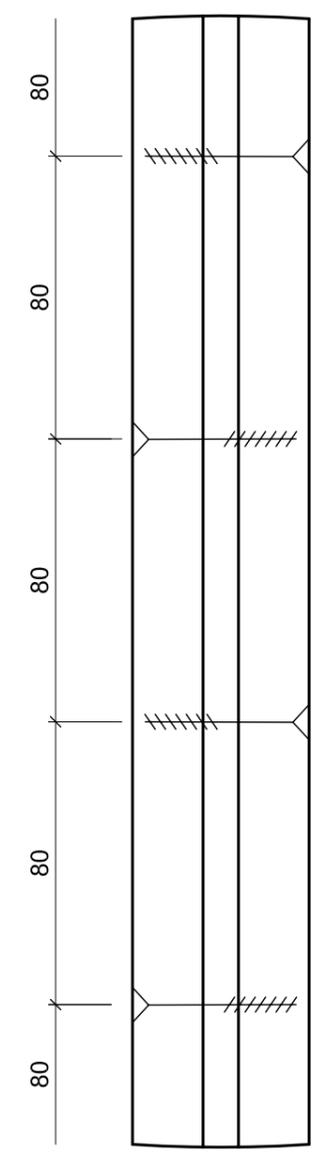
Holzschraube	120x6mm	8x	
Holzschraube, selbstbohrend	60x5mm	100x	
Holzschraube, selbstbohrend	45x4,5mm	100x	
Leiste, Fichte geschliffen, geklebt	40x23mm	2x	124,6cm
Leiste, Fichte geschliffen, geklebt	40x23mm	2x	245cm
Leiste, Fichte geschliffen, außen	40x23mm	2x	130cm
Leiste, Fichte geschliffen, außen	40x23mm	2x	250,4cm
Riegel, Fichte gehobelt	150x50mm	2x	130cm
Pfosten, Fichte gehobelt	150x50mm	2x	245cm
Klebstoff Silikon 2K			
Alu-Profil, 50x50x4 mm		2x	120cm
Alu-Profil, 50x50x4 mm		2x	245cm
Isolierglas 6/14/6		1x	1230x2480mm

<b>Versuchsreihe 1</b>		<b>P 1</b>
Variante: <b>V 1A / Koppelrahmen auf Aluprofil</b>		
Klebstoff: <b>Silikon 2K</b>		

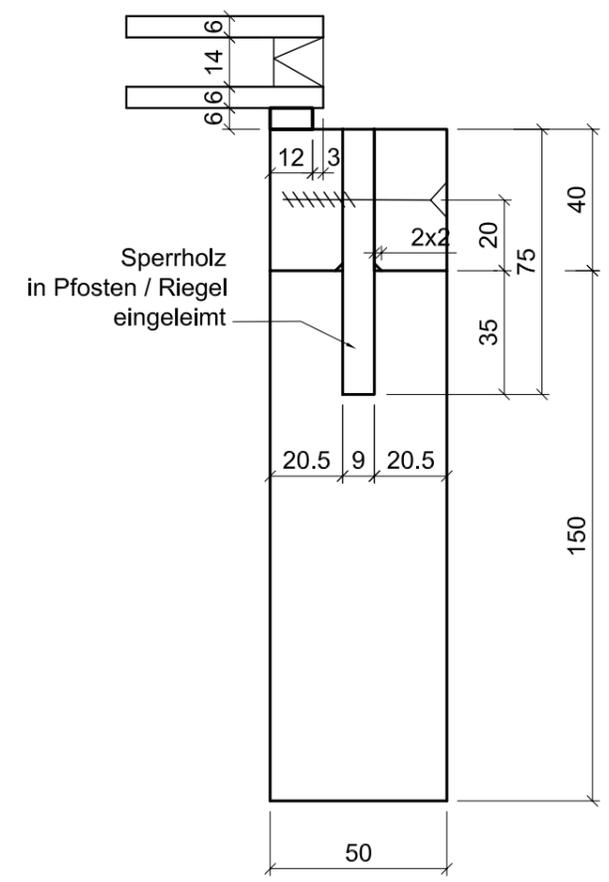
Prüfelement



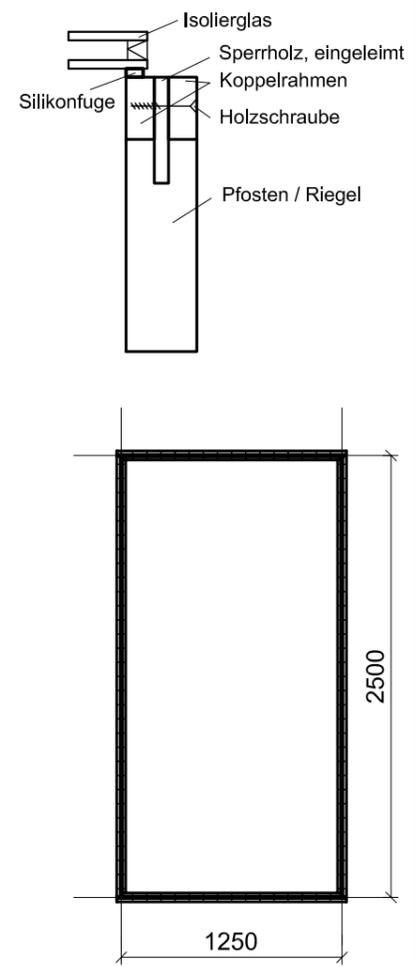
Verschraubung Koppelrahmen



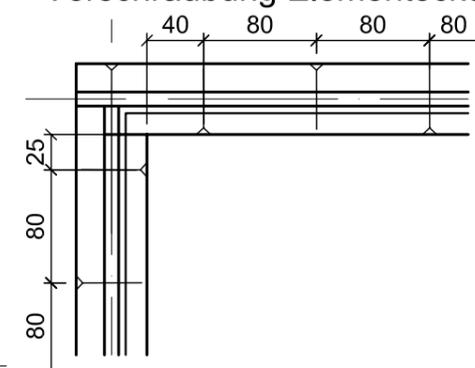
Detail Rahmenquerschnitt



Schema



Detail Verschraubung Elementecke



Hauptrahmeneckverschraubung mit 2x120x6cm pro Ecke

Sperrholz in Pfosten / Riegel eingeleimt

Hauptriegel liegt auf Hauptpfosten auf, zur Lagesicherung Stoß verschraubt

Koppelrahmenriegel liegt jeweils auf Koppelrahmenpfosten auf

Holzschraube	120x6mm	8x	
Holzschraube, selbstbohrend	45x4,5mm	100x	
Leiste, Fichte geschliffen, geklebt	40x20mm	2x	124cm
Leiste, Fichte geschliffen, geklebt	40x20mm	2x	245cm
Leiste, Fichte geschliffen, außen	40x20mm	2x	130cm
Leiste, Fichte geschliffen, außen	40x20mm	2x	249cm
Pfosten, Fichte gehobelt	150x50mm	2x	130cm
Pfosten, Fichte gehobelt	150x50mm	2x	245cm
Klebstoff Silikon 2K			
Sperrholzsteg	75x9mm	2x	130cm
Sperrholzsteg	75x9mm	2x	245cm
Isolierglas 6/14/6		1x	1230x2480mm

<b>Versuchsreihe 1</b>	<b>P 2</b>
Variante: <b>V 1B / Koppelrahmen an Sperrholzsteg</b>	
Klebstoff: <b>Silikon 2K</b>	

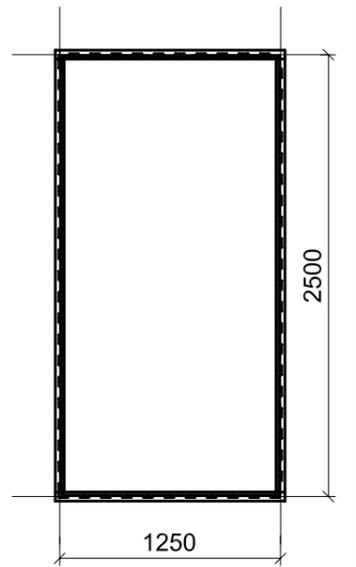
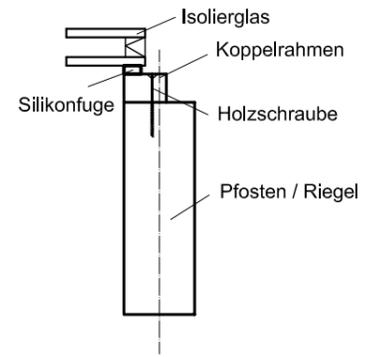
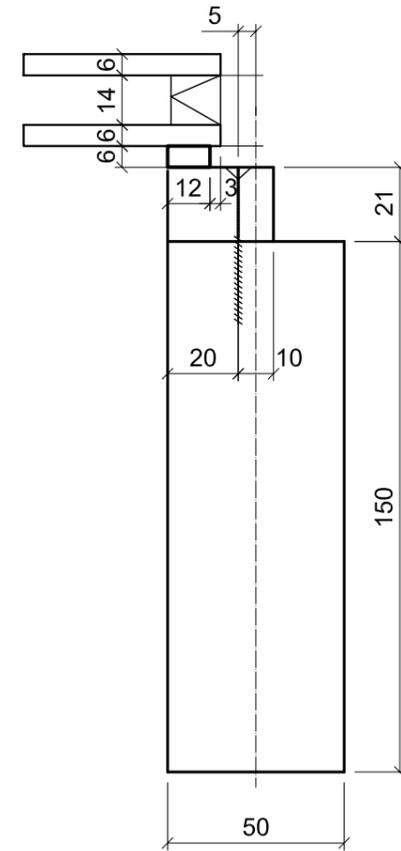
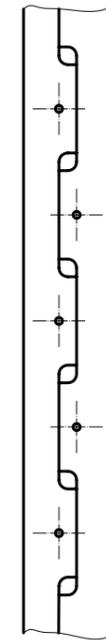
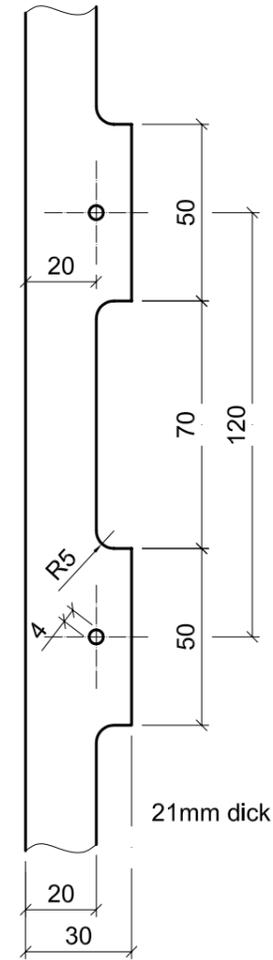
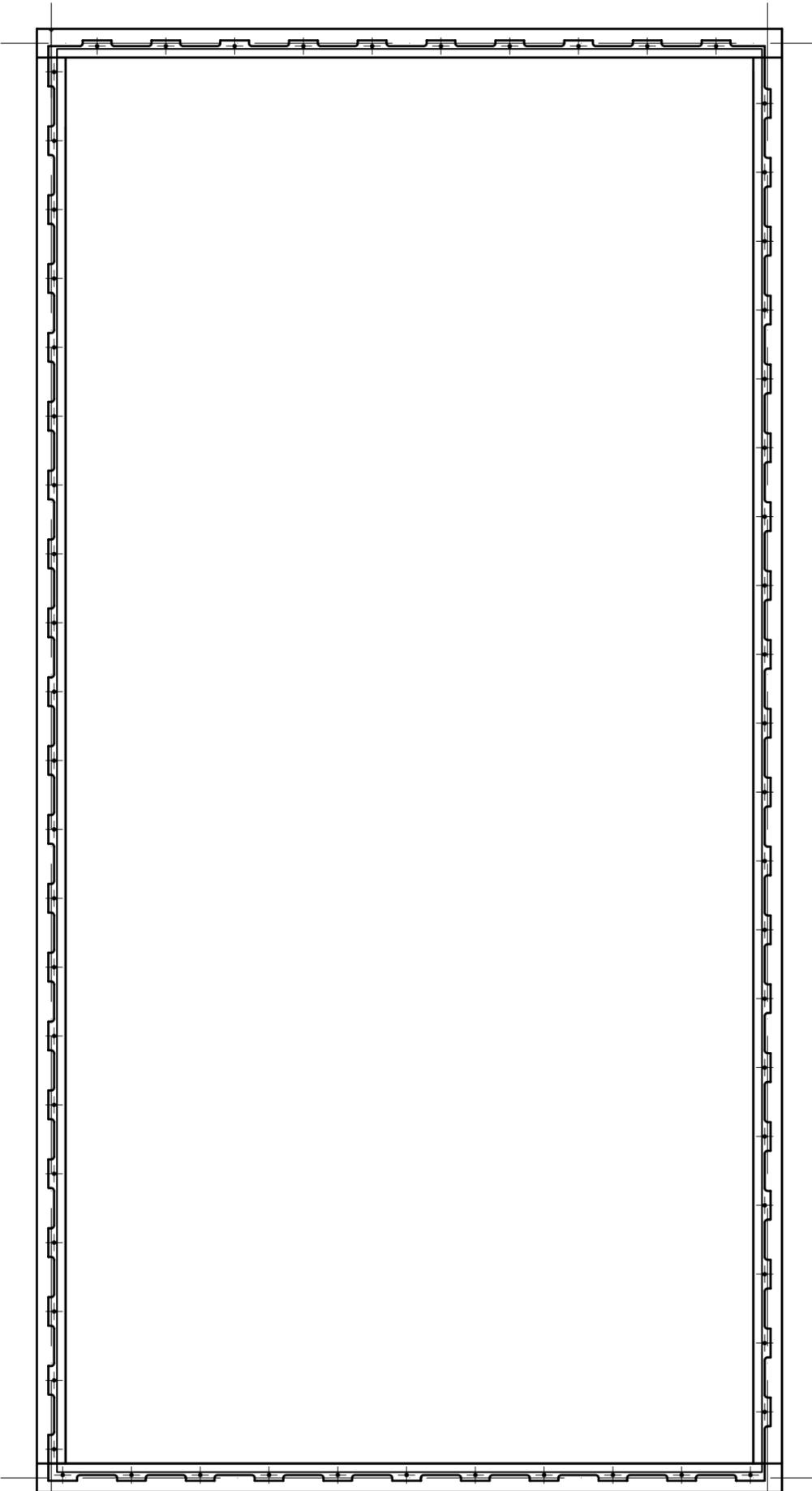
Prüfelement

Detail Koppelrahmen

Verschraubung Schema

Detail Rahmenquerschnitt

Schema



Hauptrahmeneckverschraubung mit 2x120x6cm pro Ecke

Koppelleiste aus Furnierschichtholz, gefräst, vorgebohrt

Gegenüberliegende Koppelleisten unterschiedlich gefräst!

Hauptriegel liegt auf Hauptpfosten auf, zur Lagesicherung Stoß verschraubt

Koppelrahmenstöße und Fräsbild nach Detail "Prüfelement"

Holzschraube	120x6mm	8x	
Holzschraube, selbstbohrend	80x5mm	70x	
Leiste, Furnierschichtholz	30x21mm	2x	125cm
Leiste, Furnierschichtholz	30x21mm	2x	245cm
Pfosten, Fichte gehobelt	150x50mm	2x	130cm
Pfosten, Fichte gehobelt	150x50mm	2x	245cm
Klebstoff Silikon 2K			
Isolierglas 6/14/6		1x	1230x2480mm

Versuchsreihe 1

P 3

Variante:  
V 2 / Koppelrahmen flach, von außen verschraubt

Klebstoff:  
Silikon 2K

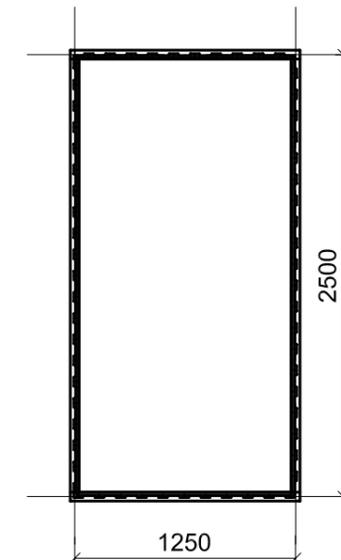
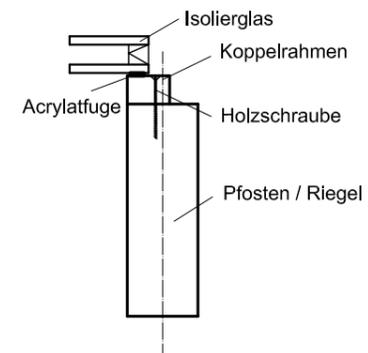
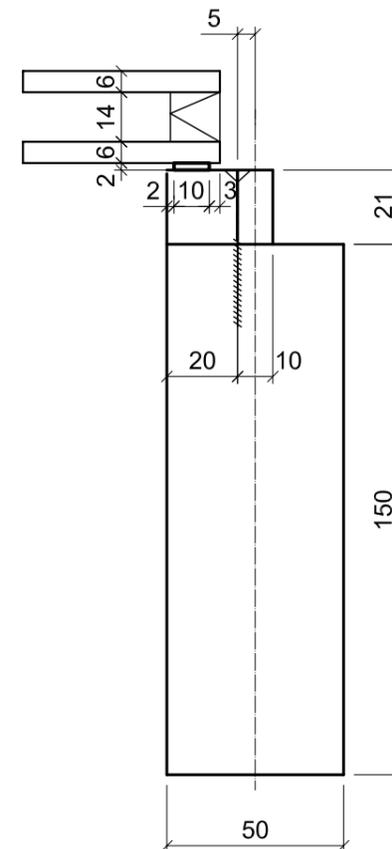
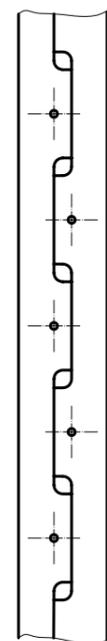
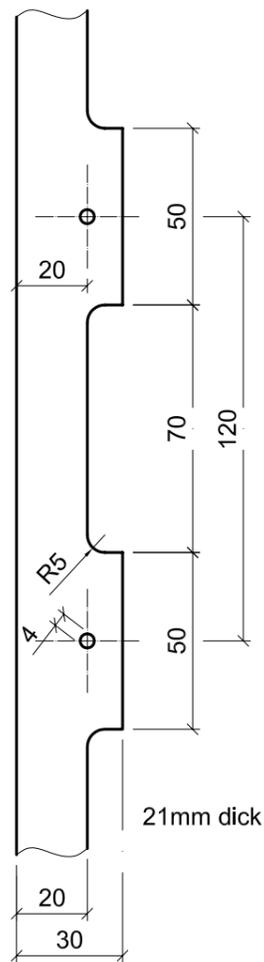
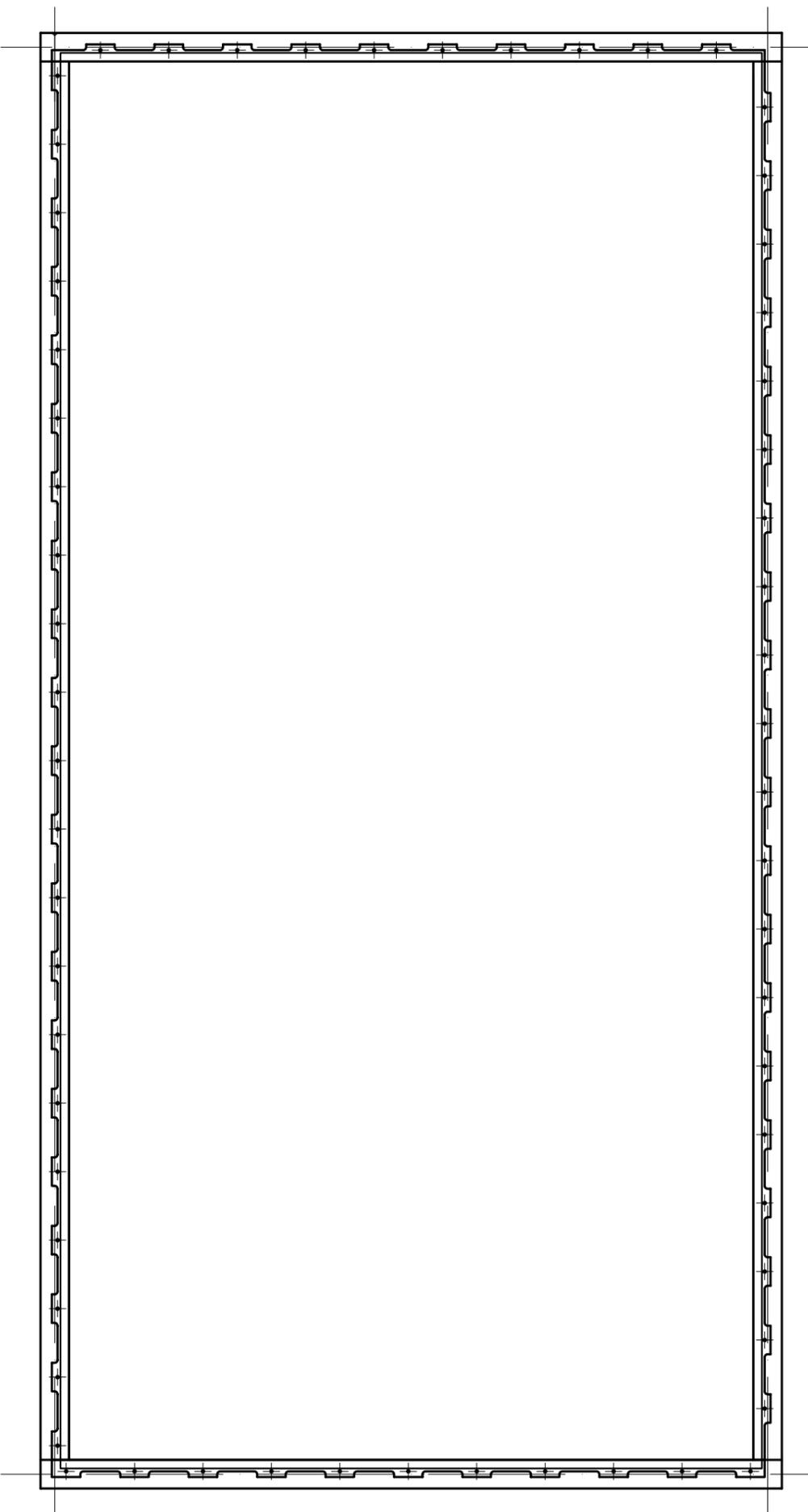
### Prüfelement

### Verschraubung Koppelrahmen

### Verschraubung Schema

### Detail Rahmenquerschnitt

### Schema



Hauptrahmeneckverschraubung mit 2x120x6cm pro Ecke

Koppelleiste aus Furnierschichtholz, gefräst, vorgebohrt

Gegenüberliegende Koppelleisten unterschiedlich gefräst!

Hauptriegel liegt auf Hauptpfosten auf, zur Lagesicherung Stoß verschraubt

Koppelrahmenstöße und Fräsbild nach Detail "Prüfelement"

Holzschraube	120x6mm	8x	
Holzschraube, selbstbohrend	80x5mm	70x	
Leiste, Furnierschichtholz	30x21mm	2x	125cm
Leiste, Furnierschichtholz	30x21mm	2x	245cm
Pfosten, Fichte gehobelt	150x50mm	2x	130cm
Pfosten, Fichte gehobelt	150x50mm	2x	245cm
Klebstoff Acrylat 2K			
Isolierglas 6/14/6		1x	1230x2480mm

Versuchsreihe 1

P 4

Variante:

V 4 / Koppelrahmen flach, von außen verschraubt

Klebstoff:

Acrylat 2K



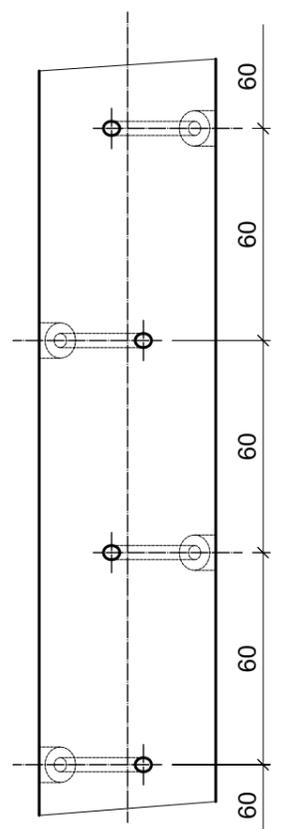
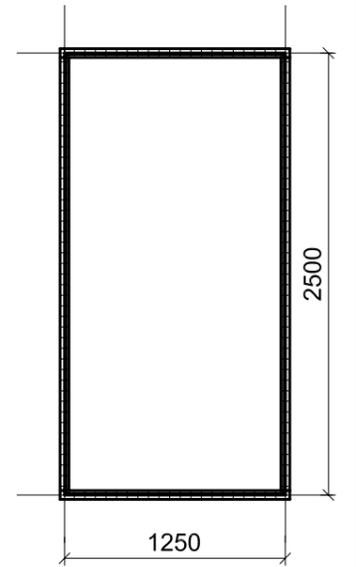
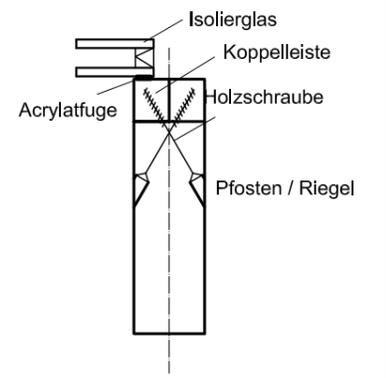
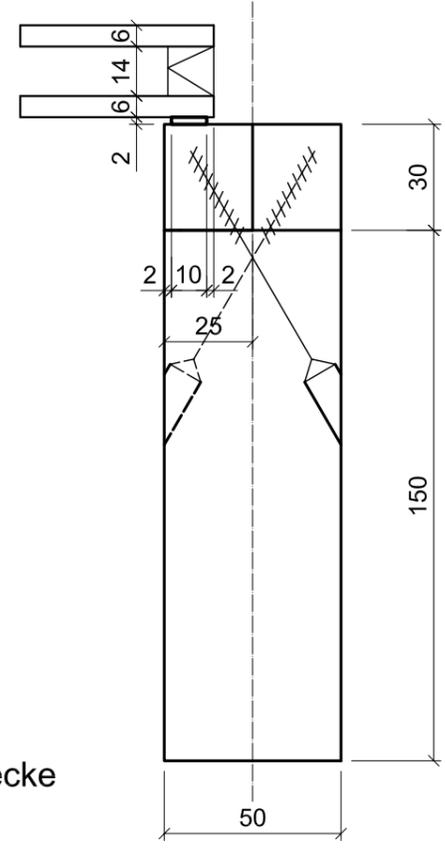
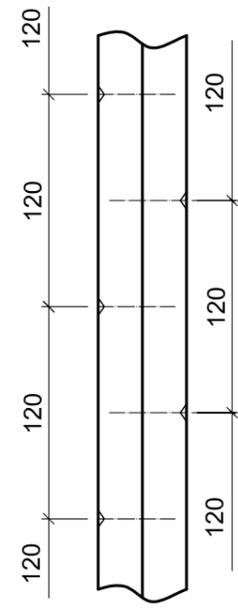
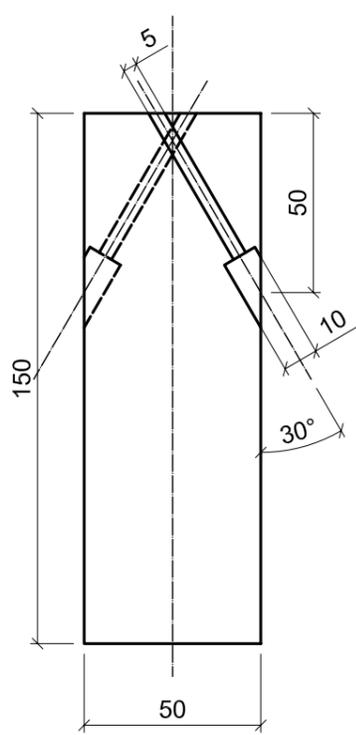
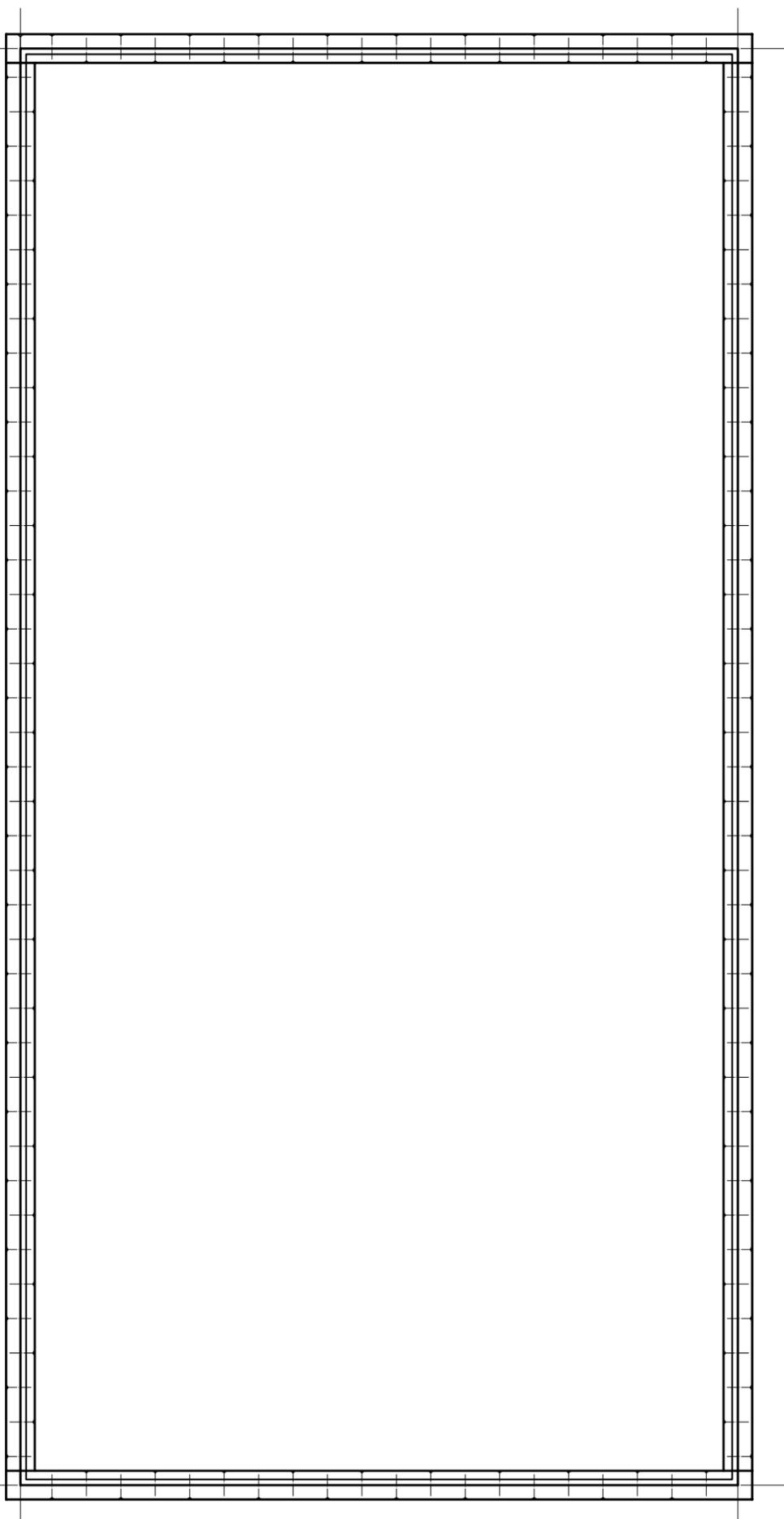
Prüfelement

Detail Pfosten / Riegel

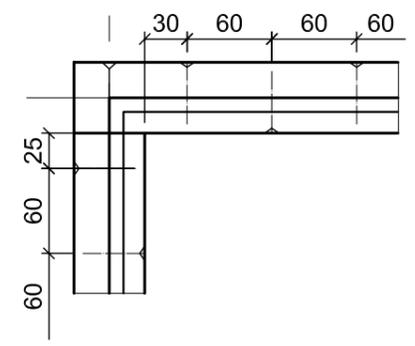
Verschraubung Schema

Detail Rahmenquerschnitt

Schema



Detail Verschraubung Elementecke



- Hauptrahmeneckverschraubung mit 2x120x6cm pro Ecke
- Koppelleiste aus Fichte, geschliffen, nicht vorgebohrt
- Hauptriegel liegt auf Hauptpfosten auf, zur Lagesicherung Stoß verschraubt
- Koppelrahmenriegel liegt auf Koppelrahmenpfosten auf

Holzschraube	120x6mm	8x	
Holzschraube, selbstbohrend	70x5mm	140x	
Leiste, Fichte geschliffen	30x25mm	2x	250cm
Leiste, Fichte geschliffen	30x25mm	2x	130cm
Leiste, Fichte geschliffen	30x25mm	2x	125cm
Leiste, Fichte geschliffen	30x25mm	2x	245cm
Pfosten, Fichte gehobelt	150x50mm	2x	130cm
Pfosten, Fichte gehobelt	150x50mm	2x	245cm
Klebstoff Acrylat 2K			
Isolierglas 6/14/6		1x	1230x2480mm

<b>Versuchsreihe 1</b>		<b>P 6</b>
Variante: <b>V 5 / Koppelrahmen schräg verschraubt</b>		
Klebstoff: <b>Acrylat 2K</b>		

## Anhang D - Patentschrift

Für eine Konstruktionslösung wurde eine Patentschrift verfasst und am 06.07.2005 beim österreichischen Patentamt eingereicht. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichtes lag noch kein Genehmigungsbescheid des Patentamtes vor. Eine Abschrift des Patentantrages ohne Patentansprüche ist in Folge angeführt.

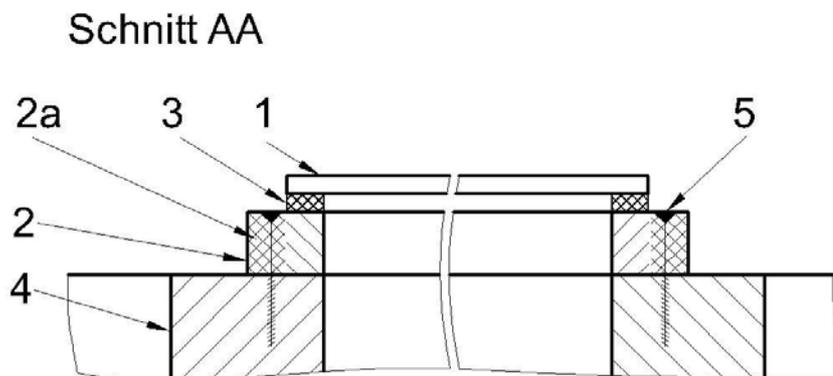
### D 1 Titel der Erfindung

Glas-Verbundelement

### D 2 Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Glas-Verbundelement aus Glas mit entlang des Glasrandes aufgeklebten Leisten (2, 2b, 2m, 2bm), die an einer Tragkonstruktion (4) befestigt sind, dadurch gekennzeichnet, dass die Leisten (2, 2b, 2m, 2bm), vorzugsweise aus Holzwerkstoffen, einen ausreichend über den Rand der Glasscheibe (1) ragenden Bereich (2a) aufweisen, an dem sie, vorzugsweise mit statisch aussteifender Wirkung, an der Tragkonstruktion (4), vorzugsweise rundum, befestigt sind.

Die Verklebung (3) stellt dabei den Verbund zwischen dem Glas und den Leisten her und bewirkt eine Abminderung von Spannungsspitzen bei auftretenden äußeren Belastungen sowie einen Ausgleich von klimatisch bedingten Längenänderungsdifferenzen zwischen der Glasscheibe und den Leisten (2, 2b, 2m, 2bm). Die Systematik der Befestigung (5) erlaubt einen Ausgleich von Bautoleranzen bei den Achsabständen der Tragkonstruktion (4).



Schnitt AA aus Fig. 1

### **D 3 Beschreibung**

Die Erfindung betrifft ein Glas-Verbundelement aus Glas mit entlang des Glasrandes aufgeklebten Leisten, die an einer Tragkonstruktion befestigt sind.

### **D 4 Stand der Technik**

Bei der herkömmlichen Bauweise von Glas-Fassaden oder beispielsweise Wintergärten werden auf hölzerne Pfosten-Riegel-Konstruktionen Aluminiumprofile aufgeschraubt und darüber Gummiprofile gestülpt. Die Glasscheibe wird dann durch Halteleisten, welche mit dem Aluminiumprofil verschraubt werden an diese Gummiprofile gedrückt und dadurch befestigt. Das Aluminiumprofil stellt dabei auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit eine wärmetechnische Schwachstelle dar.

Mit dieser Konstruktionsweise können lediglich Belastungen normal auf die Glasebene, zB. Winddruck und Windsog, aufgenommen werden. In der Ebene der Glasscheibe darf bei dieser Standardlösung keine statische Belastbarkeit angesetzt werden. Aussteifungsmaßnahmen für die Baukonstruktion sind daher immer durch die Pfosten-Riegel-Tragkonstruktion selbst oder durch ein anderes Tragsystem zu setzen.

Will man Glas als scheibenbildendes Bauelemente einsetzen um eine Tragkonstruktion auszusteifen, besteht die Möglichkeit, den statisch wirksamen Anschluss an die Tragkonstruktion durch aufwendige Punkthalterungen herzustellen, wobei ein mechanisches Bearbeiten der Glasscheibe erforderlich ist, oder Klotzungen vorzusehen sind. Die auftretenden Kräfte werden dabei punktförmig aus der Baukonstruktion in die Glasscheibe geleitet, wodurch sich erhebliche statische Nachteile bezüglich der Belastbarkeit des Glases ergeben.

Durch einen linienförmigen Lasteintrag in die Glasscheibe, wie es bei Verklebungen entlang des Umfanges der Glasscheibe der Fall ist, können bei entsprechender Elastizität der Klebefuge auftretende Spannungsspitzen abgebaut und verteilt werden. Es liegt eine schonende Lasteintragung in die Glasscheibe vor. Ein Ausgleich von unterschiedlichen Längenänderungen des Glases und der Leisten bei Temperaturschwankungen oder Änderung der Holzfeuchte der Leisten wird ebenso durch die Verklebung aufgenommen.

Bei bekannten verklebten Glas-Verbundelementen nach Fig. 2 werden die angeklebten Leisten derart ausgebildet, dass eine Verschraubung des Verbundelementes mit der Tragkonstruktion parallel zur Ebene der Glasscheibe vorgesehen wird, wobei ein Aluminium-T-Profil als Koppelement notwendig ist. Um diese Verschraubung ausführen zu können ist ein gewisser Montageabstand zwischen der Schraubenachse und der Glasscheibe erforderlich. Dies bedingt einen großen Abstand zwischen der Glasscheibe als Aussteifungselement und der Hauptachsebene der Tragkonstruktion. Dadurch ist das System nicht für hohe Aussteifungsanforderungen geeignet. Eine gute Montier- und Demontierbarkeit ist nicht gegeben, da immer zwei benachbarte Elemente miteinander verschraubt werden. Das Aluminiumprofil stellt des Weiteren auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit eine wärmetechnische Schwachstelle dar und muss bei der Montage vorgebohrt werden. Die Schraubenköpfe bleiben von innen sichtbar. Ein Ausgleich von Bauleranzen bei den Achsabständen der Tragkonstruktion ist nicht möglich, da die Leisten stets an das Aluminiumprofil und somit zur Tragkonstruktionshauptachse gezogen werden. Eigenspannungen im System sind nicht vermeidbar.

Bei einem anderen bekannten Glas-Verbundelement werden anstatt der Leisten die Pfosten und Riegel der Tragkonstruktion selbst entlang des Umfanges der Glasscheibe aufgeklebt. Diese Ausführung weist erhebliche Nachteile in den Punkten industrielle Herstellbarkeit sowie Montier- und Demontierbarkeit auf. Das Glas-Verbundelement ist hier selbst Teil des

Tragsystems und kann nur aus dem System entfernt werden, wenn andere Teile des Tragsystems dessen Aufgabe der Lastabtragung übernehmen. Dies bedingt eine Überdimensionierung des Tragsystems. Das Handling von Pfosten und Riegeln bei der industriellen Herstellung ist umständlicher als das Handling von Leisten. Das Glas-Verbundelement muss auch zu einem sehr frühen Zeitpunkt an die Baustelle gebracht werden, da es Teil der Tragstruktur ist. Die Gefahr von Beschädigungen im Baufortschritt steigt.

## **D 5 Aufgabe der Erfindung**

Der Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, ein Glas-Verbundelement derart auszugestalten, dass eine Aussteifungswirkung für Baukonstruktionen erzielt werden kann, eine industrielle Vorfertigung möglich ist, dass eine einfache Montier- und Demontierbarkeit gegeben ist, dass ein Ausgleich von Bautoleranzen bei den Achsabständen der Tragkonstruktion möglich ist und eine spannungsfreie Montage durchführbar ist, dass der Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion gering ist, dass die spezifische Montagezeit gering ist und dass der Anwendungsbereich vielfältig ist.

## **D 6 Lösung der Aufgabe**

Die Erfindung löst die gestellte Aufgabe dadurch, dass die Leisten, vorzugsweise aus Holz oder Holzwerkstoffen, einen ausreichend über den Rand der Glasscheibe ragenden Bereich aufweisen, an dem sie, vorzugsweise mit statisch aussteifender Wirkung, an der Tragkonstruktion, vorzugsweise rundum, befestigt sind.

## **D 7 Effekte der Erfindung**

Das erfindungsgemäße Glas-Verbundelement kann als Aussteifungselement für Baukonstruktionen verwendet werden. Auftretende Horizontalbelastungen auf die Baukonstruktion durch Wind oder Erdbeben oder spezielle Lastfälle können durch das statische Scheibenelement wirkende Glas-Verbundelement aufgenommen und abgetragen werden.

Der Fluss der auftretenden Kräfte aus der Baukonstruktion läuft zunächst über mechanische Verbindungsmittel in die Leisten und weiter über eine entlang des Umfanges der Glasscheibe verlaufende Klebefuge linienförmig in die selbe. Eine schonende Lasteintragung in die Glasscheibe ist gegeben, wodurch die Tragfähigkeit des Glases sehr gut ausgenützt werden kann.

Die beschriebene Erfindung kann durch Automatisierung der Verklebung der Glasscheiben mit den Leisten industriell zu einem Halbfertigprodukt vorgefertigt werden.

Da die Leisten über den Rand der Glasscheibe ragen kann das Glas-Verbundelement wie eine Holzwerkstoffplatte an einer Tragkonstruktion befestigt werden. Durch die beschriebene Art der Befestigung ist bei der Montage eine zweiachsige Verschieblichkeit in der Ebene der Glasscheibe derart möglich, dass Bautoleranzen bei den Achsabständen der Tragkonstruktion ausgeglichen werden können. Das Glas-Verbundelement kann unabhängig von benachbarten Elementen durch die beschriebene Anordnung und Wirkungsrichtung der mechanischen Befestigungsmittel montiert und demontiert oder ausgetauscht werden.

Das Glas-Verbundelement kann spannungsfrei montiert werden, da bei der Montage kein Vorbohren der Tragkonstruktion notwendig ist.

Durch das Wegfallen des üblicherweise erforderlichen Aluminium-T-Profiles verbessert sich der Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion.

Die Anzahl der erforderlichen Bauelemente, die für ein Rasterelement erforderlich ist, ist im Vergleich zu bekannten Systemen geringer, wodurch Montagezeiten und Herstellungskosten reduziert werden können.

Der Anwendungsbereich der Glas-Verbundelemente ist vorzugsweise für Glasfassaden, Wintergärten, Fixverglasungen, flachen oder gekrümmten Glasdächern oder Glaswänden und für Glaselemente im Fertighausbau und ähnlichem zu sehen. Auch der Einsatz als Aussteifungselement bei tragenden Bauelementen wie Balken und Trägern, Stützen, Fachwerken, Schalen, Wandscheiben oder ähnlichem ist möglich. Durch die besonderen Herstellungs- und Montage Merkmale bietet sich auch die Anwendung des Glas-Verbundelementes an, wenn keine statischen Anforderungen gestellt werden.

Das Glas-Verbundelement kann je nach Einsatzbereich von innen oder von außen an die Tragkonstruktion gesetzt und befestigt werden, die Glasscheibe kann dabei jeweils der Tragkonstruktion zu- oder abgewandt sein.

Um die Ansichtsbreite der Tragkonstruktion zu verringern und somit ein filigranes Erscheinungsbild zu ermöglichen können die Leisten ein Verzahnungsprofil entlang ihrer Längsachse aufweisen.

Um eine versatzfrei und kontaktfugefreie Ansicht der Glas-Verbundelemente zu realisieren können die Elemente der Tragkonstruktion entlang ihrer Längsachse eine Querschnittsausnehmung aufweisen, in der die Leisten verdeckt an der Tragkonstruktion befestigt sind.

Um ein einfaches Demontieren oder Austauschen eines einzelnen Glas-Verbundelementes zu ermöglichen kann die Befestigung der Leisten an der Tragkonstruktion lösbar befestigt sein, vorzugsweise durch Verschraubung.

Durch Verwendung von Metall als Werkstoff für die Leisten kann die Bauhöhe des Glas-Verbundelementes verringert werden, wodurch auch der Abstand zwischen der Systemachse der Tragkonstruktion und der Glasscheibenebene kleiner wird. Das Aussteifungsverhalten verbessert sich, wobei sich jedoch die wärmetechnischen Eigenschaften verschlechtern.

Es besteht die Möglichkeit, die Leisten des Glas-Verbundelementes entlang von nur zwei Rändern der Glasscheibe, vorzugsweise entlang von einander gegenüberliegenden Rändern, anzukleben. So können spezielle ästhetische Anforderungen erfüllt werden, wobei sich die statische Belastbarkeit verringert.

Zur Steigerung der Systemstabilität können Glas-Verbundelemente auch in mehreren Lagen, vorzugsweise beidseitig der Tragkonstruktion befestigt werden. Ist der Querschnitt der Tragkonstruktion samt den Glas-Verbundelementen um die Hauptebene der Tragkonstruktion symmetrisch, so liegt auch die Wirkebene der Aussteifungskräfte in der Hauptebene der Tragkonstruktion. Dadurch werden konstruktiv bedingte, Torsion hervorrufende Kräftepaare ausgeschaltet. Abgesehen von Auslenkungen durch Imperfektion verformt sich die ausgesteifte Tragkonstruktion bei Belastung in der Ebene bis zum Stabilitätsverlust auch in der Ebene, eine Verdrehung fällt aus.

## **D 8 Aufzählung und Kurzbeschreibung der Zeichnungsfiguren**

In den Zeichnungen ist der Erfindungsgegenstand beispielhaft dargestellt.

In Fig. 1 ist das Glas-Verbundelement in Ansicht und als Schnitt dargestellt.

Fig. 2 zeigt eine Variante der Befestigung des Glas-Verbundelementes als Schnitt dargestellt.

Fig. 3 zeigt ein bekanntes Glas-Verbundsystem als Schnitt.

Fig. 4 zeigt den Schnitt des an eine exemplarische Tragstruktur befestigten Glas-Verbundelementes in verdeckter Bauweise.

Fig. 5 zeigt die an das Glas zu klebenden Leisten zur Veranschaulichung der Ansichtsbreite und der Berücksichtigung der Bautoleranzen der Achsmaße der Tragstruktur in Ansicht und als Schnitt sowie die Ausführung der Leisten in Metall als Schnitt.

Fig. 6 zeigt die an das Glas zu klebenden Leisten als verzahnte Variante zur Veranschaulichung der Verringerungsmöglichkeit der Ansichtsbreite und der Berücksichtigung der Bautoleranzen der Achsmaße der Tragstruktur in Ansicht und als Schnitt sowie die Ausführung der Leisten in Metall als Schnitt.

In Fig. 7 ist die beidseitige Anordnung von Glas-Verbundelementen an einer Tragkonstruktion als Schnitt dargestellt.

In Fig. 8 sind die Komponenten des Glas-Verbundelementes isometrisch dargestellt.

In Fig. 9 ist das fertige Glas-Verbundelement isometrisch dargestellt.

In Fig. 10 ist der Montageablauf an einem Beispiel isometrisch dargestellt.

## **D 9 Figurenbeschreibung**

Gemäß der Darstellung in Fig. 1 werden auf eine Glasscheibe 1 entlang ihres Umfanges Leisten 2, 2b, 2m, 2bm aufgeklebt. Die Qualität und Ausführung der Glasscheibe 1 ist nach Einsatzgebiet und sicherheitstechnischen Anforderungen wählbar. Vorzugsweise soll teilvorgespanntes Glas oder Verbundsicherheitsglas verwendet werden. Bei bauphysikalischen Anforderungen ist der Einsatz von Isolierglas möglich, wobei je nach Ausführung auch die Verwendung von Stufenfalzglas möglich ist. Der Querschnitt der Leisten 2 richtet sich nach den statischen Erfordernissen. Flache Querschnitte begünstigen den Kraftfluss bei statischen Belastungen. Zur Realisierung von geringen Ansichtsbreiten der Tragstruktur und somit Erhöhung des Glasanteiles sollen Holzwerkstoffe wie Furnierschichtholz, Furnierstreifenholz oder ähnliches eingesetzt werden. Bestehen keine speziellen wärmetechnischen Anforderungen ist der Einsatz von Metallleisten denkbar, um die statischen Eigenschaften weiter zu verbessern. Die Klebefuge 3 erzeugt einen statisch wirksamen Verbund zwischen dem Glas und den Leisten. Die Art des Klebstoffes ist wählbar und richtet sich nach den bauphysikalischen und statischen Anforderungen sowie nach dessen Alterungsverhalten. Vorzugsweise sind Mehrkomponentenklebstoffe zu verwenden, welche pastös aufgetragen werden und rasch aushärten, wobei auch der Einsatz von Klebebändern möglich ist. Ausschlaggebend für die statische Leistungsfähigkeit des Glas-Verbundelementes ist die Steifigkeit der Klebefuge. Sie soll vorzugsweise derart beschaffen sein, dass eine ausreichende Gesamtsteifigkeit des Glas-Verbundelementes gegeben ist, wobei die Klebefuge noch so elastisch sein soll, dass ein Ausgleich von unterschiedlichen Wärmeausdehnungen des Glases und der Leisten möglich ist. Das Format, die Größe sowie

die Form und Ebenheit der Glasscheibe und somit des Glas-Verbundelementes ist wählbar. Das Glas-Verbundelement wird auf einer Tragkonstruktion 4, vorzugsweise rundum, befestigt. Je nach statischen Anforderungen kann die Befestigung beispielsweise auf die Eckbereiche reduziert werden. Die Befestigung 5 erfolgt im ausreichend über den Rand der Glasscheibe 1 ragenden Bereich 2a, vorzugsweise als lösbare Verbindung, vorzugsweise als Verschraubung. Die Ausbildung der Tragkonstruktion richtet sich nach statischen und ästhetischen Anforderungen. Ausführungen als T-Profil, I-Profil, kreis- oder ellipsenförmiger Querschnitt, Rechteckprofil oder ähnliches sind möglich. Als Variante kann das Glas-Verbundelement gemäß Variante Schnitt AA derart befestigt werden, dass die Glasscheibe 1 der Tragkonstruktion 4 zugewandt ist. Der Werkstoff der Tragkonstruktion richtet sich nach den Befestigungsmitteln oder umgekehrt.

Zur Herstellung einer luft-, regen- und dampfdichten Außenhülle oder eines speziellen optischen Anspruches können sämtliche Fugen zwischen den verwendeten Bauteilen selbst oder zwischen benachbarten Glas-Verbundelementen mit Abdichtbändern, Kunststoffprofilen, Abdeckleisten, Nassversiegelungen oder ähnlichem geschlossen werden.

Zur mechanischen Sicherung der Glasscheibe 1 können örtlich, beispielsweise an den Ecken der Glasscheibe, Halteklammern vorgesehen werden.

In Fig. 2 ist eine Variante der Befestigung des Glas-Verbundelementes dargestellt, wobei die Glasscheibe 1 als mechanisch gesichert gilt und somit nicht bei Versagen der Klebefuge von der Konstruktion fallen kann. Des weiteren ergeben sich hier auch bauphysikalische Vorteile. Der Einsatz von Stufenfalzglas würde sich bei dieser Konstruktionsweise anbieten.

In Fig. 3 ist ein bekanntes Glas-Verbundelement dargestellt. Die angeklebten Leisten 2 sind derart ausgebildet, dass eine Verschraubung des Verbundelementes mit der Tragkonstruktion 4 parallel zur Ebene der Glasscheibe 1 vorgesehen wird, wobei ein Aluminium-T-Profil 6 als Koppелеlement verwendet wird. Der Abstand zwischen der Schraubenachse und der Glasscheibe 1 muss für die Montage, beispielsweise mit einem Akkuschrauber, entsprechend groß sein. Dies bedingt einen großen Abstand zwischen der Glasscheibe 1 als Aussteifungselement und der Hauptachsebene der Tragkonstruktion. Dadurch ist das System nicht für hohe Aussteifungsanforderungen geeignet. Eine gute Montier- und Demontierbarkeit ist nicht gegeben, da immer zwei benachbarte Elemente miteinander verschraubt werden. Das Aluminiumprofil 6 stellt des Weiteren auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit eine wärmetechnische Schwachstelle dar und muss außerdem bei der Montage vorgebohrt werden. Die Schraubenköpfe bleiben von innen sichtbar. Ein Ausgleich von Bautoleranzen bei den Achsabständen der Tragkonstruktion 4 ist nicht möglich, da die Leisten 2 stets an das Aluminiumprofil 6 und somit zur Tragkonstruktionshauptachse gezogen wird. Eigenspannungen im System sind nicht vermeidbar.

In Fig. 4 ist eine Variante des Querschnittes der Tragstruktur 4 dargestellt. In der schmalen Seite des Querschnittes der Tragstruktur 4 ist eine Ausnehmung 4a entlang der Längsachse vorgesehen, die breit genug ist, um einerseits die Leisten 2, 2b, 2m, 2bm aufnehmen zu können und andererseits ein seitliches zweiachsiges Toleranzspiel in der Ebene der Glasscheibe 1 zuzulassen. Durch dieses Toleranzspiel können Bautoleranzen bei den Achsabständen der Tragstruktur 4 aufgenommen werden, ohne einen sichtbaren Kantenversatz zwischen Leisten 2, 2b, 2m, 2bm und Tragstruktur 4 hervorzurufen. Ein ähnlicher Effekt wäre auch durch Anbringen von Setzleisten, Kunststoffsteckprofilen oder ähnlichem möglich.

In Fig. 5 ist die Standardvariante der Leisten 2 dargestellt. Es wird die Ansichtsbreite  $x_a$  gezeigt. Das Toleranzspiel  $T$  für den Ausgleich der Bautoleranzen bei den Achsabständen der Tragstruktur kann bei Erfordernis berücksichtigt werden. Die Art, Anzahl und Randabstände der mechanischen Befestigungsmittel 5 richtet sich nach statischen und montage-technischen Erfordernissen.

Werden die Leisten 2 aus Metall hergestellt so sind diese Metallleisten 2m in flacherer Querschnittsform ausführbar.

In Fig. 6 ist eine optimierte Variante der Leisten 2b dargestellt. Es wird die Ansichtsbreite  $x_b$  gezeigt wobei durch Verzahnen der Leisten 2b bei dieser optimierten Variante ein Ineinandergreifen zweier benachbarter Glas-Verbundelemente ermöglicht wird und dadurch eine geringere Ansichtsbreite der Leisten 2b realisiert wird. Das Toleranzspiel  $T$  für den Ausgleich der Bautoleranzen bei den Achsabständen der Tragstruktur kann bei Erfordernis berücksichtigt werden. Die Art, Anzahl und Randabstände der mechanischen Befestigungsmittel 5 richtet sich nach statischen und montagetechnischen Erfordernissen.

Werden die Leisten 2b aus Metall hergestellt so sind diese Metalleisten 2bm in flacherer Querschnittsform ausführbar.

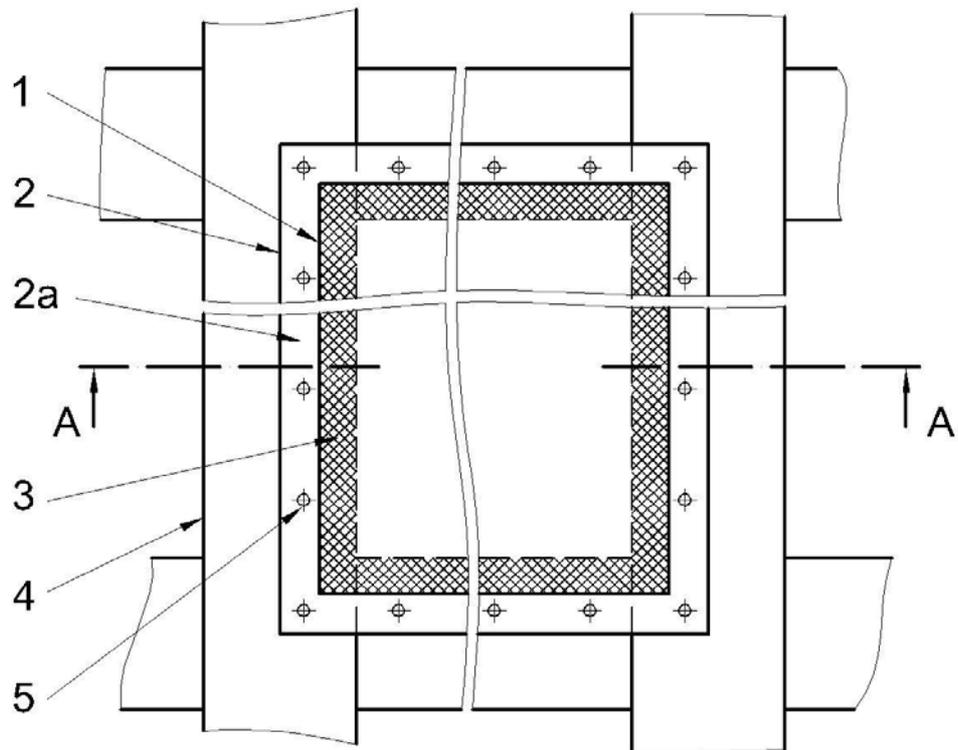
In Fig. 7 ist die beidseitige Anordnung von Glas-Verbundelementen an einer Tragkonstruktion 4 dargestellt. Auf Grund der Symmetrie der Konstruktion verformt sie sich bei Belastung in Hauptachsenebene auch in der Hauptachsenebenen. Es tritt kein Verdrehungseffekt auf, respektive kommt es zu keinen Ausgleichskräften außerhalb der Hauptachsenebene.

In Fig. 8 sind die Komponenten des Glas-Verbundelementes dargestellt. Es zeigt als Herstellungsschema die Glasscheibe 1, auf die der Klebstoff für die Klebefuge 3 aufgebracht wird und die Leisten 2, die darauf appliziert werden. Die Herstellung kann auch derart erfolgen, dass der Klebstoff für die Klebefuge 3 auf die Leisten 2 aufgebracht wird und dann die Glasscheibe appliziert wird oder, dass die Glasscheibe 1 und die Leisten 2 eingerichtet werden und der Klebstoff für die Klebefuge 3 seitlich eingebracht wird. Dieser Prozess kann automatisiert werden wodurch eine industrielle Fertigung möglich wird.

Fig. 9 zeigt das fertige Glas-Verbundelement als Halbfabrikat. In dieser Form kann es gelagert, transportiert und als Bauelement montiert werden.

Fig. 10 zeigt als Montageschema die wie die Glas-Verbundelemente zur Tragstruktur 4, hier beispielhaft zu einer Pfosten-Riegel-Tragstruktur einer Fassade, gebracht und montiert werden.

FIG. 1



Schnitt AA

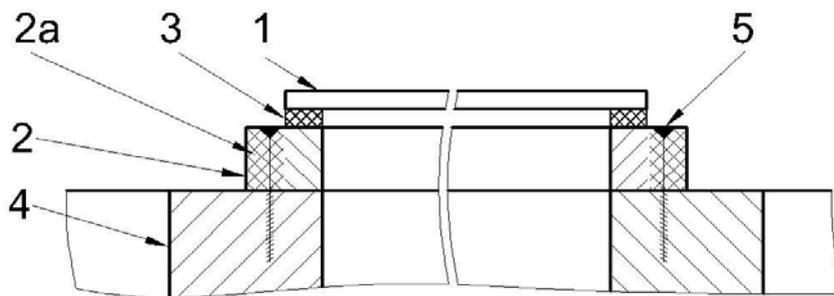


FIG. 2

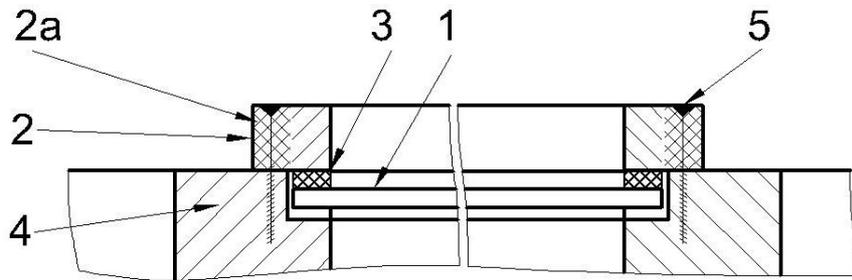


FIG. 3

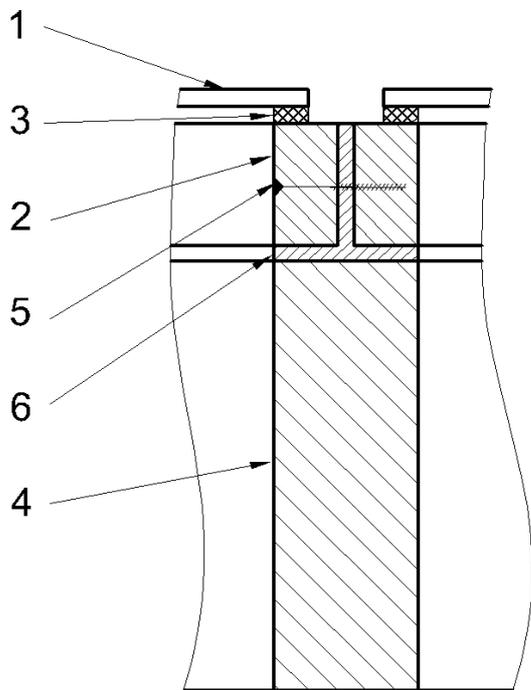


FIG. 4

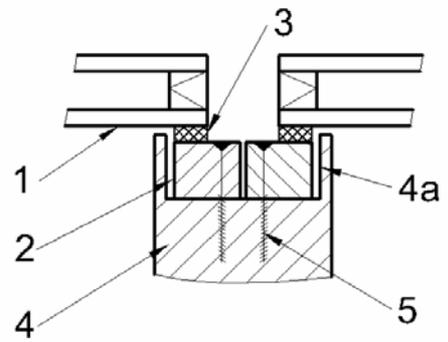


FIG. 5

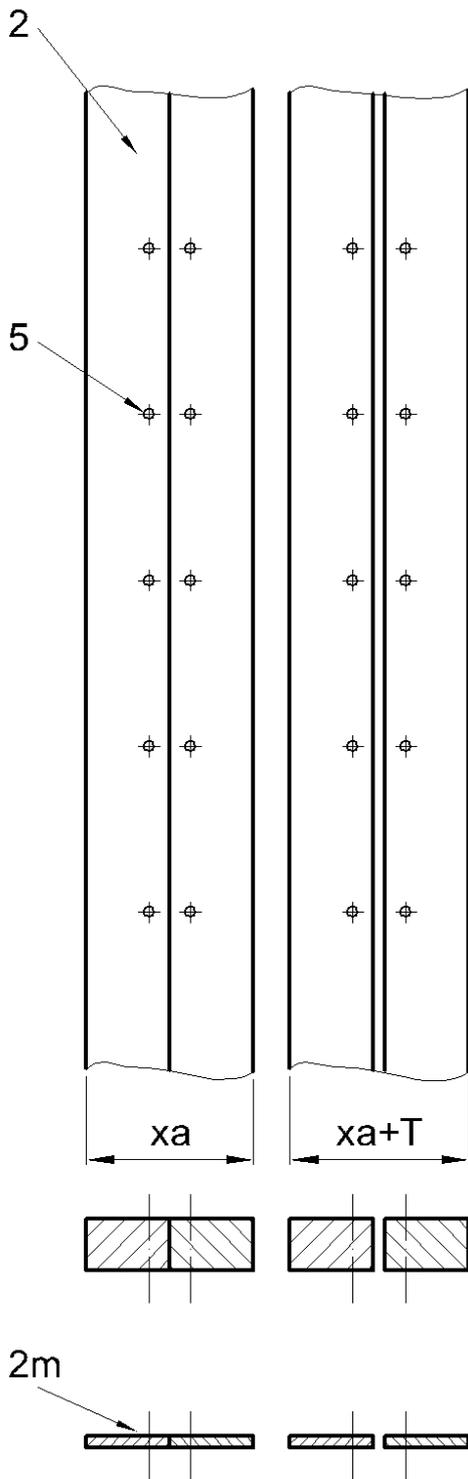


FIG. 6

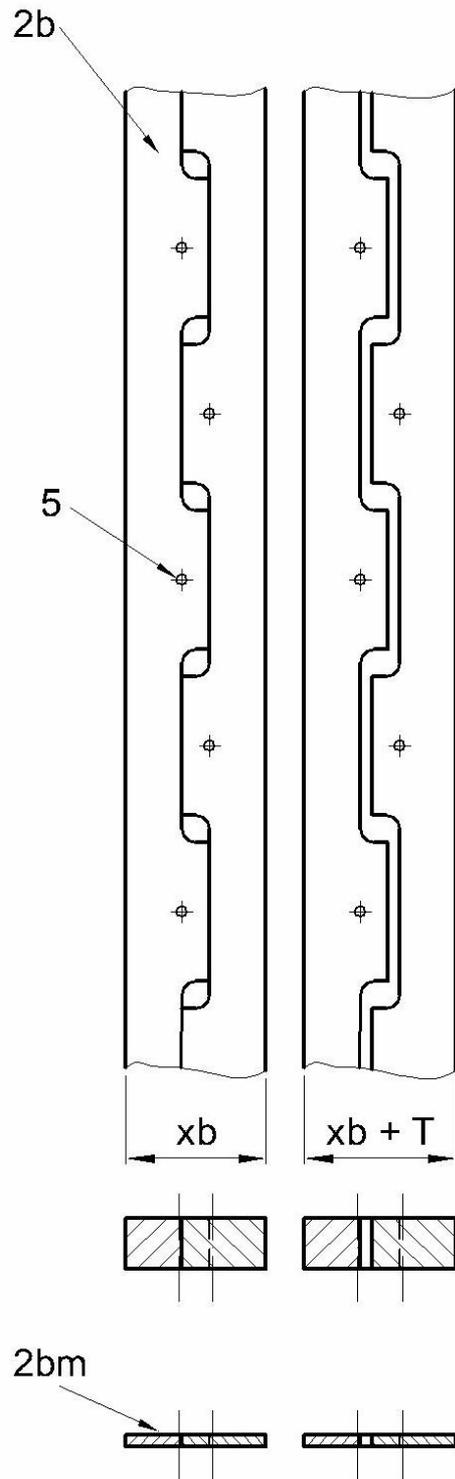


FIG. 7

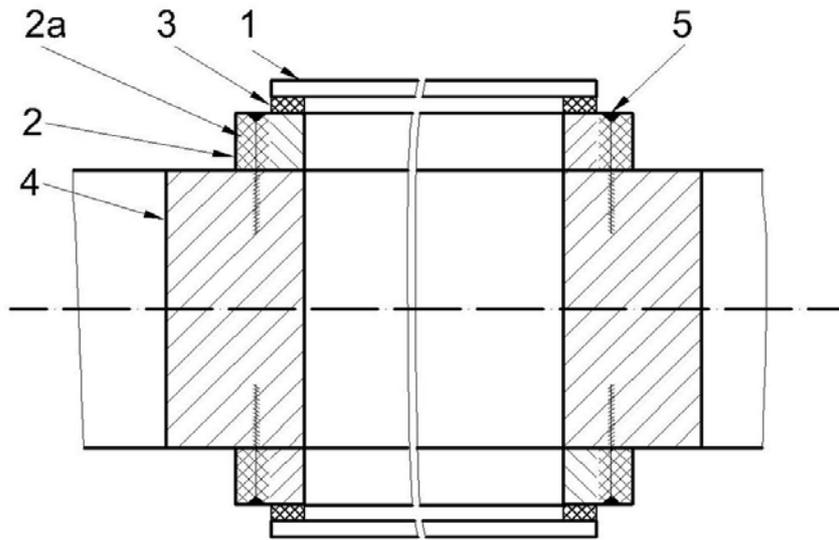


FIG. 8

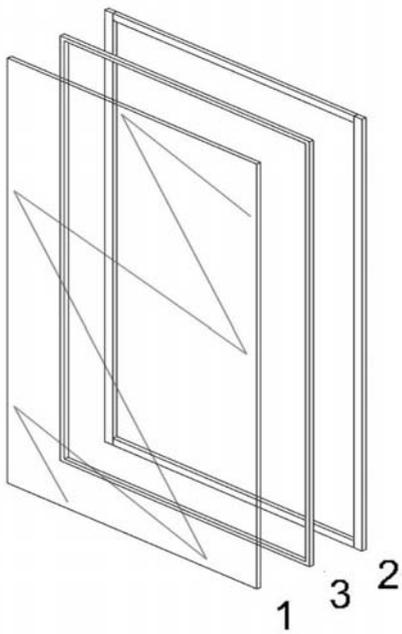


FIG. 9

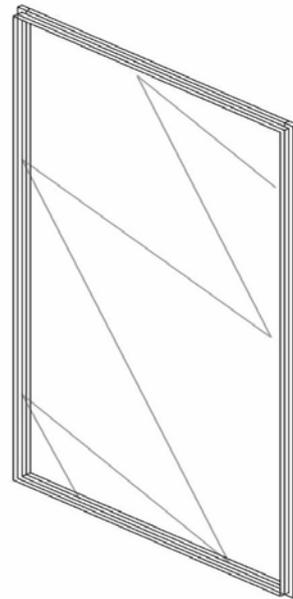
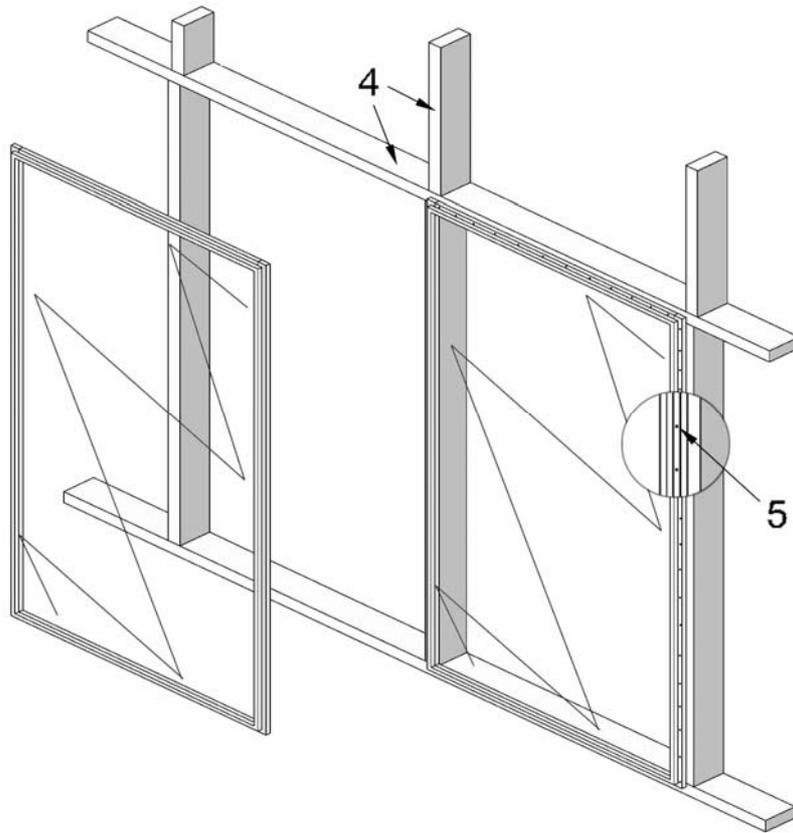
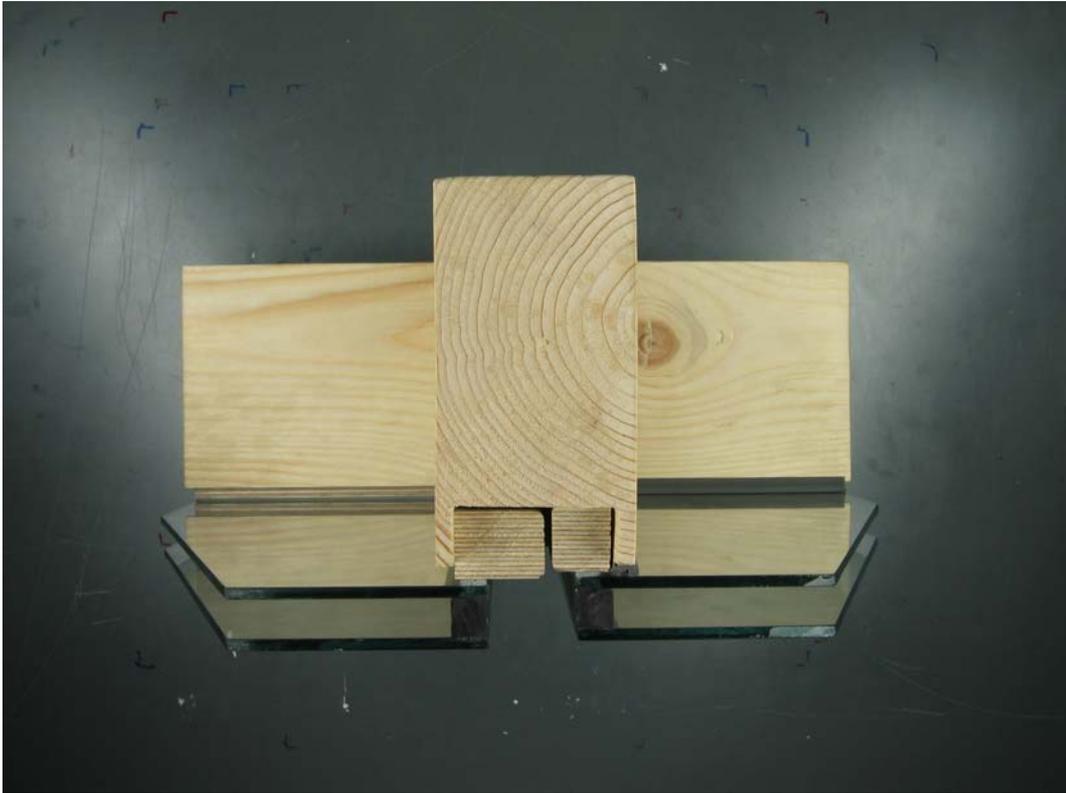


FIG. 10



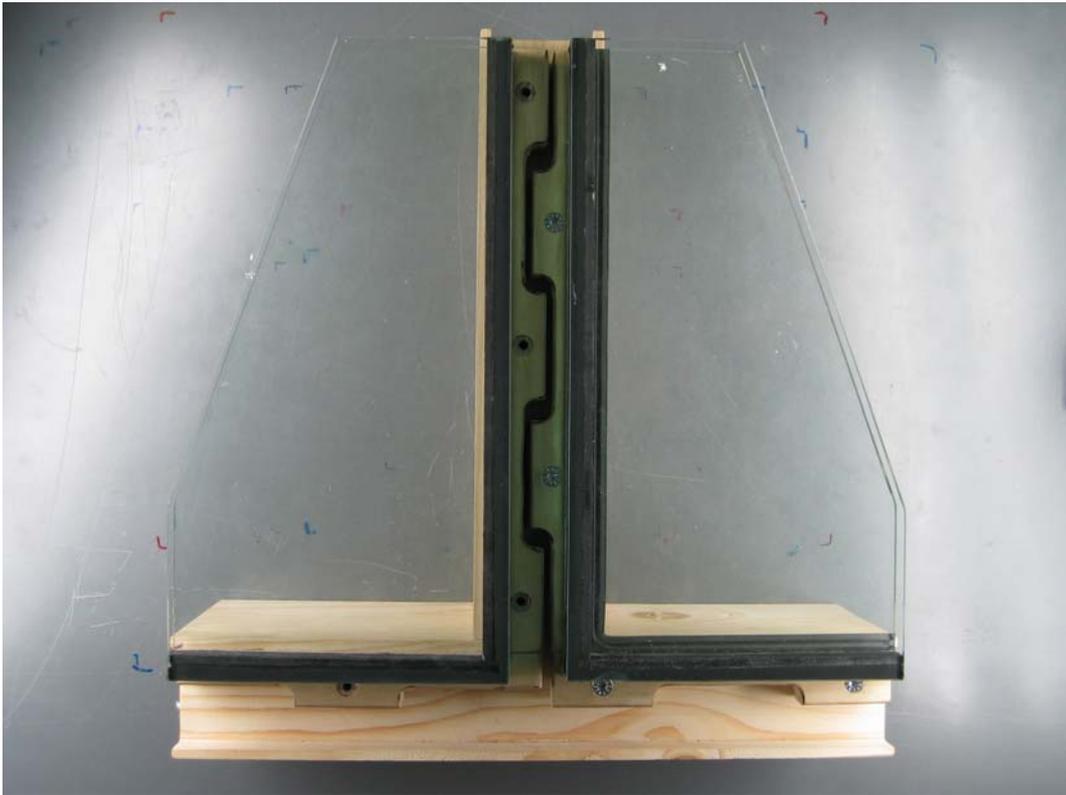
**FIG. 11**



**FIG. 12**



**FIG. 13**



**FIG. 14**

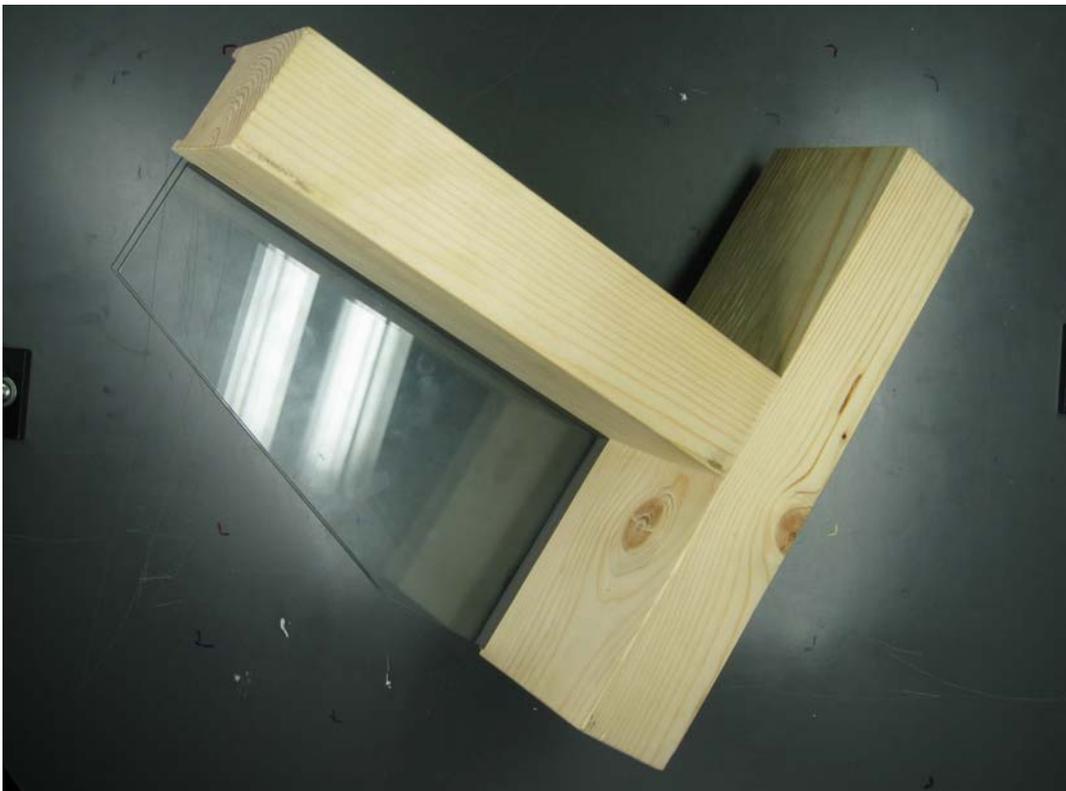


FIG. 15





## Lebenslauf / CV

### Personalien

---

Bmst. Dipl.-Ing. Thomas EDL

geboren: am 5. März 1975, in Wien  
Wohnort: Zehnergasse 20/D/8  
2700 Wiener Neustadt  
E-Mail: t.edl@chello.at  
Staatsbürgerschaft: Österreich

### Schulbildung / Studium

---

Volksschule: Wiener Neustadt 09/1981 – 06/1985  
Gymnasium: Katzelsdorf 09/1985 – 06/1989  
HTBLA Werkstofftechnologie: Eisenstadt 09/1989 – 06/1994  
Technische Universität Wien: Bauingenieurwesen 09/1994 – 01/2001  
(Konstruktiver Ingenieurbau)  
Diplomarbeit: „Konstruktive Gestaltung von Gebäuden in  
lawinengefährdeten Bereichen“  
(Institut für Hochbau und Industriebau)  
Baumeisterprüfung: 05/2003

### Berufstätigkeiten

---

04/1997 – 06 / 2003 **Generalplan 2000**  
Projektleiter  
09/1999 – 06/2000 **TU Wien**  
Tutor am Institut für Tragwerkslehre und  
Ingenieurholzbau  
08/2003 – 09/2005 **Holzforschung Austria**  
Wissenschaftlicher Angestellter  
09/2005 – 07/2008 **DELTA BLOC Europa GmbH**  
Leiter Technik und Lizenzen  
08/2008 – **Geschäftsführer**