

Schlussbericht 06/07

Forschungsprojekt BUWAL

Projektnr. 2005.05

Titel:

Holz-Glas-Verbund als großflächige
Scheibensysteme zur Gebäudeaussteifung

Lehrstuhl für Holzkonstruktionen IBOIS,
IS-ENAC; EPF Lausanne
Prof. Dr. Yves Weinand



Inhaltsverzeichnis

1	VORWORT.....	3
2	KURZBESCHREIBUNG DER PROJEKTZIELE.....	3
3	VORGEHEN.....	4
3.1	Laborversuche.....	4
3.1.1	Herstellung der Prüfkörper	4
3.1.1.1	Prüfkörper Typ „A“.....	9
3.1.1.2	Prüfkörper Typ „B“.....	11
3.1.1.3	Prüfkörper Typ „C“	13
3.1.2	Versuchsaufbau	13
3.1.3	Messtechnik	15
3.1.3.1	Dehnmessstreifen	15
3.1.3.2	Induktive Wegaufnehmer	15
3.1.3.3	Kraftmessdosen	15
3.1.3.4	Film / Foto	15
3.1.4	Ergebnisauswertung.....	16
3.1.4.1	Ermittlung der Schubspannungen in der Klebefuge zwischen Holzrahmen und Glasscheibe	16
3.1.4.2	Ermittlung der Spannungen im Glas an den Stellen der DMS-Rosetten.....	20
3.2	Numerische Simulation.....	22
3.2.1	Modellierung der Materialeien Holz und Glas	23
3.2.2	Darstellung der Klebefuge bzw. des Materials Klebstoff	23
4	ERGEBNISSE	25
4.1	Laborversuche.....	25

4.1.1	Ergebnisse Typ „A“, Lasteinleitung über kurze Seite	25
4.1.2	Ergebnisse Typ „A“, Lasteinleitung über lange Seite	29
4.1.3	Ergebnisse Typ „B“, Lasteinleitung über lange Seite	32
4.1.4	Ergebnisse Typ „C“, Lasteinleitung über lange Seite	33
4.2	Numerische Simulation.....	35
5	VERGLEICH DER ERGEBNISSE.....	36
6	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG.....	42
7	VORARBEITEN / QUELLEN MIT BESONDEREM INTERESSE FÜR DAS FORSCHUNGSVORHABEN.....	43
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	45
9	DIAGRAMMVERZEICHNIS	46
10	TABELLENVERZEICHNIS.....	47

1 Vorwort

Der vorliegende Schlussbericht fasst die bis zum Abschluss dieses Forschungsvorhabens vorgesehenen Arbeiten des Forschungsprojektes BUWAL Nr. 2005.05 per dato 30.06.2007 zusammen. Gefördert vom Bundesamt für Wald und Landschaft (BUWAL) mit den Projektpartnern Despond SA, Bulle, Kurth Glas und Spiegel AG, Zuchwil, Induo Holzverbindungssysteme und Sika Schweiz AG ist ein kooperierungsfähiges Forschungsteam zum Einsatz gekommen. An dieser Stelle möchte der Unterzeichnete allen Projektpartnern Dank für die gute Unterstützung aussprechen.

2 Kurzbeschreibung der Projektziele

Zur Förderung des Holzbaus, vor allem im Bereich des Element- und Modulbaus soll die Möglichkeit des Einsatzes von Holz-Glas-Verbundsystemen zur Horizontalaussteifung von Bauwerken überprüft werden. Hierbei steht im Vordergrund die Belastung der Einzelkomponenten Holz, Glas und Klebstoff durch Versuchsreihen zu ermitteln. Regelmässigkeiten der Spannungsverteilungen bei Elementen unterschiedlicher Geometrie sollen im Vergleich mit numerischen Simulationen aufgezeigt werden. Die Kenntnis der

EPFL ENAC IS IBOIS

Belastung von Holz zur Lasteinleitung, dem Klebstoff zum Lastübertrag und dem Glas als Tragkomponente sind hier essentiell und stehen im Vordergrund der Untersuchungen. Regeln zur Berechnung der Elemente sollen folgend ableitbar werden. Das Tragverhalten, die Fugenbelastung sowie Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit insbesondere auch bei ständigen Lasten sollen aufgezeigt werden.

3 Vorgehen

Die Versuchsreihen wurden im Labor des Instituts IS/IBOIS der EPFL durchgeführt. Die Versuchseinrichtungen und Durchführungen wurden in Regie des IBOIS als Eigenleistung im Rahmen des Forschungsprojektes mit den Mitarbeitern des IBOIS durchgeführt.

3.1 Laborversuche

Alle Versuchskörper wurden durch die Mitarbeiter des IBOIS in Eigenregie als Eigenleistung im Rahmen des Forschungsprojektes hergestellt. Die Materialien wurden von folgenden Industriepartnern zur Verfügung gestellt:

- Glasscheiben: Kurth Glas und Spiegel AG, Zuchwil
- Holzprofile: Despond SA, Bulle
- Klebstoff: SIKA (Schweiz) AG, Zürich
- Verankerungen: Firma Fehr AG, St. Gallen für INDUO Holzverbindungstechnik

3.1.1 Herstellung der Prüfkörper

Zur Herstellung der Probekörper wurden zunächst die Holzprofile (gehobelt, Qualität C22 +, Feuchtigkeit < 20%) abgelängt und mit der zum Verkleben notwendigen Nut versehen (siehe Skizze).

Für das Einbringen der zentrisch intern liegenden Zuganker wurden je Prüfkörper 2 Holzprofile mit der für das INDUO System (www.INDUO.de) typischen Nut versehen und mittels der Bohrschablone die konischen Bohrlöcher zum Einbringen des Ankers vorgebohrt und der Anker eingelegt (siehe Abbildung 3.1).

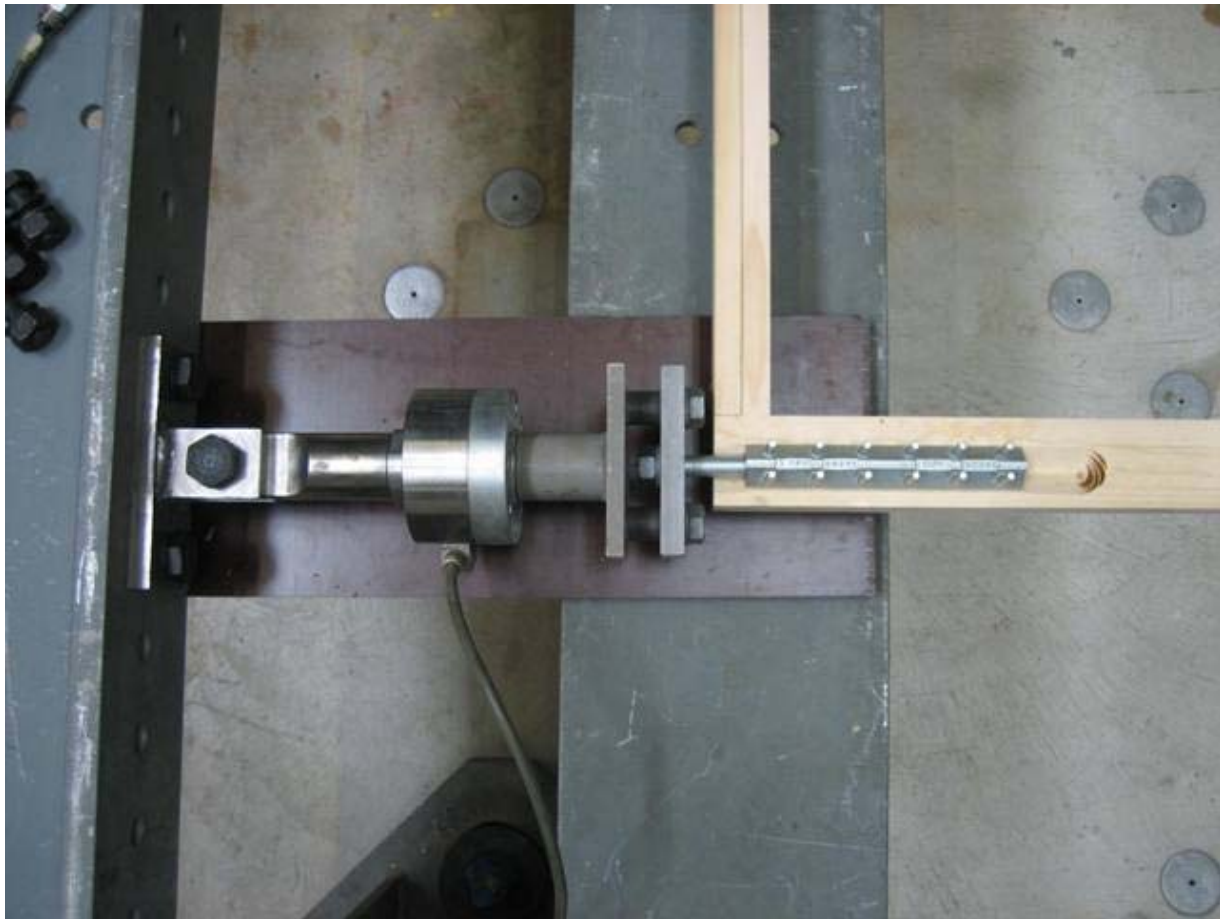


Abbildung 3.1 Einlegen der INDUO Zuganker in die vorgefertigten Holzprofile

Auf einer Lehre wurden die Holzprofile positioniert und provisorisch fixiert um den Klebstoff mit Hilfe einer Druckluftpistole aufbringen zu können. Um die Klebefugenstärke zu gewährleisten wurden vorgefertigte Holzstäbchen mit definierter Stärke (2mm) als Abstandhalter in die Fuge gelegt, bevor mit Hilfe des Deckenkrans und der Saugvorrichtung die Glasscheibe in die vorgesehene Position eingebracht wurde. Zuvor wurden alle Elemente entfettet und gereinigt um Fehlstellen in der Verklebung vorzubeugen (siehe Abbildung 3.2).



Abbildung 3.2 Aufbringen des Klebstoffes und Einlegen der Glasscheibe

Die Offenzeit des Klebstoffs von 9 Minuten erfordert eine zügige und genaue Arbeitsweise. In einem zweiten Arbeitsschritt wurden dann die Holzprofile analog angeordnet und mit der Glasscheibe auf der anderen Scheibenseite verklebt.

Zum Anbringen der Messtechnik wurde die Glasscheibe erneut gereinigt und die Dehnmessstreifen verklebt (siehe Abbildung 3.3). Anschliessend wurden die induktiven Wegaufnehmer angebracht und die Messtechnik verkabelt um sie mit dem Vielstellenmessgerät (UPM60) zu verbinden.

Um bei Glasbruch die Bruchstücke zu fixieren, wurde eine selbstklebende Klarsichtfolie von unten auf die Schiebe aufgebracht.

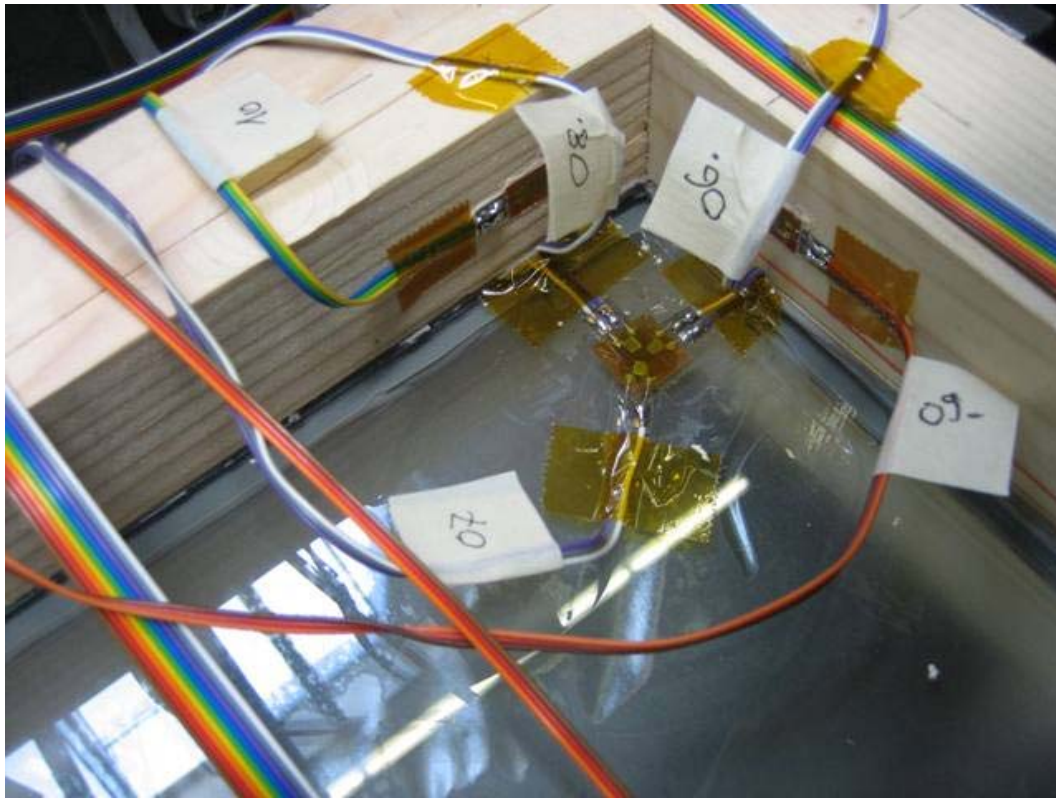


Abbildung 3.3 Aufkleben der Dehnmessstreifen und Verkabelung

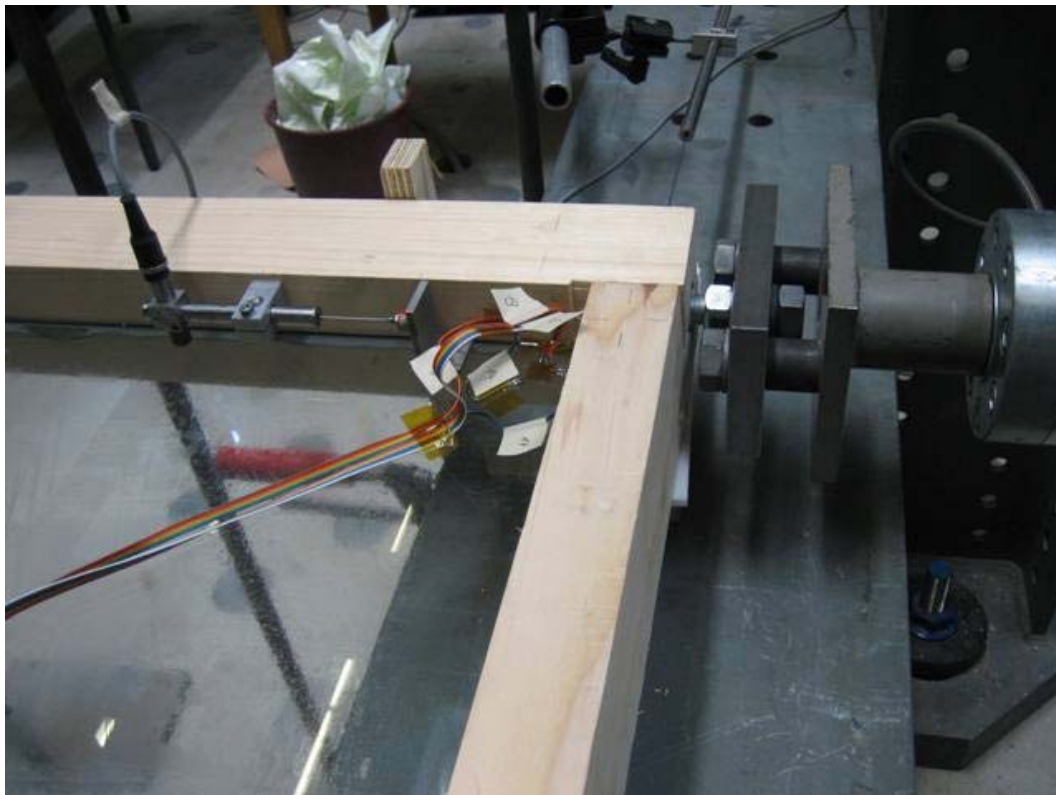


Abbildung 3.4 Dehnmessstreifen und induktiver Wegaufnehmer

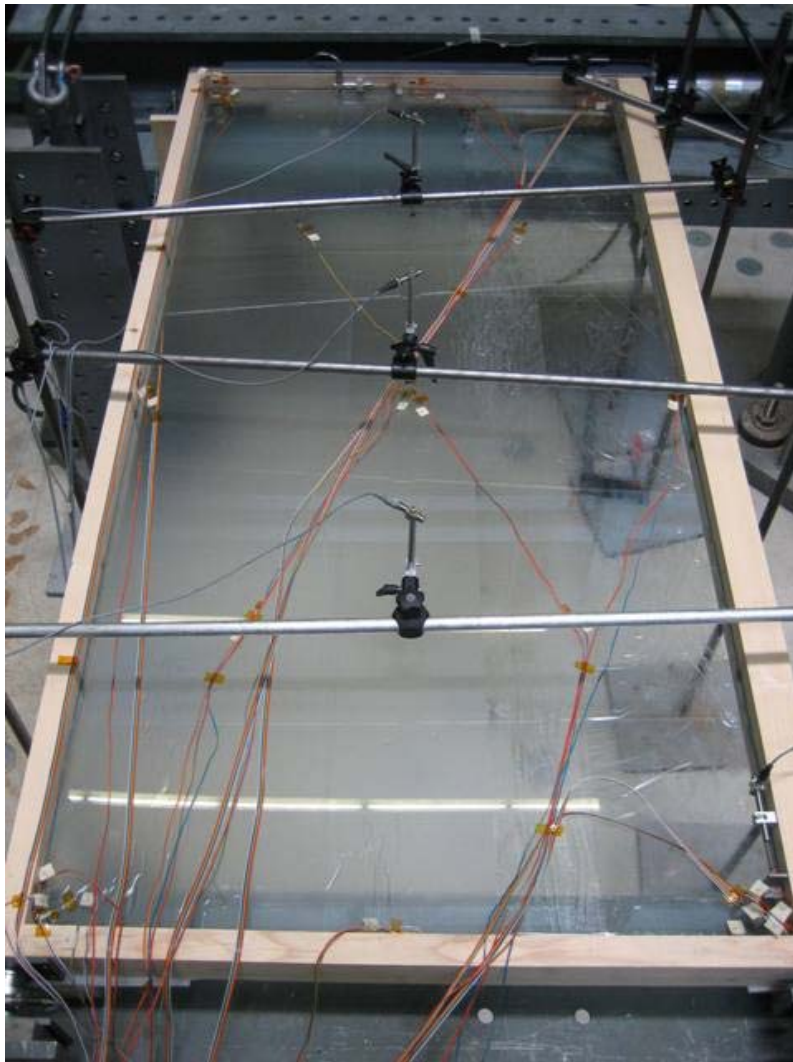


Abbildung 3.5 Versuchkörper im Prüfstand

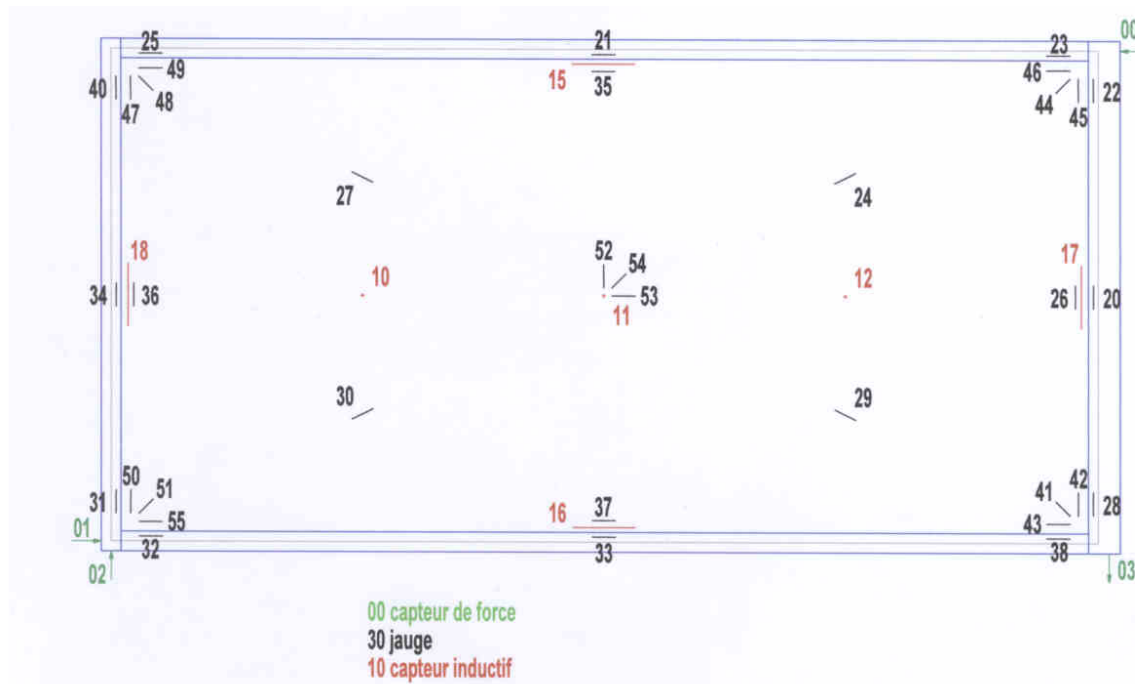


Abbildung 3.6 Position der Messtechnik exemplarisch; capteurs de force = Kraftmessdose, jauge = Dehnmessstreifen, Capteur inductif = induktiver Wegaufnehmer

Die Messtechnik wurde nach den technischen Herstellervorgaben kalibriert und im Vorlauf jedes Versuchs getestet. Für die Dehnmessstreifen wurden zusätzlich Kompensationsmessstreifen zum Ausgleich der Temperaturschwankungen angebracht.

Die Messwerte wurden mit Hilfe der Software Labview und einem eigens für die Versuche programmierten File aufgezeichnet, um anschliessend eine Auswertung mit dem Tabellenkalkulationsprogramms MS Excel durchführen zu können.

3.1.1.1 Prüfkörper Typ „A“

Die Prüfkörper vom Typ „A“ wurden aus Einscheibensicherheitsglas mit einer Stärke von 5mm hergestellt. Die Holzprofile weisen Abmessungen von 50mm x 50mm auf, für das Verankerungsprofil wurden Hölzer mit den Abmessungen 50mm x 80mm verwendet, um ausreichenden Randabstand für den INDUO-Anker zu haben.

Die Abbildungen zeigen Schnitte durch die Prüfkörper vom Typ „A“.

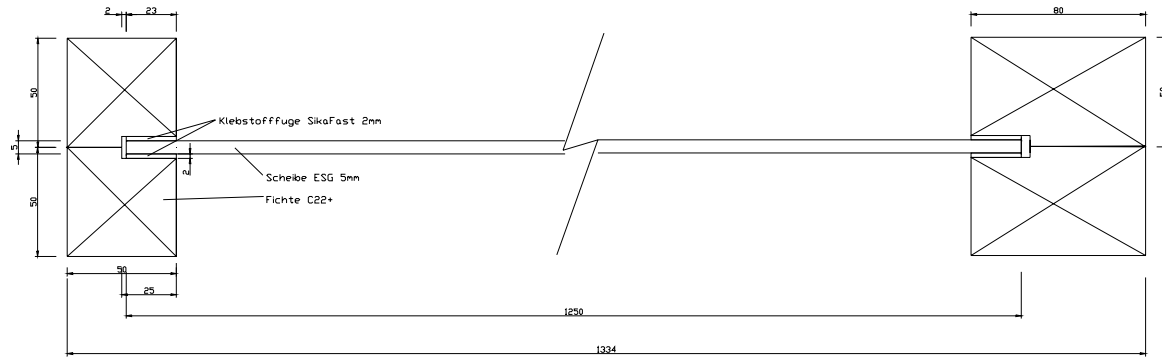


Abbildung 3.7 Schnitt durch die Bauteillängsachse; alle Masse in [mm]

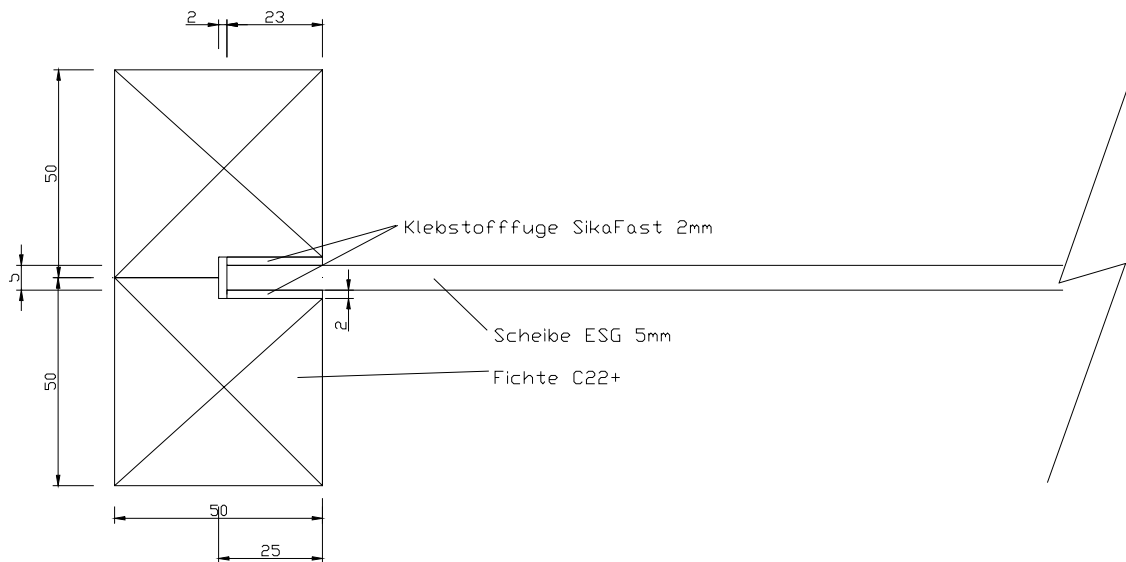


Abbildung 3.8 Verklebungsdetail am Randverbund; alle Masse in [mm]

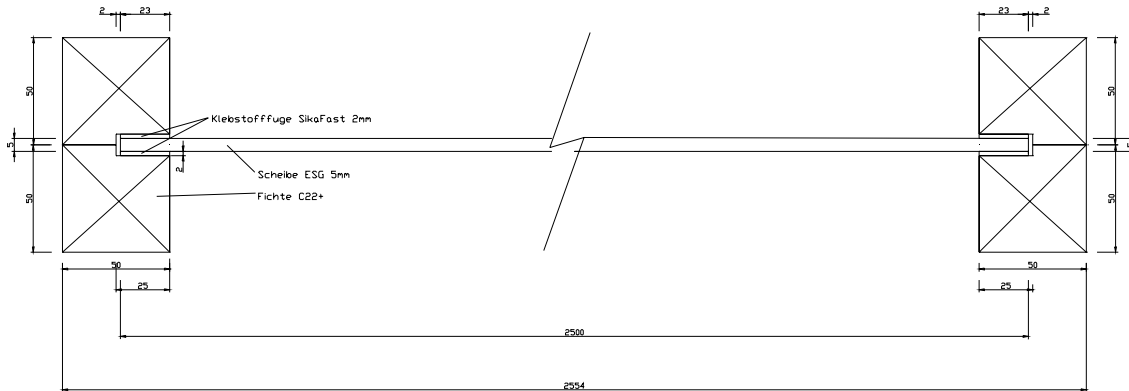


Abbildung 3.9 Schnitt durch die Elementquerachse; alle Masse in [mm]

Für die Versuche mit den Probekörpern vom Typ „A“ und der Lasteinleitung über die lange Bauteilseite ändert sich die Lage der Profile 80mm x 50mm analog zur Lasteinleitung, da die Zugverankerung (Einbringen des INDUO-Ankers) entsprechend an der kurzen Bauteilseite eingebracht wird.

3.1.1.2 Prüfkörper Typ „B“

Die Prüfkörper vom Typ „B“ wurden aus Verbundsicherheitsglas (VSG) 2x 5mm (TVG) mit 1,54mm PVB-Zwischenfolie hergestellt. Der aufgeklebte Holzrahmen bestand rundherum aus Profilen mit den Abmessungen 80mm x 80mm. Das Vorgehen zur Herstellung und der Versuchsaufbau ist identisch mit den Versuchen des Typs „A“. Die folgenden Skizzen beschreiben die Schnitte der Probekörper vom Typ „B“.

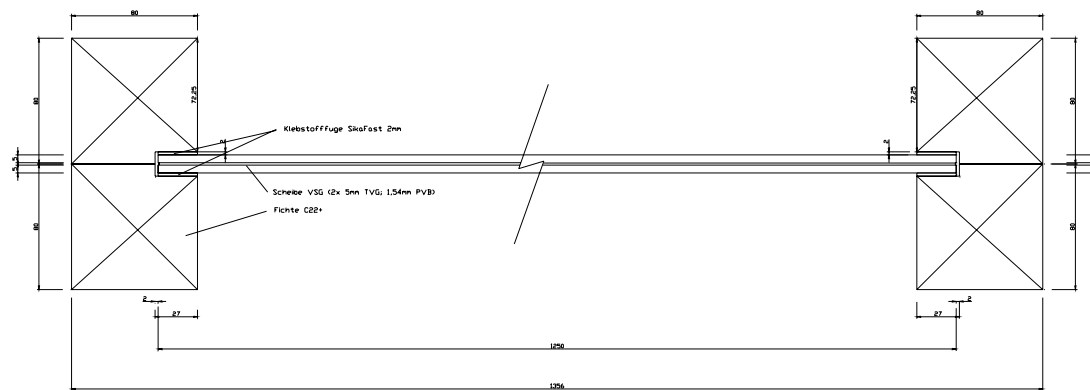


Abbildung 3.10 Schnitt durch die Bauteillängsachse; alle Masse in [mm]

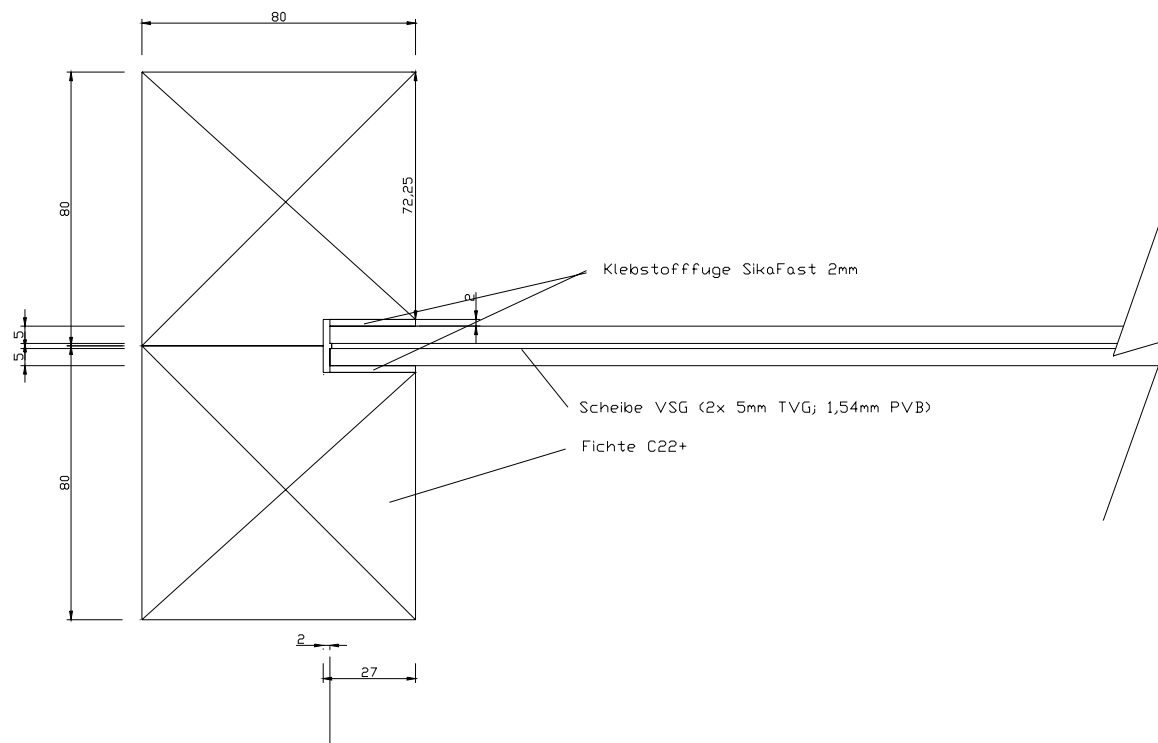


Abbildung 3.11 Detail der Verklebung des Randverbunds; alle Masse in [mm]

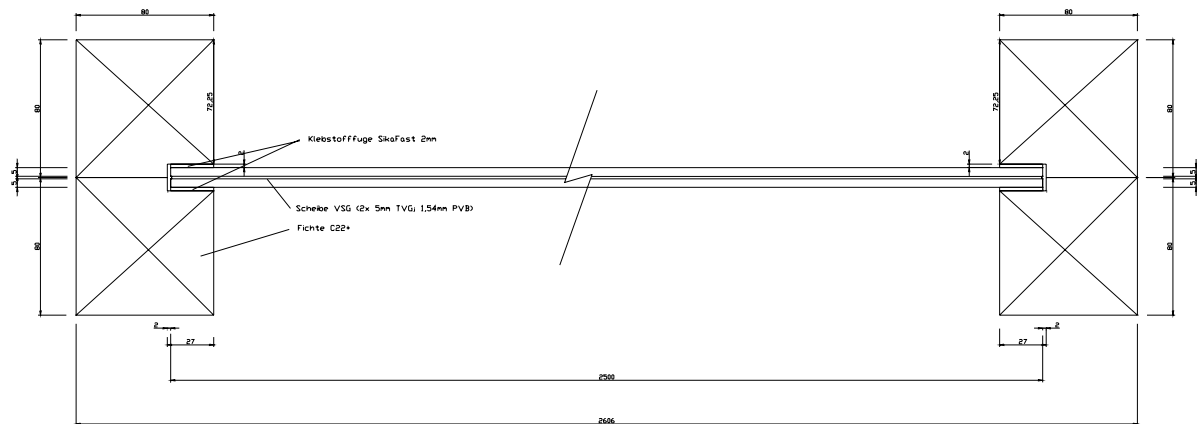


Abbildung 3.12 Schnitt durch die Bauteilquerachse; alle Masse in [mm]

3.1.1.3 Prüfkörper Typ „C“

Der Prüfkörper C unterscheidet sich von den Prüfkörpern „A“ und „B“ durch eine unterschiedliche Geometrie, andere Holzquerschnitte und eine andere Glasdicke.

Die Glasscheiben haben die Abmessungen 2x3m, die Kanthölzer 80/80mm und die Scheibendicke ist 2x4mm.

3.1.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsstand am IBOIS besteht aus hochfesten Stahlprofilen (I- Profile), welche mit dem Funktionsboden fest verschraubt sind. Die Probekörper werden horizontal mit 3 Auflagern in Scheibenebene und einer Fixierung der Holzrahmen orthogonal zur Scheibenebene (Lasteinleitung und Schwellenprofil) gehalten. Abbildung 3.13 zeigt den Versuchskörper im Versuchstand.



Abbildung 3.13 Versuchkörper im Prüfstand

Das Aufbringen der Last erfolgt durch eine hydraulische Presse, welche die Last über ein kontinuierlich am Kopfprofil verschraubtes U-Profil aus Stahl einleitet. Hierbei wurde für die Langzeitbelastungen eine automatische Pressensteuerung verwandt, bei den Kurzzeitversuchen kam eine manuelle Pressensteuerung zum Einsatz. Die Versuche wurden kraftgesteuert mit einer gleichmässigen Laststeigerung von ca. 0,25 kN/sek durchgeführt. Bei der manuellen Steuerung kam es zu maschinenbedingten Abweichungen.

3.1.3 Messtechnik

Die Verformungen, Dehnungen und aufgebrachten Lasten wurden während der Versuche mit Hilfe eines Vielstellenmessgerätes (UPM60) aufgezeichnet. Aufzeichnungsintervall war bei den Kurzzeitversuchen jeweils alle zwei Sekunden, bei den Langzeitversuchen alle 60 Sekunden.

3.1.3.1 Dehnmessstreifen

Die Dehnmessstreifen der Firma HBM wurden nach Herstellerangaben auf das Glas und die Holzprofile aufgebracht. Die Funktion wurde vor den Versuchen überprüft. Um Temperaturschwankungen auszugleichen, wurden Referenzstreifen an einer unbelasteten Scheibe angebracht um Kompensationswerte zu erhalten.

3.1.3.2 Induktive Wegaufnehmer

Um Verschiebungen bei den Versuchen messen zu können, wurden induktive Wegaufnehmer angebracht, die die Verschiebung eines Punktes auf dem Versuchskörper mit einem Referenzpunkt bestimmen. Hierbei wurden zum einen die Verschiebungen des Prüfkörpers zu starren Punkten der Umgebung aufgenommen, aber auch Relativverschiebungen auf dem Prüfkörper, wie beispielsweise die Verschiebungen der Holzprofile relativ zur Glasscheibe, um auf die Klebefugenbelastung rückschliessen zu können.

3.1.3.3 Kraftmessdosen

An den drei Auflagern sowie an der Lasteinleitung wurden Kraftmessdosen angebracht um die tatsächlich übertragenen Lasten genau bestimmen zu können. Mit Hilfe des Kräftegleichgewichts am Gesamtprüfkörper können somit Reibungsverluste, bzw. Kräfte, die durch die orthogonale Fixierung der Probekörper entstanden sind, rückgerechnet werden.

3.1.3.4 Film / Foto

Neben der Aufzeichnung der Versuchsmesswerte wurden die Versuche durch Fotos und Filmaufnahmen dokumentiert. Bei der Auswertung der Messergebnisse können so Auffälligkeiten im Versuchsablauf zugeordnet werden.

3.1.4 Ergebnisauswertung

3.1.4.1 Ermittlung der Schubspannungen in der Klebefuge zwischen Holzrahmen und Glasscheibe

Die Spannungen in der Klebefuge werden rückgerechnet aus den gemessenen Relativverschiebungen zwischen Holzrahmen und Glasscheibe, siehe Abbildung 3.14.

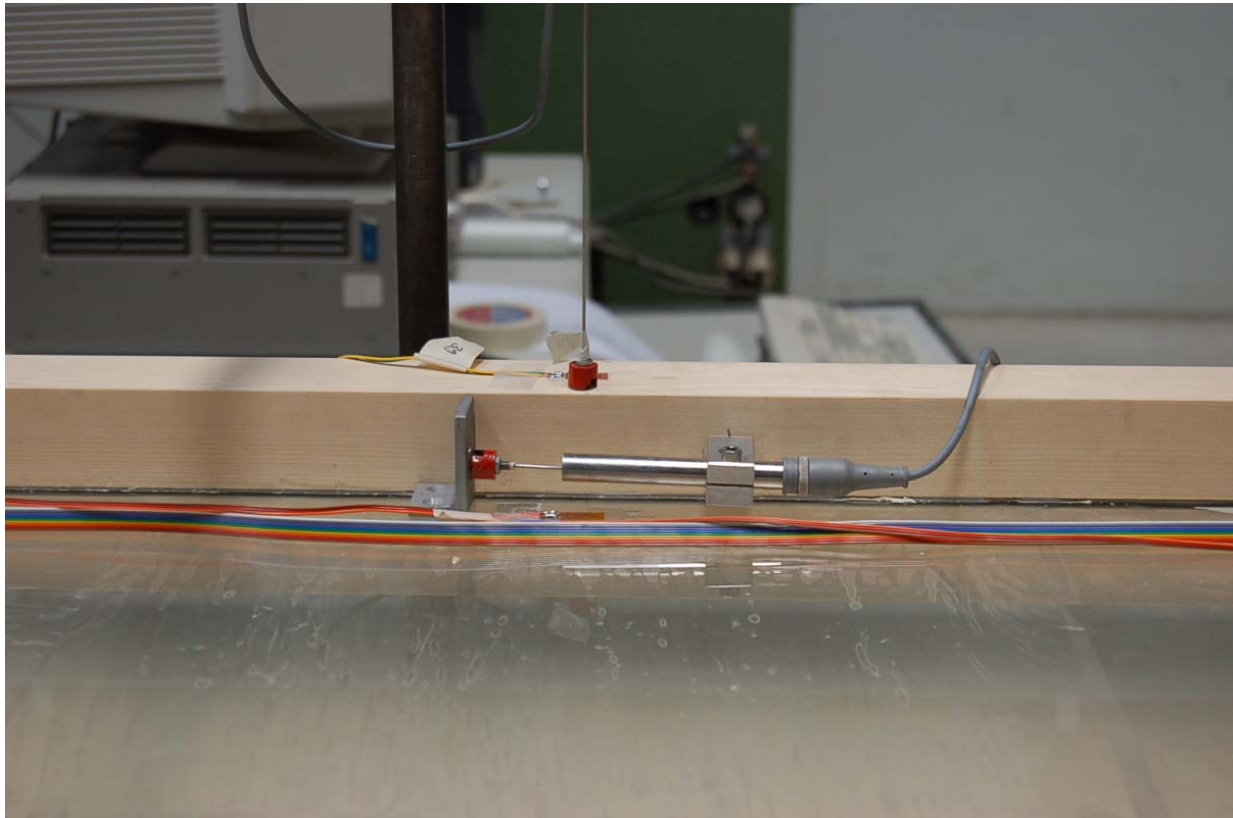


Abbildung 3.14 induktiver Wegaufnehmer auf Holzrahmen und Gegenstück auf Glasscheibe befestigt

Die 2mm dicke Klebefuge wird geschert, der Scherwinkel g ergibt sich aus Relativverschiebung und Fugendicke durch trigonometrische Zusammenhänge (Abbildung 3.15):

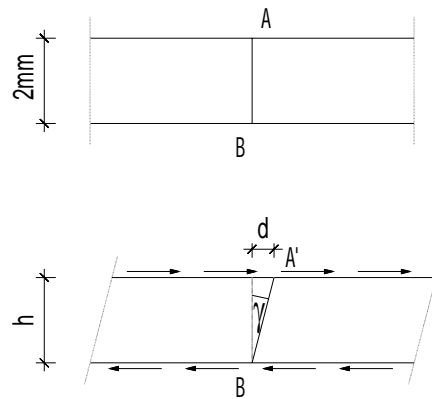


Abbildung 3.15 trigonometrischer Zusammenhang der Scherverformung

Es folgt:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{d}{h}\right) \quad (1)$$

Anhand der vom Klebstoffhersteller zur Verfügung gestellten Zugscherversuchsergebnisse wird die Scherspannung in der Klebefuge ermittelt. Wie aus Abbildung 3.16 zu ersehen ist, besteht kein linearer Zusammenhang zwischen eingeleiteter Kraft und resultierender Verformung.

Aus diesem Grund wird die gemittelte Kurve aus den drei Versuchen in mehrere Bereiche unterteilt, innerhalb derer man die Kurve durch lineare Geraden annähert. Für jeden dieser Bereiche wird der Schubmodul gemäss der Gleichung

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

ermittelt.

Neben dem gemessenen Winkel γ benötigt man hierzu noch den Wert für die Schubspannung τ . Dieser ergibt sich aus eingeleiteter Kraft und beanspruchter Fläche:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Die Fläche A der Versuchskörper errechnet man aus den in Abbildung 3.16 gegebenen Abmessungen. Ebenfalls aus dieser Abbildung entnimmt man die eingeleitete Kraft von der y-Achse.

Es ergibt sich folgende Ergebnistabelle (Tabelle 3.1) mit ermittelten und errechneten Zwischenschritten:

	d [mm]	γ [rad]	F [N]	$T_{\text{Hersteller}}$ [N/mm ²]	G [N/mm ²]	Gleichung für $T_{\text{Holz-Glas}}$ [N/mm ²]
1	0.3	0.197	200	0.64	3.2	$3.2 \cdot \gamma$
2	0.55	0.351	500	1.60	6.4	$6.4 \cdot (\gamma - 0.197) + 0.64$
3	1.1	0.633	1000	3.20	5.7	$5.7 \cdot (\gamma - 0.351) + 1.6$
4	2.0	0.927	1450	4.64	4.8	$4.8 \cdot (\gamma - 0.633) + 3.2$
5	3.0	1.107	1750	5.60	5.3	$5.3 \cdot (\gamma - 0.927) + 4.64$
6	3.9	1.204	2000	6.40	8.9	$8.9 \cdot (\gamma - 1.107) + 5.6$

Tabelle 3.1 Klebstoffverhalten

Mit der in der letzten Spalte angegebenen Gleichungen und den in den Versuchen errechneten Winkelverdrehungen γ errechnet man die in der Klebefuge der Holz-Glas-Versuchskörper vorhandene Schubspannung. Für Verformungen, die über den Werten der Tabelle liegen, wird ein konstanter Wert, der dem Maximalwert entspricht, angenommen, da in den Versuchen kein Klebstoffversagen beobachtet wurde.

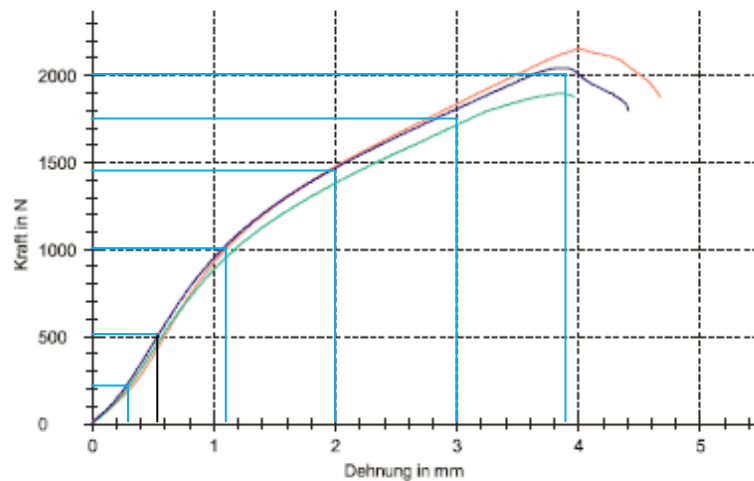


Kunde : Pierre
Prüfer : Majid
Prüfnorm : EN 1465
Prüfdatum : 24.05.2006
Bemerkungen :
Klebstoff : SF 5221 (24.05.2006-ABS)

Fügeteilwerkstoff :
Prüfgeschwindigkeit: 10 mm/min
Versuchsart : Zugscherversuch
Prüfklima : 23±1°C / 50±5% rel. Feuchte

Ergebnisse:

Nr	d mm	b0 mm	b mm	F _{max} N	γ _{max} %	ε·F _{max} mm	T _{max} N/mm ²	W Fmax Nm
1	1,5	25	12,5	2152,32	311,59	4,01	6,69	5,35
2	1,5	25	12,5	1893,39	264,41	3,85	6,06	4,69
3	1,5	25	12,5	2042,08	293,98	3,87	6,53	5,04



Statistik:

Serie	F _{max} N	γ _{max} %	ε·F _{max} mm	T _{max} N/mm ²	W _{Bruch} Nm
n = 3					
x	2029,27	289,99	3,91	6,49	5,90
s	129,94	23,84	0,09	0,42	0,91

SF 5221 (24.05.2006-ABS),ZSE

Abbildung 3.16 Zugscherversuch des Klebstoffherstellers mit dem verwendeten Klebstoff

3.1.4.2 Ermittlung der Spannungen im Glas an den Stellen der DMS-Rosetten

In den vier Ecken der Glasscheiben werden die Dehnungen mit Dehnmessrosetten (DMS-Rosetten) gemessen. Der hier verwendete Typ sind Fächerrosetten von HBM, siehe Abbildung 3.17 und Abbildung 3.18 im eingebauten Zustand.

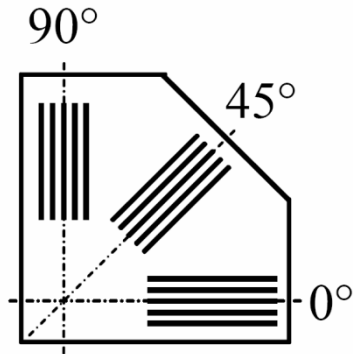


Abbildung 3.17 DMS-Fächerrosette

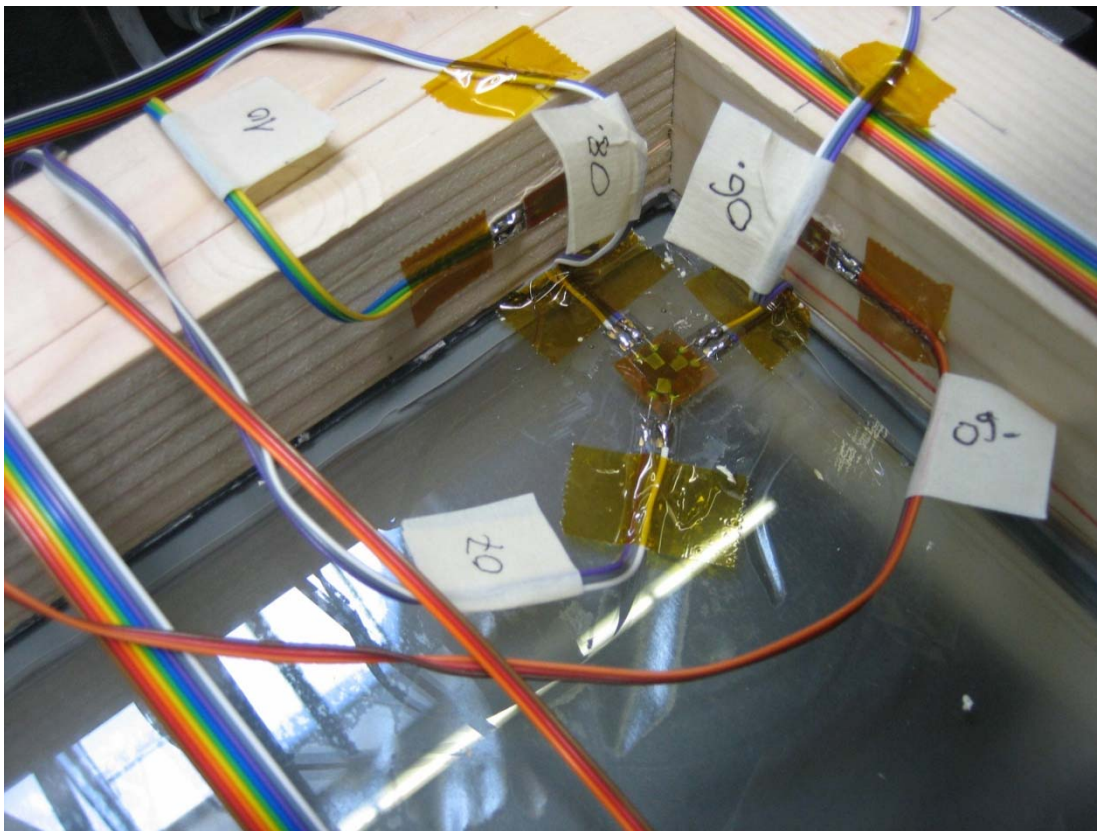


Abbildung 3.18 DMS-Fächerrosette im eingebauten Zustand

Aus den drei einzelnen DMS pro Rosette, wovon zwei senkrecht aufeinander stehen und die dritte auf der Winkelhalbierenden zwischen diesen, lassen sich die Hauptspannungen und der Winkel der Hauptspannungen errechnen, Abbildung 3.19 Bezeichnungen und Nummerierungen der Rosette zeigen die Achsenbezeichnungen, Winkelbenennungen und jeweiligen Nummerierungen.

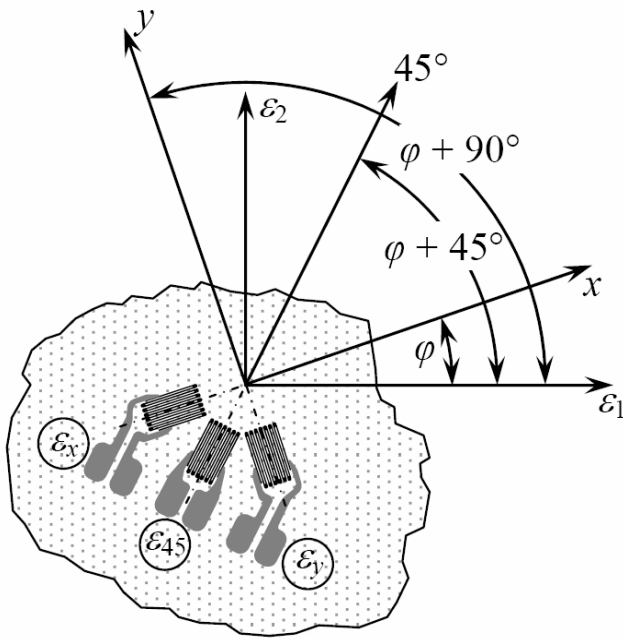


Abbildung 3.19 Bezeichnungen und Nummerierungen der Rosette

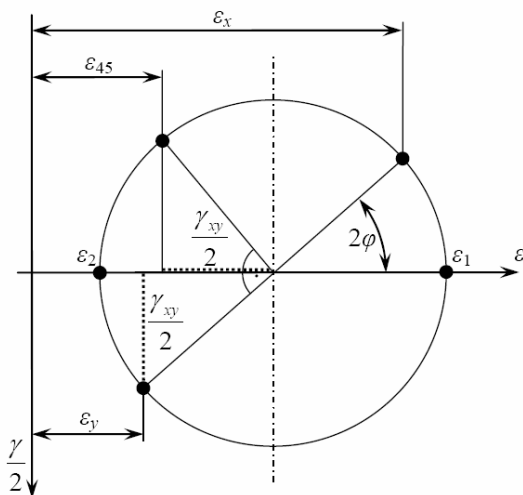


Abbildung 3.20 Mohr'scher Dehnungskreis

Der Winkel errechnet sich gemäß der Gleichung

$$\tan 2\rho = \frac{\frac{\gamma_{xy}}{2}}{\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}} = \frac{\epsilon_x - \epsilon_y - 2\epsilon_{45}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (4)$$

Über den Mohr'schen Dehnungskreis (Abbildung 3.20) lassen sich die Hauptdehnungen berechnen:

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_{45})^2 + (\epsilon_y - \epsilon_{45})^2} \quad (5)$$

Da man beim Werkstoff Glas von elastisch, isotropem und homogenem Material ausgeht, gelten für die Hauptspannungen folgende Formeln:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_1 + \nu \cdot \epsilon_2) \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_2 + \nu \cdot \epsilon_1) \quad (7)$$

Durch Einsetzen der oben errechneten Hauptdehnung (5) in (6), bzw. (7) folgt für die Hauptspannungen

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2} \left(\frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{1-\nu} \pm \frac{\sqrt{2}}{1+\nu} \sqrt{(\epsilon_x + \epsilon_{45})^2 + (\epsilon_{45} - \epsilon_y)^2} \right) \quad (8)$$

3.2 Numerische Simulation

Zur Vordimensionierung und zur Nachrechnung der Versuche wurden mit Hilfe eines Finite-Elemente-Programms (RFEM2 der Firma Dlubal) umfangreiche Modelle erstellt, welche das Trag- und Materialverhalten der Versuche und der Elemente in der Realität beschreiben sollen. Die numerische Simulation von Versuchen zeigt die Möglichkeit auf, in welchem Masse die zur Vereinfachung des realen Materialverhaltens getroffenen Annahmen realitätsgetreue Messergebnisse erzeugen. Die Vielfältigkeit unterschiedlicher Methodik, Stoffgesetze und Vereinfachungen eröffnen hier ein sehr weites Feld an Möglichkeiten.

Nachfolgend sollen Informationen Aufschluss über das Vorgehen und die angewendeten unterschiedlichen Lösungsansätze geben.

3.2.1 Modellierung der Materialeien Holz und Glas

Um die Materialeigenschaften der Materialien Holz und Glas numerisch simulieren zu können, wurden unterschiedliche Modelle erstellt. Das Material Holz wurde zunächst als Stabelement mit zugewiesenen Querschnittsabmessungen mit den aus der Materialbibliothek voreingestellten Materialkennwerten für Nadelholz der Klasse C22 definiert. In weiteren Modellen wurden die Kennwerte modifiziert (Variation E-Modul) um den Einfluss auf die Versuchsergebnisse zu studieren. Für eine genauere Einstellung und eine detaillierte Abbildung des Kontaktproblems mit anderen Materialien (Klebstoff) wurden Volumenelemente für den Werkstoff Holz gewählt. Die Materialeigenschaften wurden erneut zur Studie des Einflusses variiert.

Der Werkstoff Glas liegt nicht standardmässig in der Materialbibliothek des Programms RFEM2 vor. Aus diesem Grund wurde das Material zur Berechnung mit folgenden Kennwerten eingetragen:

- E-Modul $E = 75000 \text{ N/mm}^2$
- Querkontraktionszahl $\nu = 0,24$

Zunächst wurden Flächenelemente mit zugewiesener Flächendicke zur Berechnung eingesetzt. Um die Berechnung zu präzisieren und das Kontaktproblem zwischen Klebstoff und Glas genauer zu erfassen, wurden anschliessend ebenfalls Volumenelemente eingesetzt, bei denen die Werkstoffkennwerte ebenfalls variiert werden konnten.

3.2.2 Darstellung der Klebefuge bzw. des Materials Klebstoff

Um die Verbindung der Materialien Holz und Glas abzubilden, wurden zunächst zur Kopplung der Elemente Federn mit zugewiesenen Federkennwerten (entsprechend der Elastizität des Klebstoffes) eingesetzt.

In einem weiteren Schritt wurden den Flächen unterschiedliche Kontaktkriterien zugewiesen nach den Eingabemöglichkeiten des Programms (elastische Mohr-Coulomb-Reibung, erweiterte Mohr-Coulomb-Reibung mit Begrenzung, elastischer Haft- und Reibungsverbund, mit Variation der Grenzwerte).

Um das Kontaktproblem zu präzisieren, kamen in einem nächsten Schritt ebenfalls Flächenelemente für die Abbildung des Klebstoffes zum Einsatz. Hierfür wurde für die Materialbibliothek das Material Klebstoff nach den Herstellerangaben der Firma SIKA erstellt.

Um eine komplette dreidimensionale Darstellung zu ermöglichen, wurde die Klebstofffuge mit Volumenelementen des Materials Klebstoff diskretisiert. Eine Berechnung mit variablen

Klebstoffkennwerten konnte den Einfluss der Materialparameter auf die Simulation verdeutlichen.

Um die Klebstoffuge genauer einstellen zu können, wurde zusätzlich zu der Variation der Werkstoffeigenschaften der Volumenelemente noch die Kontakthypothese der Kontaktflächen nach den Eingabemöglichkeiten (Mohr-Coulomb-Hypothese, erweiterte Mohr-Coulomb-Hypothese, elastischer Haft- und Reibungsverbund, mit Variation der Grenzwerte) variiert.

Die Simulation der Auflager wurde zunächst durch Flächen-, bzw. Kontenlager abgebildet. In einem weiteren Rechengang wurden Lastverteilungsplatten an den Auflagern modelliert, um die Versuche so realitätsgetreu wie möglich abbilden zu können. Die Lasteinleitung wurde durch ein Stahl U-Profil, welches kontinuierlich mit dem Kopfprofil verbunden ist, modelliert.

Die orthogonalen Halterungen wurden als Linien, bzw. Punktlager wie in Realität abgebildet.

Die Berechnung des FE-Modells erfolgte nach Theorie 2. Ordnung, das Eigengewicht wurde als Vorverformung angesetzt.

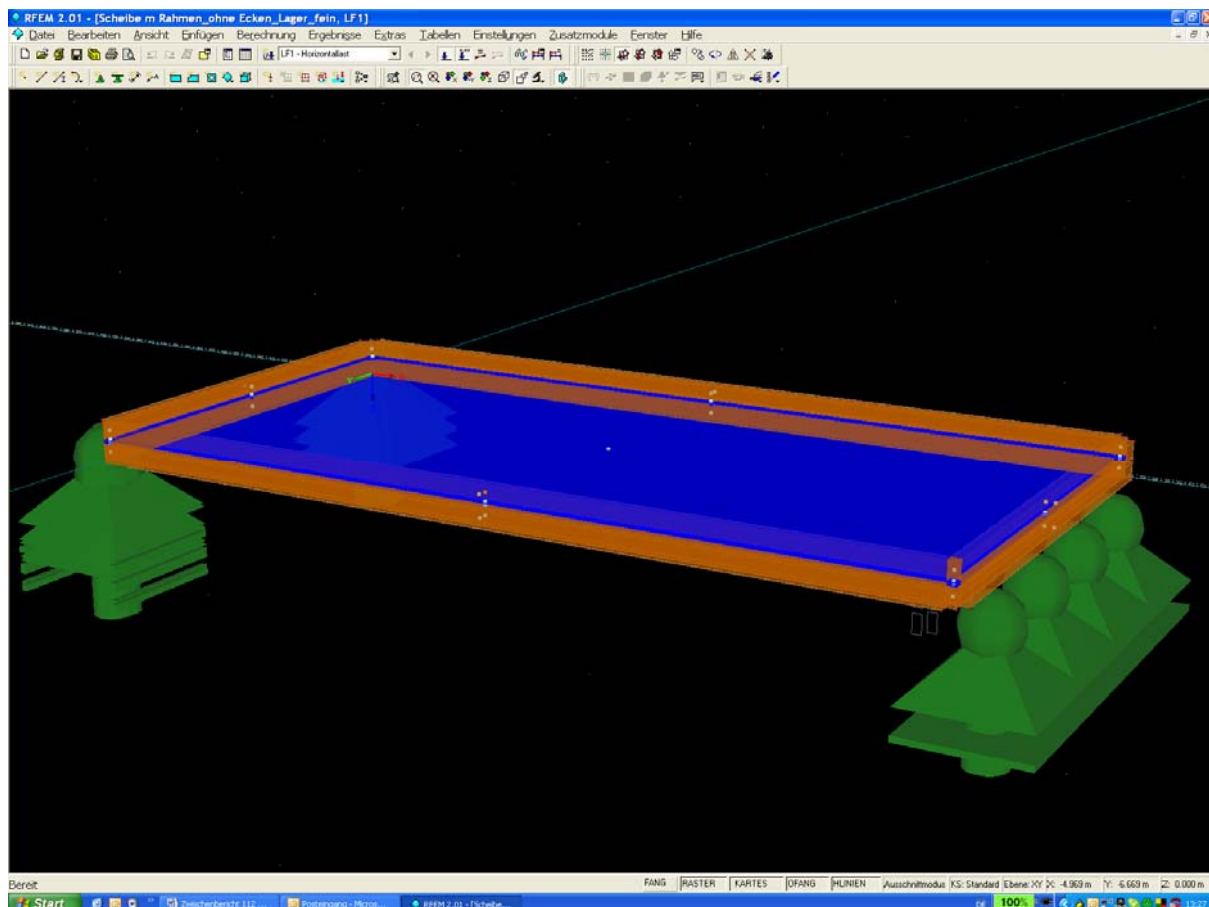


Abbildung 3.21 3D-Ansicht eines FE-Modells

Die Ergebnisse der numerischen Simulation sind aufgrund der Ausgabe des Programms (Spannungen und Verformungen in alle Koordinatenrichtungen, sowie Hauptspannungen) und der Aufarbeitung der Messdaten direkt miteinander zu vergleichen.

Zur Überprüfung der Vorgehensweise empfiehlt es sich, die Menüpunkte und die Lösungsalgorithmen des Programms RFEM2 3D zu studieren.

4 Ergebnisse

4.1 Laborversuche

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Laborversuche dargestellt. Beispielhaft sind die Ergebnisse eines Versuchs des Typs „A“ detailliert dargestellt, die Werte der anderen Versuche sind in einer Tabelle zusammengefasst.

4.1.1 Ergebnisse Typ „A“, Lasteinleitung über kurze Seite

Die Versuchsreihe A wurde als erste durchgeführt, die Elemente der Abmessungen 2,55m x 1,3m wurden horizontal getestet, die Last über die kurze Geometrieseite eingeleitet. Diagramm 4.1 zeigt exemplarisch die Verschiebung des Kopfprofils in Funktion der eingeleiteten Last.

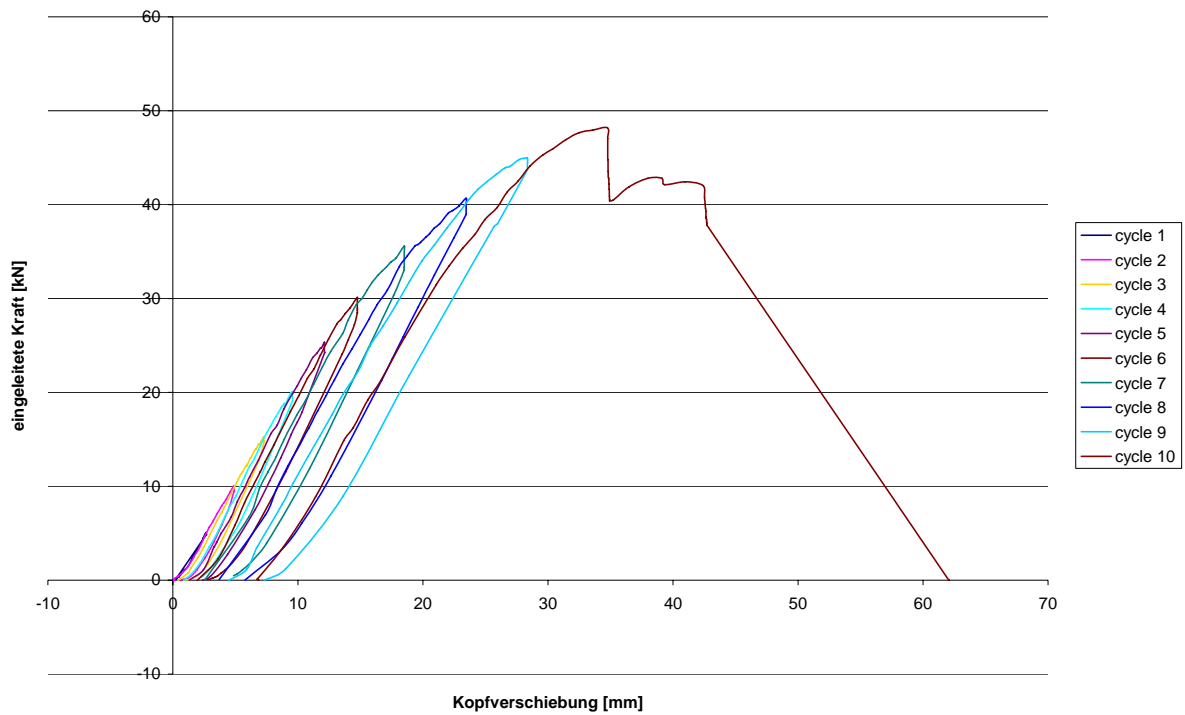


Diagramm 4.1 Kraft-Verschiebungsdiagramm (Pressenlast / Kopfverschiebung des Elements)

Es wurden insgesamt 10 Zyklen gefahren. Auswertungskriterium sind die Dehnungen (Spannungen) der Materialien; diese sind in der folgenden Illustration zusammengestellt.

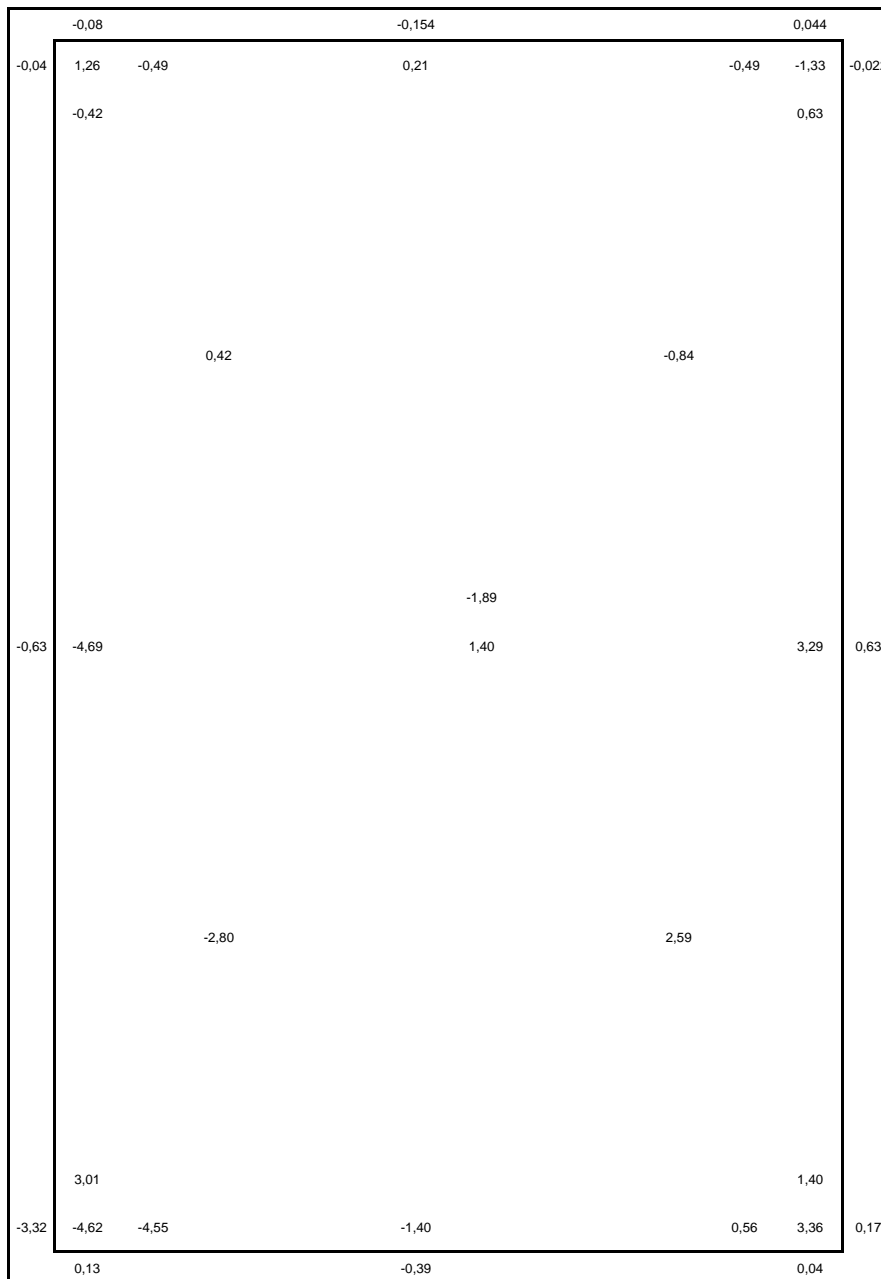


Abbildung 4.1 Visualisierung der Materialspannungen in Längsrichtung der Dehnmessstreifen in $[N/mm^2]$

Alle Werte stellen die Spannung $[N/mm^2]$ in Richtung der Längsachse der aufgeklebten Dehnmessstreifen dar (vergl. Abbildung 4.1), Lastniveau ist 10kN Pressenlast.

Um die Belastung der Klebefuge und die Verteilung der Lasteinleitung bestimmen zu können, wurde die Relativverschiebung zwischen Holzprofil und Glasscheibe mittels eines induktiven Wegaufnehmers bestimmt. Das folgende Diagramm zeigt die daraus resultierende

Schubbelastung der Klebstoffuge in Längsrichtung des Holzprofils am Zuganker, in der Mitte des Prüfkörpers (bei 1,25m Bauteilhöhe).

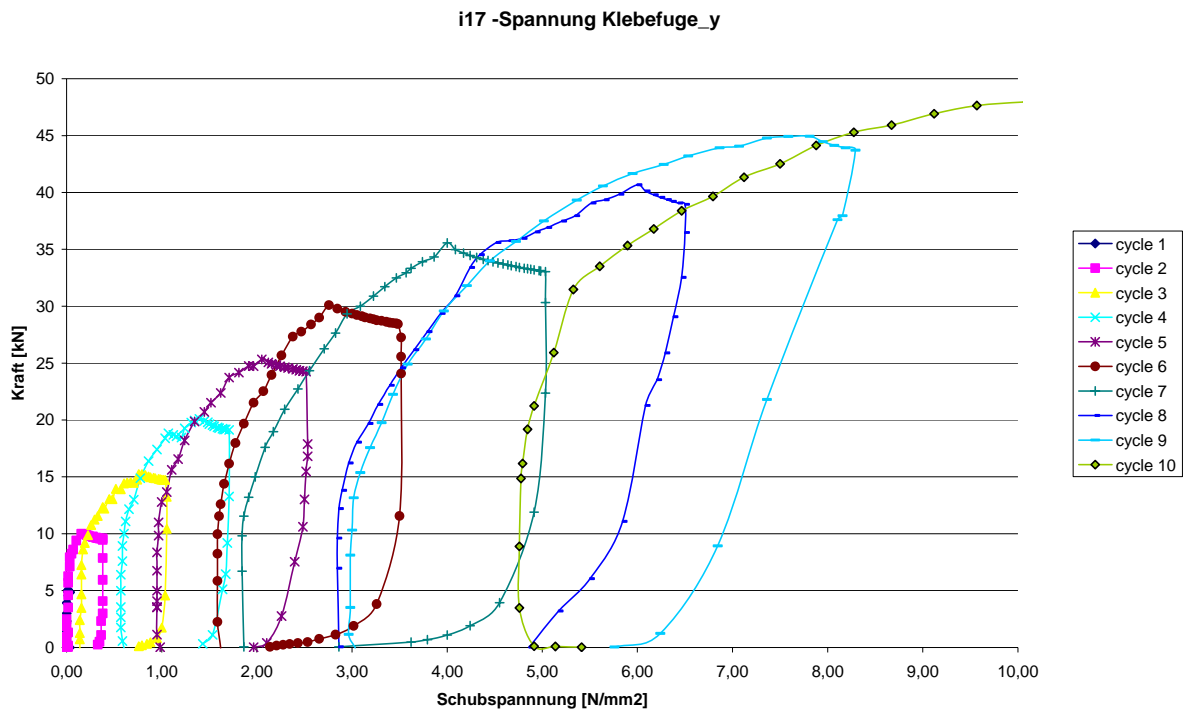


Diagramm 4.2 Schubspannung in der Klebefuge; Mitte des Zugprofils in Funktion der Pressenlast

Es ist auffällig, dass hier die Relativverschiebungen und somit die rückgerechneten Spannungen teilweise nicht reversibel sind. Diese plastischen Verformungen entsprechen nicht einem ideal elastischen Werkstoffverhalten des Klebstoffs.

Beim ersten der insgesamt drei Versuche dieser Versuchsreihe war ein sehr starkes Ausknicken der langen gedrückten Elementseite zu sehen, die schliesslich auch den Bruch des Elements verursachte. Durch eine zusätzliche vertikale Lagerung des Elements am Kopfprofil wurde diese Bewegung in den Folgeversuchen behindert.

Die folgende Tabelle zeigt die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der drei Versuche des Typs „A“ mit Lasteinleitung über die kurze Elementseite:

	Probekörper		
Auswertungskriterium	1	2	3
Kopfverschiebung 10kN [mm]	4,84	6,33	8,34
Kopfverschiebung 20kN [mm]	9,57	12,22	13,51
Kopfverschiebung 30kN [mm]	14,73	20,31	19,52
Kopfverschiebung 40kN [mm]	34,76	37,91	30,81
Fugenspannung_17 10kN [N/mm2]	0,12	0,29	1,81
Fugenspannung_17 20kN [N/mm2]	1,62	2,05	4,78
Fugenspannung_17 30kN [N/mm2]	3,38	4,09	9,09
Fugenspannung_17 Bruch [N/mm2]	7,28	7,93	28,60
Fugenspannung_15 10kN [N/mm2]	0,16	0,33	0,50
Fugenspannung_15 20kN [N/mm2]	1,40	1,22	1,86
Fugenspannung_15 30kN [N/mm2]	3,93	2,81	3,41
Fugenspannung_15 Bruch [N/mm2]	10,55	10,76	6,17
Last bei h/500	9,87	7,04	4,9
Fugenspannung_17 bei h/500 [N/mm2]	0,22	0,26	0,26
Versagen bei [kN]	48,19	40,77	40,57
Versagensart	Knicken Druckstab	Knicken Druckstab	Auflagerpressung
Glasspannung Maximal [N/mm2]	70,36	100,31	170,59
Holzspannung Maximal [N/mm2]	18,36	6,08	nicht realistisch
Klebefugenspannung Maximal [N/mm2]	9,89	12,08	25,03

Tabelle 4.1 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse Typ „A“ Lasteinleitung über die kurze Seite

4.1.2 Ergebnisse Typ „A“, Lasteinleitung über lange Seite

In einer zweiten Versuchsreihe wurden Elemente mit den gleichen Abmessungen (Typ „A“) mit Lasteinleitung über die lange Bauteilseite getestet. Die Lasteinleitung erfolge wie zuvor über ein U-Profil aus Stahl, die Zugverankerung der kurzen Bauteilseite wurde wie zuvor mit einem INDUO Ankersystem und Holzprofilen mit den Abmessungen 2x 50mm x 80mm realisiert.

Um Aussagen über das Kriechverhalten der Materialien treffen zu können, wurde ein Probekörper einer Dauerbelastung bei unterschiedlichen Laststufen unterzogen. Die Last wurde jeweils solange aufgebracht, bis die Kopfverschiebung nicht mehr messbar zunahm.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Der Prüfkörper der Langzeitbelastung wurde anschliessend zu Bruch gefahren, die Ergebnisse sind folglich unter Berücksichtigung der Belastungsgeschichte zu interpretieren.

Auswertungskriterium	Probekörper		
	1 (zuvor Langzeit)	2	3
Kopfverschiebung 10kN [mm]	1,54	2,92	2,2
Kopfverschiebung 20kN [mm]	3,42	4,2	3,98
Kopfverschiebung 30kN [mm]	5,97	5,9	6,15
Kopfverschiebung 40kN [mm]	11,41	6,98	9,82
Fugenspannung_17 10kN [N/mm2]	0,42	0,01	0,38
Fugenspannung_17 20kN [N/mm2]	1,03	-	1,20
Fugenspannung_17 30kN [N/mm2]	2,33	-	3,20
Fugenspannung_17 Bruch [N/mm2]	7,80	-	8,30
Fugenspannung_15 10kN [N/mm2]	0,70	0,10	0,42
Fugenspannung_15 20kN [N/mm2]	2,80	0,90	0,99
Fugenspannung_15 30kN [N/mm2]	5,30	1,20	2,20
Fugenspannung_15 Bruch [N/mm2]	21,20	-	33,40
Last bei h/500	16,8	9,26	13,8
Fugenspannung_17 bei h/500 [N/mm2]	0,67	-	0,83
Versagen bei [kN]	73,14	81,61	85,2
Versagensart	Auflagerpressung	Auflagerpressung	Auflagerpressung
Glasspannung Maximal [N/mm2]	158,27	46	22,3
Holzspannung Maximal [N/mm2]	-	77,42	-
Klebefugenspannung Maximal [N/mm2]	7,5	35,2	40,5

Tabelle 4.2 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse Typ „A“ Lasteinleitung über die lange Seite

Im Folgenden wurde die Entwicklung der Kopfverschiebung bei gleich bleibender Last (unterschiedliche Lastniveaus) aufgezeigt, die Versuche wurden jeweils nach Stabilisierung der Verformungen beendet.

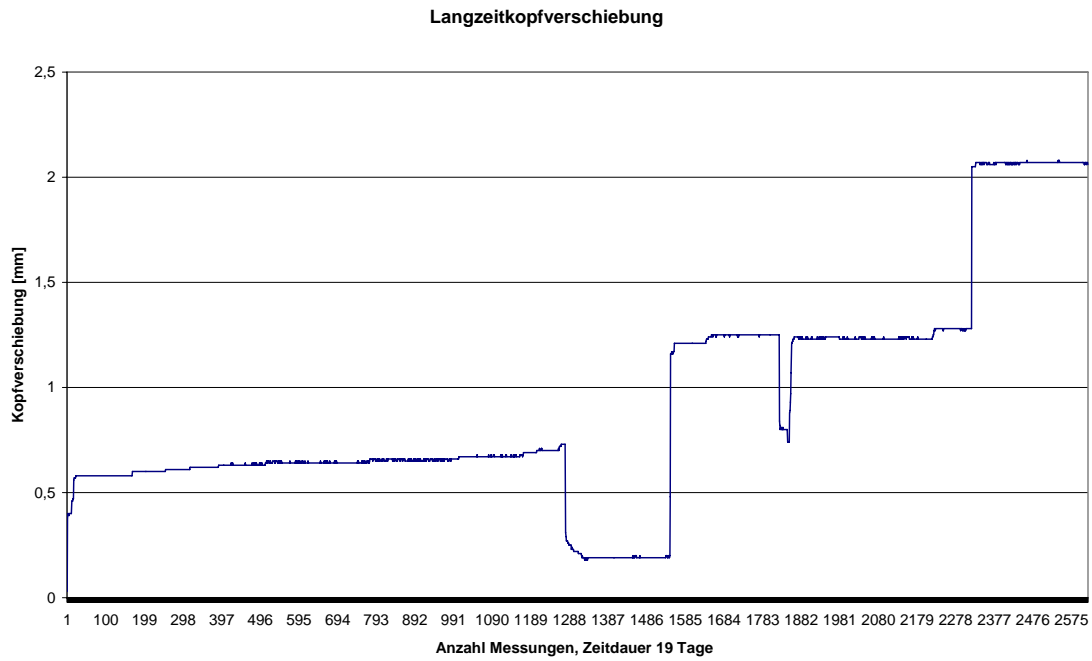


Diagramm 4.3 Entwicklung der Kopfverschiebung bei Dauerbelastung (Lastniveau 3 kN)

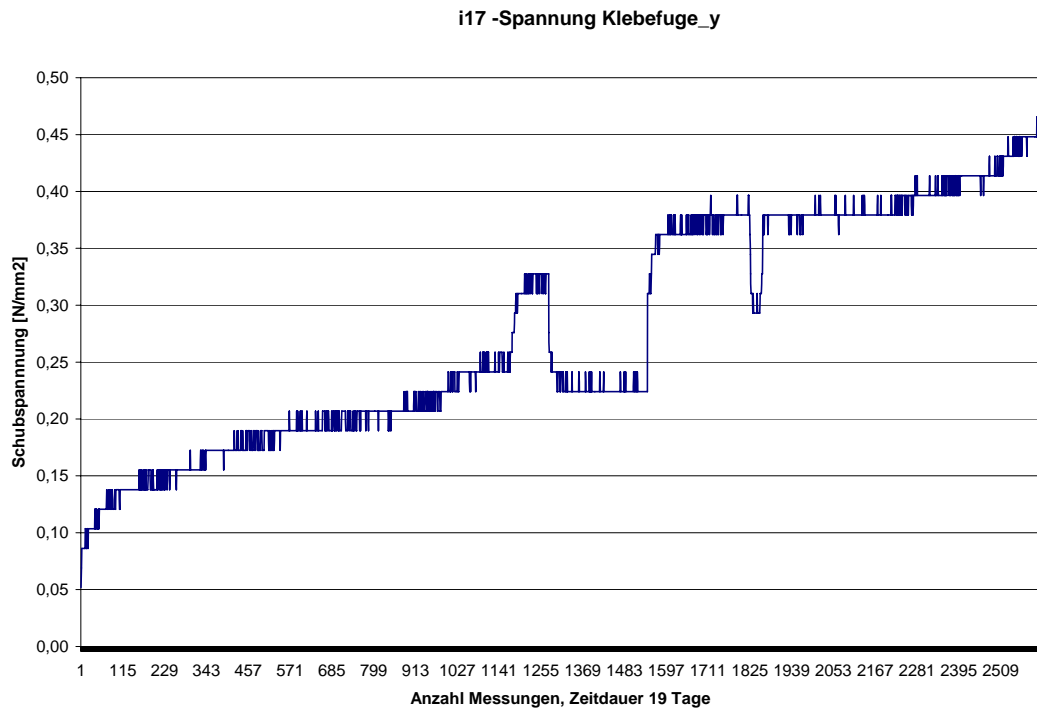


Diagramm 4.4 Entwicklung der Fugenspannung am Zuganker bei Dauerbelastung (Lastniveau 3 kN)

Es ist auffällig, dass bei relativ konstant bleibender Kopfverschiebung die Relativverschiebung zwischen Holz und Glas stetig zunimmt und eine Lastumlagerung im Element stattfindet. Der Klebstoff weist also ein ausgeprägtes zeitabhängiges Verformungsverhalten auf.

4.1.3 Ergebnisse Typ „B“, Lasteinleitung über lange Seite

Die Versuchserie wurde wiederum an den Elementen des Typs „B“ durchgeführt. Um den Versuchsstand nicht erneut umrüsten zu müssen, wurden die Versuche mit Lasteinleitung über die lange Seite vorgezogen.

Es wurden sowohl Langzeitversuche als auch Kurzzeitbelastungen durchgeführt.

Im Folgenden sind die Ergebnisse in Tabellenform dargestellt.

Auswertungskriterium	Probekörper		
	1	2	3 (zuvor Langzeit)
Kopfverschiebung 10kN [mm]	2,82	4,00	1,40
Kopfverschiebung 20kN [mm]	3,90	5,40	2,75
Kopfverschiebung 30kN [mm]	6,00	9,70	4,60
Kopfverschiebung 40kN [mm]	7,99	11,60	7,30
Fugenspannung_17 10kN [N/mm2]	0,17	0,03	0,00
Fugenspannung_17 20kN [N/mm2]	0,31	0,20	0,02
Fugenspannung_17 30kN [N/mm2]	0,60	0,35	0,04
Fugenspannung_17 Bruch [N/mm2]	5,80	0,69	0,74
Fugenspannung_15 10kN [N/mm2]	0,03	0,09	0,02
Fugenspannung_15 20kN [N/mm2]	0,07	0,12	0,08
Fugenspannung_15 30kN [N/mm2]	0,07	0,15	0,14
Fugenspannung_15 Bruch [N/mm2]	0,50	0,78	1,40
Last bei h/500	9,60	6,90	8,90
Fugenspannung_17 bei h/500 [N/mm2]	0,16	0,02	1,30
Versagen bei [kN]	84,00	115,00	100,37
Versagensart	Auflagerpressung	Auflagerpressung	Auflagerpressung
Glasspannung Maximal [N/mm2]	173,00	367,00	231,00
Holzspannung Maximal [N/mm2]	81,00	40,50	82,00
Klebefugenspannung Maximal [N/mm2]	5,80	0,78	1,40

Tabelle 4.3 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse Typ „A“ Lasteinleitung über die lange Seite

Die Verwendung von Scheiben aus VSG und grösseren Randquerschnitten erbringt im Vergleich zu den Versuchen vom Typ „A“ zwar eine höhere Bruchlast, da die Auflagerpressung dort massgebend ist, jedoch hat die Ausführung der Scheiben und Randglieder kaum Einfluss auf die Anfangssteifigkeit der Elemente.

4.1.4 Ergebnisse Typ „C“, Lasteinleitung über lange Seite

Um diese Serie untersuchen zu können, wurden kleine Modifikationen am Versuchsaufbau vorgenommen, um die erwartungsgemäss höheren Lasten aufnehmen zu können. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf die Verhinderung des Knickens des Holzrahmens aus der Versuchsebene heraus gerichtet.

Auswertungskriterium	Probekörper		
	1	2	3
Kopfverschiebung bei 10kN [mm]	4.55	9.49	8.49
Kopfverschiebung bei 20kN [mm]	9.82	16.88	7.11
Kopfverschiebung bei 30kN [mm]	14.16	23.59	16.05
Kopfverschiebung bei 40kN [mm]	18.62	32.59	24.20
Fugenspannung 17 10 kN [N/mm ²]	0.00	0.00	0.00
Fugenspannung 17 20 kN [N/mm ²]	0.00	0.01	0.00
Fugenspannung 17 30 kN [N/mm ²]	0.00	0.02	0.00
Fugenspannung 17 40 kN [N/mm ²]	0.00	0.03	0.03
Fugenspannung 15 10 kN [N/mm ²]	0.00	0.00	0.02
Fugenspannung 15 20 kN [N/mm ²]	0.00	0.00	0.02
Fugenspannung 15 30 kN [N/mm ²]	0.00	0.01	0.00
Fugenspannung 15 40 kN [N/mm ²]	0.00	0.01	0.00
Last bei h/500 [kN]	12.9	21.04	18.18
Fugenspannung 17 bei h/500 [N/mm ²]	0.00	0.01	0.00
Versagen bei [kN]	78.75	85.72	79.36
Versagensart	Auflager- pressung	Auflager- pressung	Auflager- pressung
Glasspannung Maximal [N/mm ²]	45.01	26.39	18.13
Holzspannung Maximal [N/mm ²] (tritt immer am Druckauflager auf)	16.2	38.32	29.16
Klebefugenspannung Maximal [N/mm ²]	6.32	5.02	2.99

Tabelle 4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Auffallend sind die geringeren Schubspannungen in der Klebefuge bei den untersuchten Lasten bis zu 40kN. Somit ist die in die Scheibe weitergeleitete Kraft ebenfalls geringer. Offenbar ist die Geometrie des Typs C weniger beanspruchend für die Glaskomponente.

Es wurden Diagramme erstellt, die die Hauptspannungen in den Ecken der Glasscheiben darstellen. Beispielhaft sind die Diagramme für die Rosetten R2 und R5 für den Prüfkörper 2 dargestellt, siehe Diagramm 4.5 und Diagramm 4.6.

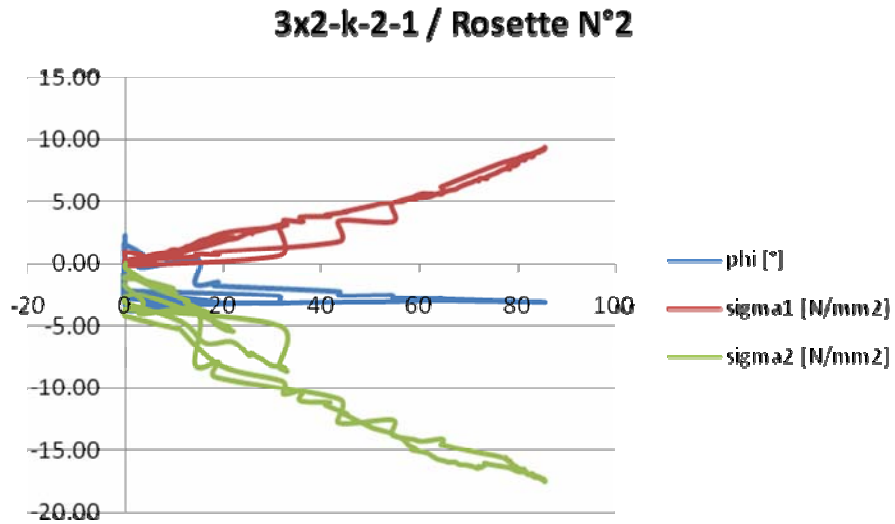


Diagramm 4.5 Winkel und Werte der Hauptspannungen der Rosette R2

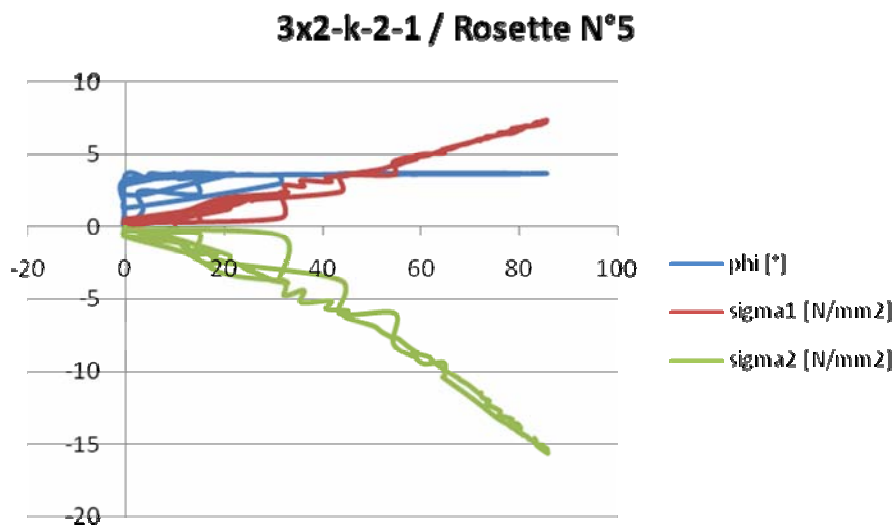


Diagramm 4.6 Winkel und Werte der Hauptspannungen der Rosette R5

In Diagramm 4.7 sind die Kopfverschiebungen der drei Probekörper des Typs C grafisch dargestellt.

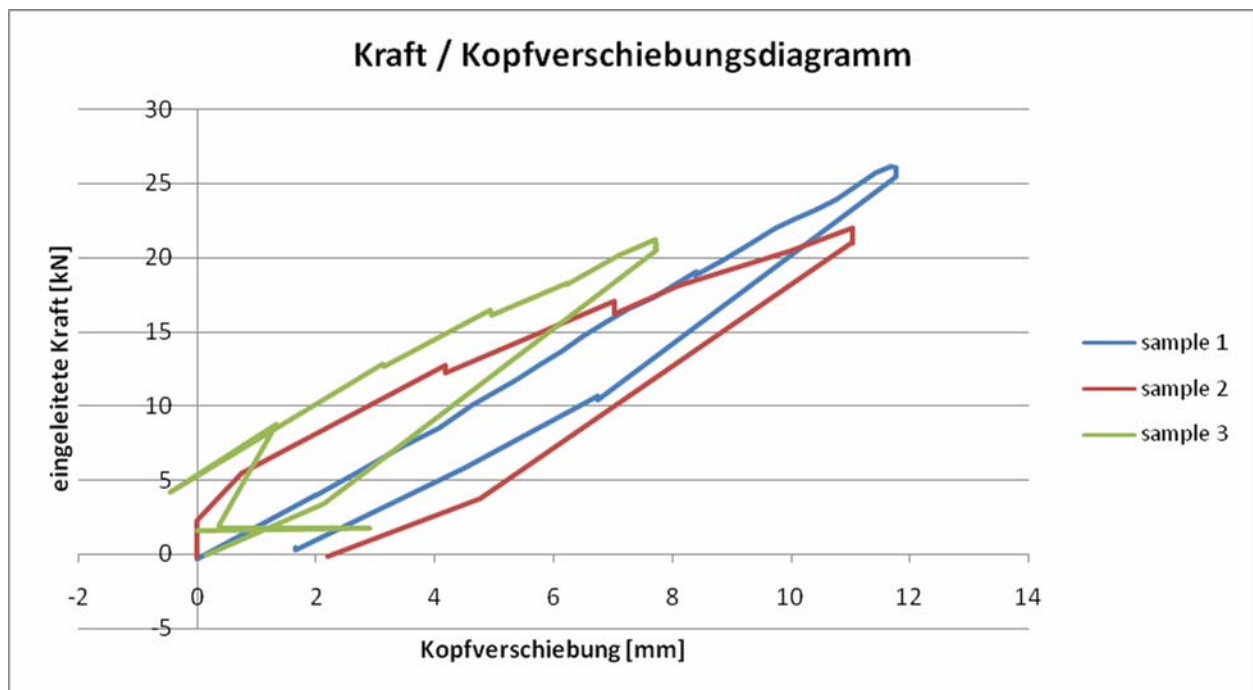


Diagramm 4.7 Kopfverschiebung der drei Probekörper

4.2 Numerische Simulation

Die numerische Simulation ist wie im Kapitel 3.2 beschrieben durchgeführt worden. Die folgende Tabelle zeigt die Identifikation der Rechnungen. Ein Vergleich mit den durchgeführten Versuchen wurde sukzessive durchgeführt.

Bezeichnung Modell	Material									
	Glas			Holz			Fuge			
	Scheibe	Volumen	E-Modul	Stab	Volumen	E-Modul	Volumen	E-Modul	Querkontr.-Zahl	lineare Feder
El_A_k_ohne Ecke	x		75000	x		12000		100		x
El_A_k_1b	x		75000	x		12000		10		x
El_A_k_ohne Ecke	x		75000	x		12000		1000		x
El_A_k_2c		x	75000		x	12000	x	100	variiert	
El_A_k_3		x	75000		x	12000	x	10	variiert	
El_A_k_4		x	75000		x	12000	x	2	variiert	
El_A_l_2		x	75000		x		x	100	variiert	
El_A_l_4		x	75000		x	12000	x	2	variiert	

Tabelle 4.5 Übersicht der numerischen Modelle zur Simulation der Versuche vom Typ „A“

Die Darstellung der Versuche vom Typ „B“ ist nicht aufgeführt, da die Simulation der PVB-Zwischenfolie weitere Schwierigkeiten bedingt und die Simulation mit den einfacheren Berechnungen noch keine befriedigenden Ergebnisse im Vergleich mit den Versuchswerten liefert.

5 Vergleich der Ergebnisse

Der Vergleich der Versuchsergebnisse sollte bereits erste Erkenntnisse über Regelmässigkeiten im Tragverhalten der Elemente herausstellen. Für baupraktische Aspekte ist hierbei vor allem die Anfangssteifigkeit der Elemente von Interesse. Zur Darstellung der Versuchsergebnisse wurde aus diesem Grund die Last bei einer einheitlichen Verschiebung (Kopfverschiebung der Elemente), dem Quotienten aus Bauteilhöhe und der Zahl 500 gebildet. Hinsichtlich dem Versagen der Elemente ist deutlich zu sehen, dass die Elemente vom Typ „A“ bei Lasteinleitung über die kurze Bauteilseite durch Glasbruch versagen. Bei der Lasteinleitung über die lange Bauteilseite ist die Auflagerpressung im Holz versagensbestimmend.

Im Diagramm 5.1 sind die Anfangsverformungen der Elemente aller Versuche dargestellt. Auffällig ist, dass die Elemente vom Typ „B“ trotz VSG-Gläsern und deutlich stärkerem Randverbund keine höhere Anfangssteifigkeit aufweisen.

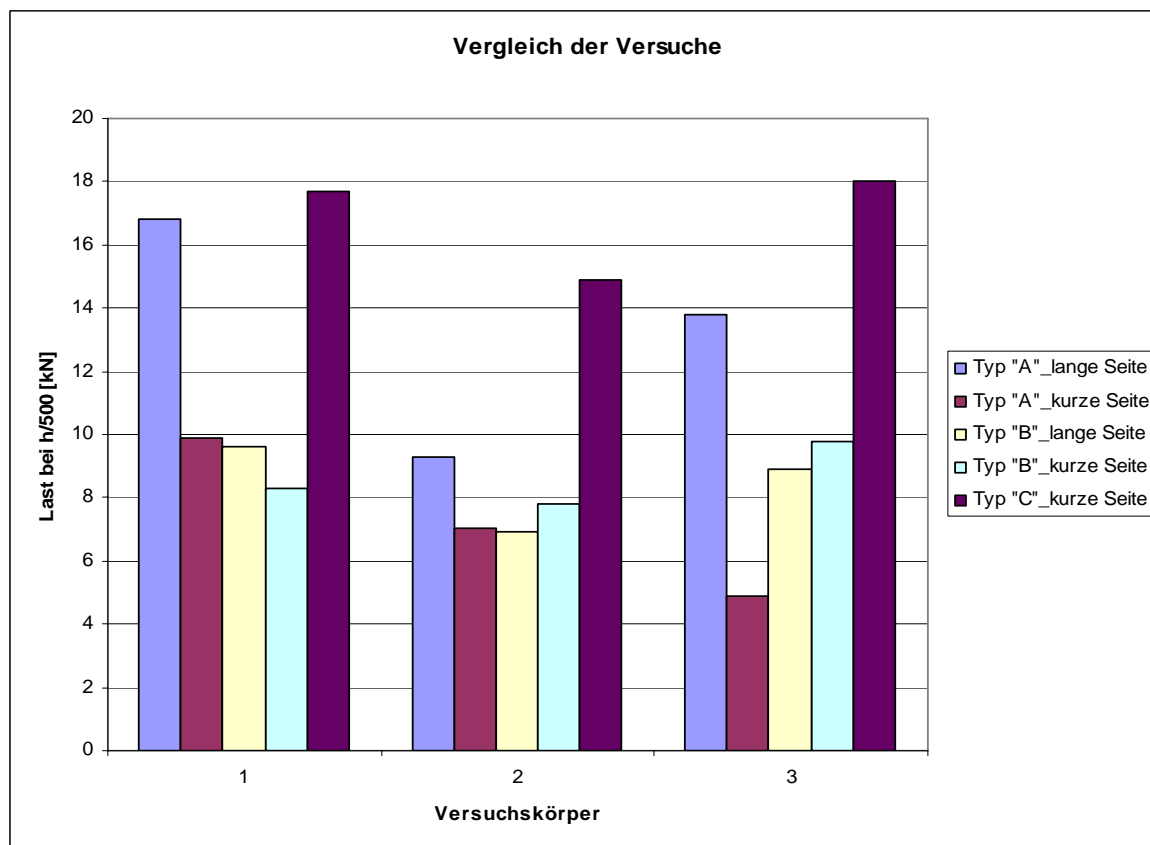


Diagramm 5.1 Vergleich der Belastungsversuche aller Probekörper; Last bei $h/500$ in [kN]

Die sehr hohen Versagenslasten der Versuchskörper zeigen das enorme Potential der Elemente hinsichtlich des Einsatzes als Aussteifungselemente. Ein sehr ausgeprägtes Verformungsverhalten ist zudem hinsichtlich der Sicherheitsaspekte positiv zu bewerten.

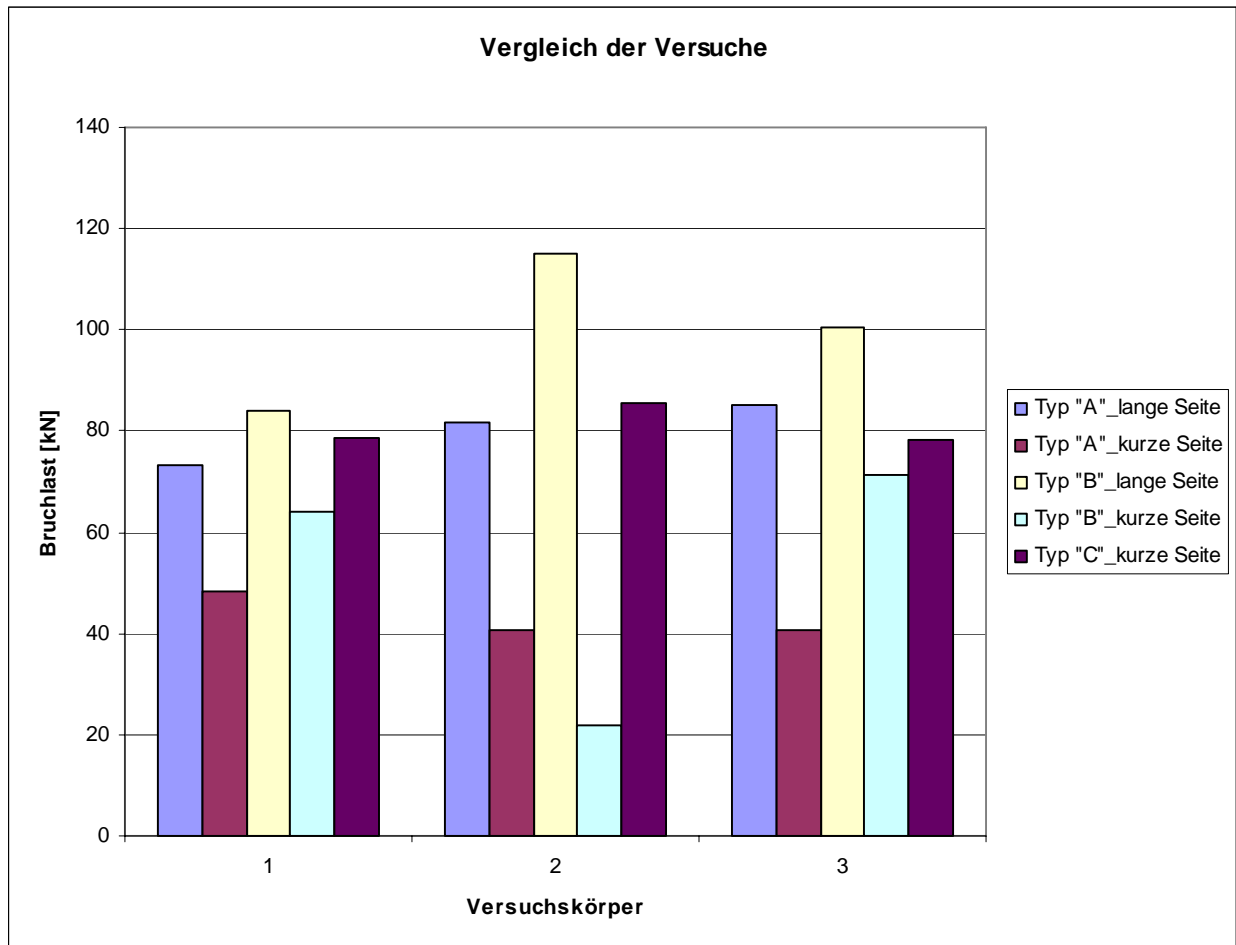


Diagramm 5.2 Vergleich der Bruchlasten aller Probekörper; Last in [kN]

Diagramm 5.2 zeigt die Bruchlasten aller Versuche.

Bei der Auswertung der Langzeitbelastungsversuche wurde deutlich, dass ein endliches Kriechverhalten hinsichtlich der Kopfverschiebung zu verzeichnen ist. Bei genauerer Analyse der Relativverschiebungen zwischen Holz und Glas, was auf das Kriechverhalten der Klebeverbindung schliessen lässt, konnte dies jedoch nicht eindeutig festgestellt werden, da eine stetige Zunahme der Verformung aufgezeichnet wurde (vergl.4.1.2).

Der Vergleich der numerischen Simulation und der Versuchsergebnisse zeigt, dass die Abbildung der Materialbelastung mittels der Finiten-Elemente-Methode möglich ist. Der Vergleich der Steifigkeitswerte (Anfangssteifigkeit) mit den Versuchswerten unter Berücksichtigung der vom Hersteller zur Verfügung gestellten Materialkennwerte fällt jedoch mangelhaft aus. Es ist

systematisch zu erkennen, dass die Versuche deutlich grössere Verformungen aufweisen als die Simulation.

Um die Versuche und Simulation vergleichen zu können, wurden verschiedene numerische Modelle erstellt. Hierzu wurde die Klebefuge simuliert als

- Lineare Federn
- variabler E-Modul
- variable Querkontraktionszahl

In Tabelle 5.1 sind die Eingangsparameter für die verschiedenen Simulationen dargestellt. Abbildung 5.1 zeigt eine Simulation, wie sie auf dem Bildschirm von der Software dargestellt wird.

Bezeichnung Modell	Material										
	Glas			Holz			Fuge				
	Scheibe	Volumen	E-Modul	Stab	Volumen	E-Modul	Volumen	E-Modul	Querkontr.-Zahl	Kontaktfläche	lineare Feder
El_A_k_ohne Ecke	x		75000	x		12000		100			x
El_A_k_1b	x		75000	x		12000		10			x
El_A_k_ohne Ecke	x		75000	x		12000		1000			x
El_A_k_2c		x	75000		x	12000	x	50	variiert		
El_A_k_3		x	75000		x	12000	x	10	variiert		
El_A_k_4		x	75000		x	12000	x	2	variiert		
El_A_l_2		x	75000		x	12000	x	50	variiert		
El_A_l_4		x	75000		x	12000	x	2	variiert		
El_A_k_2e		x	75000		x	12000	x	50		ER	
El_A_k_2h		x	75000		x	12000	x	50		MC_ohne	
El_B_l_1		x	75000		x	12000	x	50			
El_B_k_1		x	75000		x	12000	x	50			
El_C_k_2		x	75000		x	12000	x	50			

Tabelle 5.1 Simulation mit verschiedenen Parametern

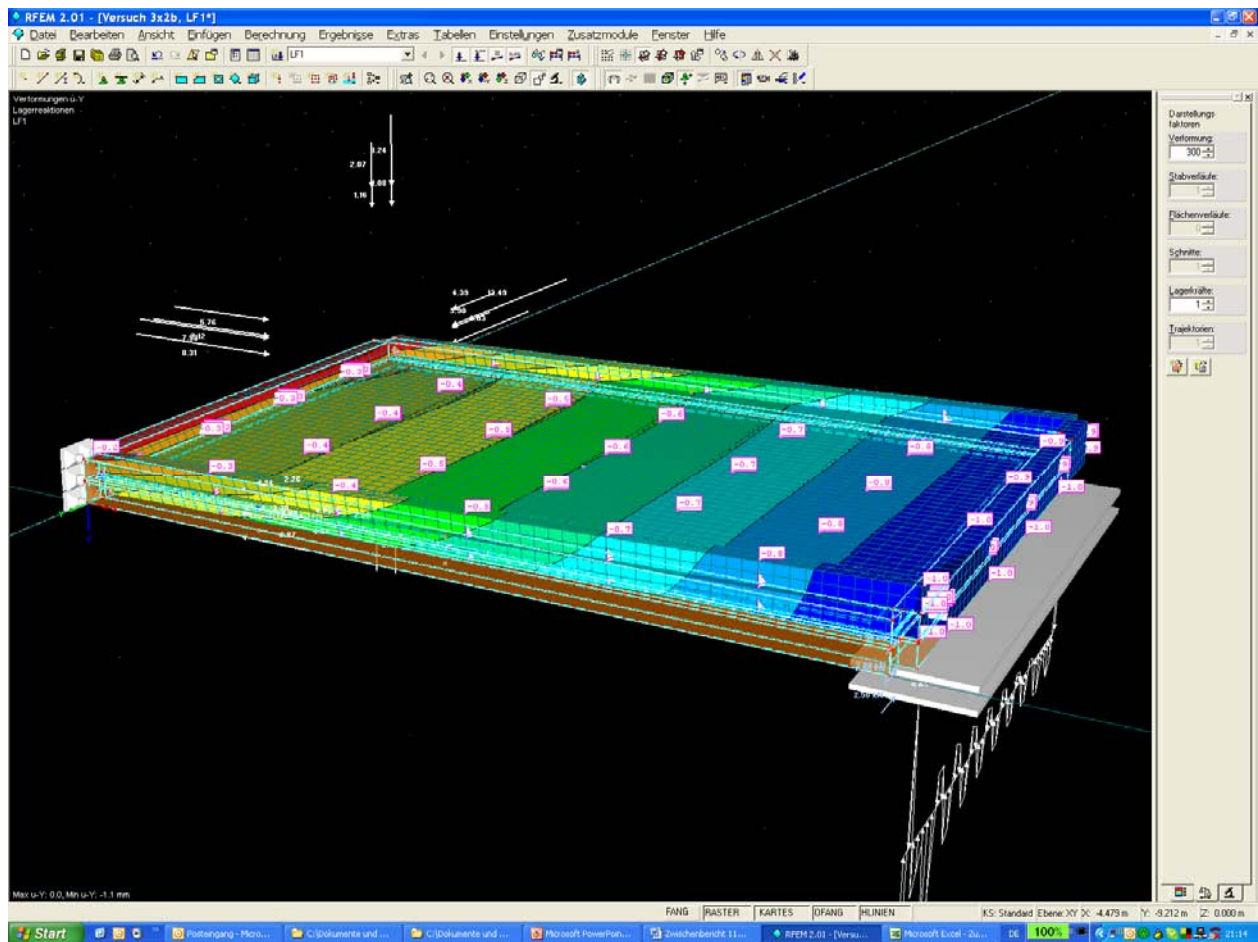


Abbildung 5.1 Screenshot der Simulation in RFEM

Die aus den einzelnen Simulationen erzielten Ergebnisse für die Kopfverschiebungen sind in Diagramm 5.3 wiedergegeben

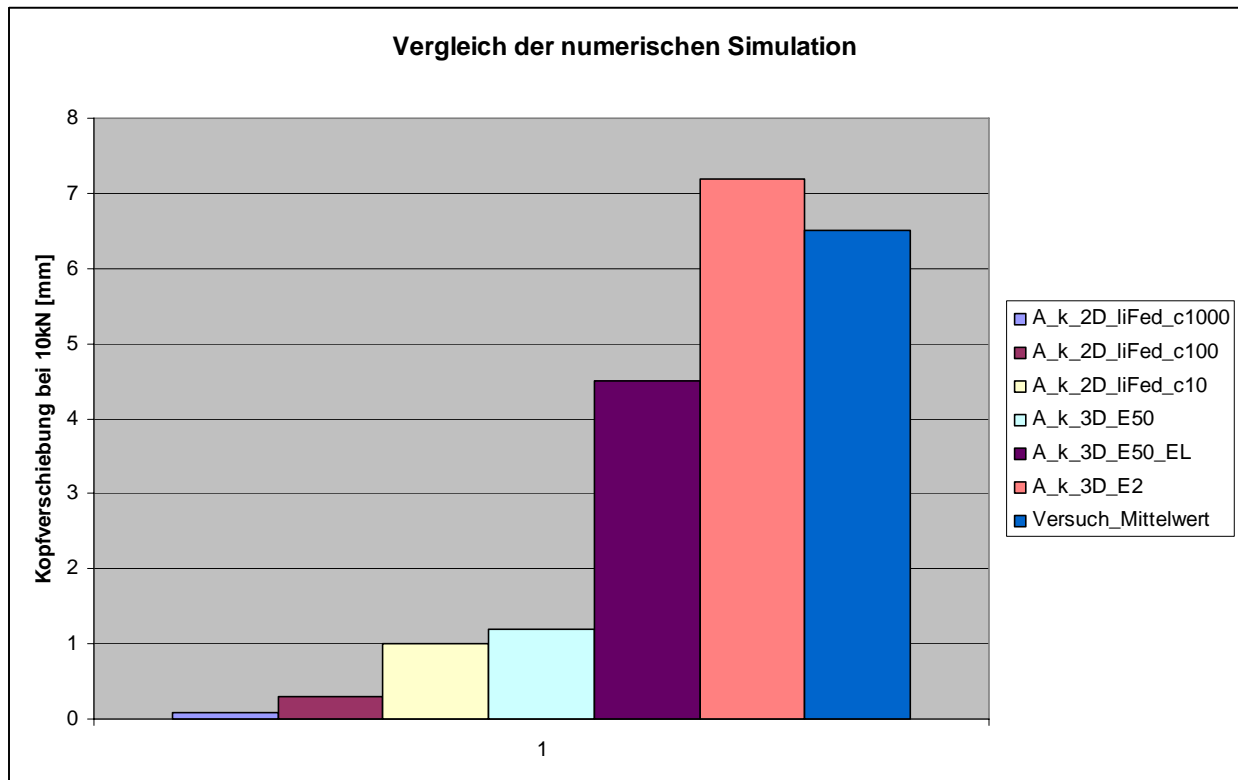


Diagramm 5.3 Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulation

Die Ergebnisse der Simulation zeigen im Vergleich zu den Werkstoffangaben des Herstellers grosse Abweichungen. Für die Simulation der Versuchskörper des Typs A wurden die Kleboffangaben dementsprechend am realen Modell kalibriert. Tabelle 5.2 zeigt im unteren Teil die Steifigkeitswerte für das Material Klebstoff, die befriedigende Übereinstimmung mit der Realität haben. In diesem Fall wurde der Wert des E-Moduls des Klebstoffs mit 63 N/mm^2 ermittelt.

Bezeichnung Modell	Material									
	Glas			Holz			Fuge			
	Scheibe	Volumen	E-Modul	Stab	Volumen	E-Modul	Volumen	E-Modul	Querkontr.-Zahl	lineare Feder
El_A_k_ohne Ecke	x		75000	x		12000		100		x
El_A_k_1b	x		75000	x		12000		10		x
El_A_k_ohne Ecke	x		75000	x		12000		1000		x
El_A_k_2c		x	75000		x	12000	x	50	variiert	
El_A_k_3		x	75000		x	12000	x	10	variiert	
El_A_k_4		x	75000		x	12000	x	2	variiert	
El_A_l_2		x	75000		x	12000	x	50	variiert	
El_A_l_4		x	75000		x	12000	x	2	variiert	
El_A_k_2e		x	75000		x	12000	x	50		ER
El_A_k_2h		x	75000		x	12000	x	100		MC_ohne
EL_A_k_1		x	75000		x	12000	x	63		MC_ohne
El_B_k_1		x	75000		x	12000	x	63		MC_ohne
EL_C_k_2		x	75000		x	12000	x	63		MC_ohne

Tabelle 5.2 Simulation mit verschiedenen Parametern

Mit diesen Angaben konnte ausreichende Kongruenz zwischen den im Labor ermittelten Ergebnissen und der Simulation erzielt werden, wie Tabelle 5.3 darstellt.

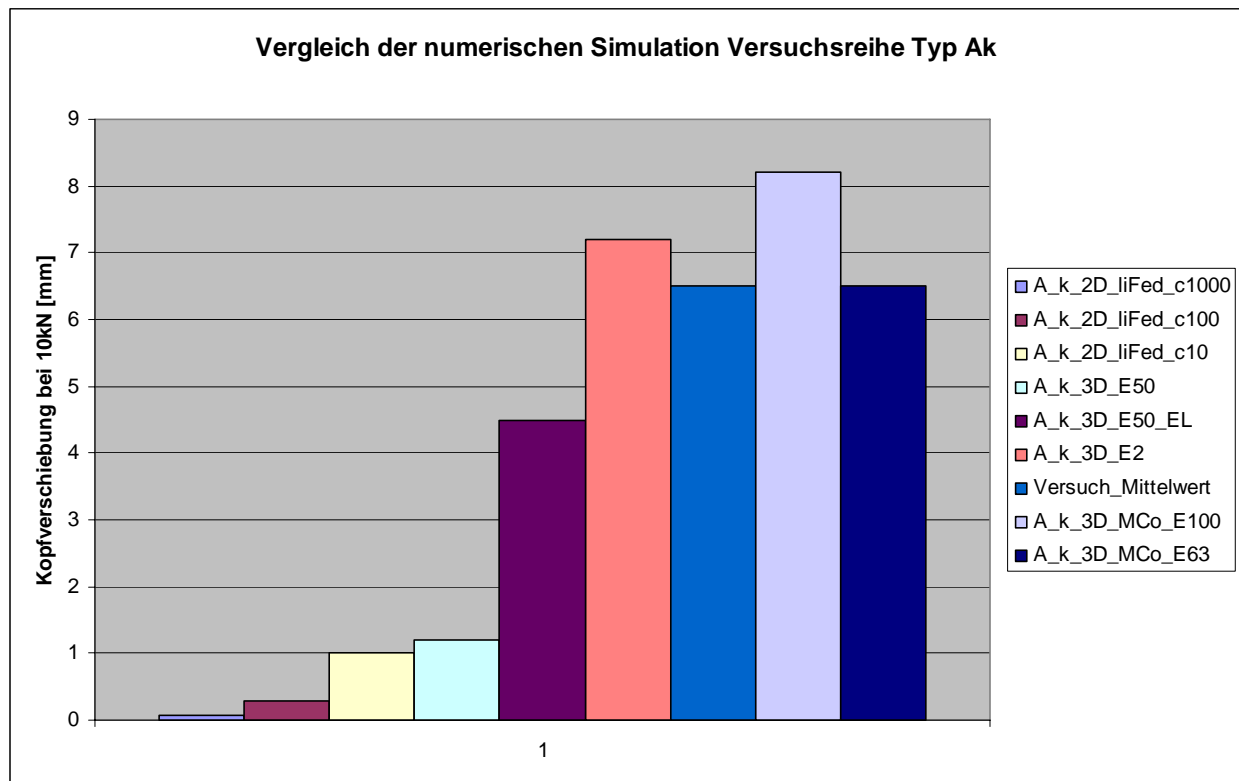


Tabelle 5.3 Vergleich der numerischen Simulation mit angepasstem E-Modul

Im folgenden Schritt wurden die am Typ A ermittelten Steifigkeitswerte wie oben beschrieben auf die Simulation des Typs B angewendet. Wie Tabelle 5.4 darstellt, beobachtet man eine Abweichung der Grössenordnung von 20%.

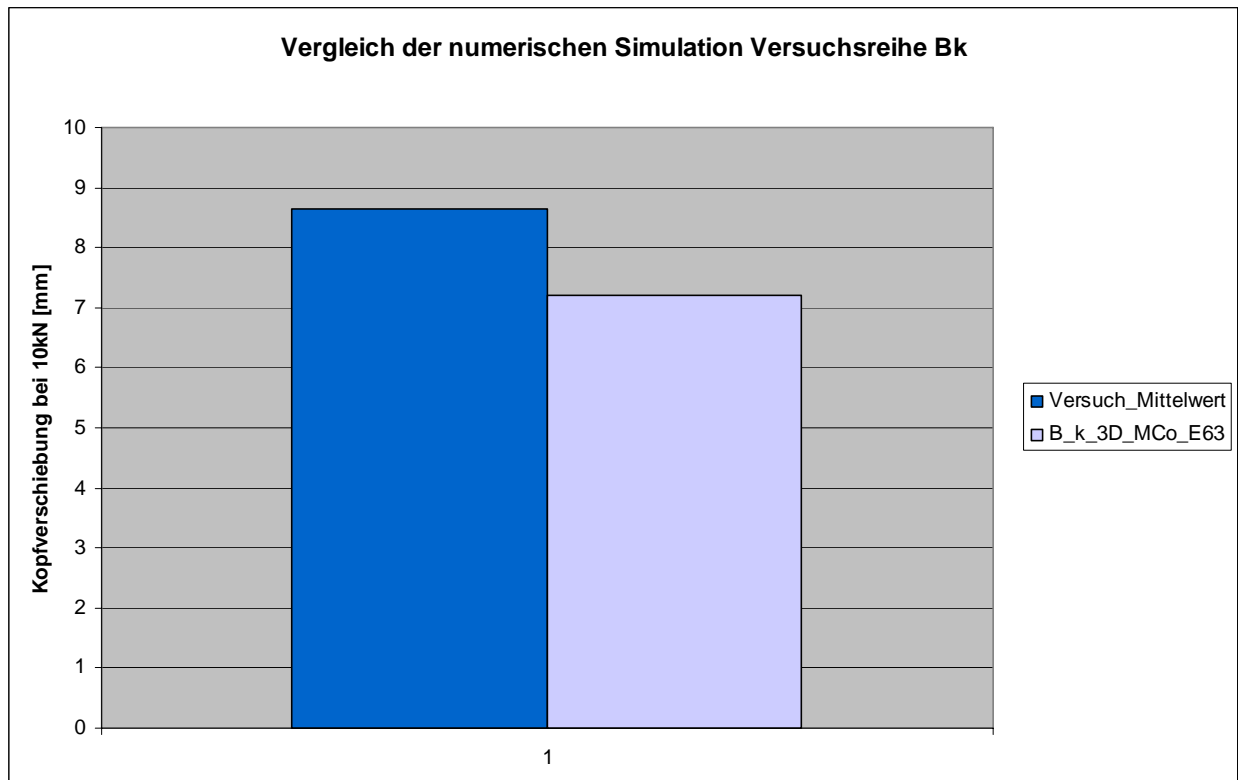


Tabelle 5.4 Vergleich Versuch und Simulation mit angepasstem E-Modul

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Das grosse Potential des Holz-Glas-Verbundsystems zur Aussteifung von Gebäuden konnte ebenfalls durch die in der zweiten Projektphase durchgeführten Versuche verdeutlicht werden. Sehr hohe Versagenslasten bei relativ geringen Anfangsverformungen und einem ausgeprägten Verformungsverhalten vor dem Versagen zeigen sehr positive Aspekte hinsichtlich der Sicherheit der Elemente für baupraktische Anwendungen.

Die Begrenzung des Verformungszustandes unter Gebrauchslasten konnte für alle Versuchsfälle nachgewiesen werden.

Bei Dauerbelastung stellt sich ein abgeschlossenes Kriechverhalten bezüglich der Elementverformung ein.

Weiterhin besteht das Bedürfnis, das Materialverhalten des Klebstoffes hinsichtlich seiner Langzeiteigenschaften genauer zu betrachten. Die zunehmenden Relativverschiebungen zwischen Glas und Holz lassen auf eine Belastungsumlagerung im Verbund schliessen.

Da relativ grosse Streuungen im Vergleich zu relativ wenigen Versuchsproben festgestellt werden mussten, wäre ein weiterer Schritt, eine grössere Anzahl Versuche durchzuführen.

Im Gegensatz zu den systematischen Fehlern, die bereits noch im Zwischenbericht festgestellt werden mussten, konnten die numerischen Simulationen mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode auf die Versuchsergebnisse angepasst werden.

Weiterhin können durch die bis jetzt durchgeführten Versuche noch keine abschliessenden Regelmässigkeiten abgeleitet werden, die den Einfluss der Geometrie auf die Materialbelastung der Elemente beschreiben.

Die numerische Simulation wurde durch die Präzisierung der Elementwahl und die Adaption der Materialkennwerte (vor allem der Darstellung der Klebstoffverbindung) an das Verhalten aus den Versuchen angepasst. Der Projektingenieur verfügt nunmehr über ein gut funktionierendes theoretisches Werkzeug, welches ihm die Möglichkeit gibt, Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zu bemessen.

7 Vorarbeiten / Quellen mit besonderem Interesse für das Forschungsvorhaben

Folgende Quellen können genannt werden, die im Zusammenhang des Forschungsprojektes von Interesse sind:

- [1] Hoeft, Natterer: Zum Tragverhalten von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen, 1993
- [2] Hoeft: Zur Berechnung von Verbundträgern von beliebig gefügtem Querschnitt, 1994
- [3] Hamm: Tragelemente aus Holz und Glas im statischen Verbund, Dissertation 1999
- [4] Natterer, Hamm: Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas, Abschlussbericht Projekt KTI-Nr.2987.1, 1999
- [5] Kreher, Kiwak: Konstruktionen aus Glas und Holz im statischen Verbund; Einfluss unterschiedlicher Klebstoffe als Verbindungsmittel, Vertieferarbeit IBOIS, 2001
- [6] Kreher, Schnabel: Studie des Verbundverhaltens von Glas und Holz im statischen Verbund unter Berücksichtigung der Zustände I und II (ungerissenes und gerissenes Glas), Diplomarbeit IBOIS 2002
- [7] Kreher: Versuchsbericht und Versuchsauswertung zum Bauvorhaben „Biegeträger aus Holz und Glas im statischen Verbund“ zur EXPO 2002, Bericht IBOIS, 2001
- [8] Natterer, Kreher: Dach-, Fassaden- und Plattenelemente aus Glas-Holz-Verbundwerkstoff und deren Langzeitverhalten, Zwischenbericht Projekt KTI 4828.2, IBOIS, 2002

- [9] Kreher, Cordes: Einflüsse auf das Tragverhalten zugbeanspruchter Probekörper aus Glas und Holz im statischen Verbund, Diplomarbeit IBOIS, 2002
- [10] Kreher, Oesterlee: Analyse und Beschreibung des Verbundverhaltens von Holz und Glas im statischen Verbund, Diplomarbeit IBOIS, 2002
- [11] Kreher, van Wetter: Etude du comportement de poutres mixtes en bois et verre liées statiquement, Diplomarbeit IBOIS, 2002
- [12] Natterer, Kreher: Bauteilentwicklung und Materialoptimierung durch gesamtstrukturelle Spannungsanalyse, Abschlussbericht Projekt KTI 4931.1, IBOIS, 2002
- [13] Kreher: Tragverhalten und Bemessung von Holz-Glas-Verbundträgern unter Berücksichtigung der Eigenspannungen im Glas, These No. 2999, IBOIS 2004
- [14] Bruns: Vertieferarbeit: Brettstapelwände als Windverbände, EPFL - IBIOS, September 1997
- [15] Kreher, Gliniorz: Horizontalsteifigkeit von Verbundwänden aus Brettstapeln mit Betonvorsatzschale nach prEN 594
- [16] DIN EN 594, Holzbauwerke-Prüfverfahren: Wandscheibentragfähigkeit und Steifigkeit von Wänden in Holztafelbauart, 1995
- [17] Computers and Structures, Inc.: SAP2000, Analysis Reference I + II, Berkeley, California, USA, 1996
- [18] CEN: Europäische Norm – Holzbauwerke – Prüfverfahren – Wandscheiben-Tragfähigkeit und –Steifigkeit von Wänden in Holztafelbauart, Deutsche Fassung, ICS 91.040.00, Juli 1995
- [19] Kreher; Natterer, Jo.; Natterer, J.: "Timber-Glass-Composite for a Hotel in Switzerland", peer-reviewed Article, SEI (Structural Engineering International), Ausgabe 14, Nummer 2, Mai 2004
- [20] Kreher: Optimierung des Trag- und Versagensverhaltens von Biegeträgern aus Holz und Glas im statischen Verbund durch Verwendung von vorgespannten Gläsern, Abschlussbericht KTI 6470.1IWS, 2004

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1 Einlegen der INDUO Zuganker in die vorgefertigten Holzprofile.....	5
Abbildung 3.2 Aufbringen des Klebstoffes und Einlegen der Glasscheibe	6
Abbildung 3.3 Aufkleben der Dehnmessstreifen und Verkabelung	7
Abbildung 3.4 Dehnmessstreifen und induktiver Wegaufnehmer	7
Abbildung 3.5 Versuchkörper im Prüfstand	8
Abbildung 3.6 Position der Messtechnik exemplarisch; capteurs de force = Kraftmessdose, jaugue = Dehnmessstreifen, Capteur inductif = induktiver Wegaufnehmer	9
Abbildung 3.7 Schnitt durch die Bauteillängsachse; alle Masse in [mm]	10
Abbildung 3.8 Verklebungsdetail am Randverbund; alle Masse in [mm]	10
Abbildung 3.9 Schnitt durch die Elementquerachse; alle Masse in [mm]	11
Abbildung 3.10 Schnitt durch die Bauteillängsachse; alle Masse in [mm]	12
Abbildung 3.11 Detail der Verklebung des Randverbunds; alle Masse in [mm]	12
Abbildung 3.12 Schnitt durch die Bauteilquerachse; alle Masse in [mm].....	13
Abbildung 3.13 Versuchkörper im Prüfstand	14
Abbildung 3.14 induktiver Wegaufnehmer auf Holzrahmen und Gegenstück auf Glasscheibe befestigt	16
Abbildung 3.15 trigonometrischer Zusammenhang der Scherverformung	17
Abbildung 3.16 Zugscherversuch des Klebstoffherstellers mit dem verwendeten Klebstoff.....	19
Abbildung 3.17 DMS-Fächerrosette.....	20
Abbildung 3.18 DMS-Fächerrosette im eingebauten Zustand	20
Abbildung 3.19 Bezeichnungen und Nummerierungen der Rosette	21
Abbildung 3.20 Mohr'scher Dehnungskreis	21
Abbildung 3.21 3D-Ansicht eines FE-Modells.....	24
Abbildung 4.1 Visualisierung der Materialspannungen in Längsrichtung der Dehnmess- streifen in $[N/mm^2]$	27
Abbildung 5.1 Screenshot der Simulation in RFEM.....	39

9 Diagrammverzeichnis

Diagramm 4.1 Kraft-Verschiebungsdiagramm (Pressenlast / Kopfverschiebung des Elements)	26
Diagramm 4.2 Schubspannung in der Klebefuge; Mitte des Zugprofils in Funktion der Pressenlast	28
Diagramm 4.3 Entwicklung der Kopfverschiebung bei Dauerbelastung (Lastniveau 3 kN)	31
Diagramm 4.4 Entwicklung der Fugenspannung am Zuganker bei Dauerbelastung (Lastniveau 3 kN)	31
Diagramm 4.5 Winkel und Werte der Hauptspannungen der Rosette R2	34
Diagramm 4.6 Winkel und Werte der Hauptspannungen der Rosette R5	34
Diagramm 4.7 Kopfverschiebung der drei Probekörper	35
Diagramm 5.1 Vergleich der Belastungsversuche aller Probekörper; Last bei $h/500$ in [kN]	36
Diagramm 5.2 Vergleich der Bruchlasten aller Probekörper; Last in [kN]	37
Diagramm 5.3 Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulation	40

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1 Klebstoffverhalten	18
Tabelle 4.1 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse Typ „A“ Lasteinleitung über die kurze Seite	29
Tabelle 4.2 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse Typ „A“ Lasteinleitung über die lange Seite	30
Tabelle 4.3 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse Typ „A“ Lasteinleitung über die lange Seite	32
Tabelle 4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse	33
Tabelle 4.5 Übersicht der numerischen Modelle zur Simulation der Versuche vom Typ „A“	35
Tabelle 5.1 Simulation mit verschiedenen Parametern	38
Tabelle 5.2 Simulation mit verschiedenen Parametern	40
Tabelle 5.3 Vergleich der numerischen Simulation mit angepasstem E-Modul	41
Tabelle 5.4 Vergleich Versuch und Simulation mit angepasstem E-Modul	42

Schlussabrechnung

	BUWAL
Material und diverse Kosten (Kopien beiliegend)	16 501.10
Saläre Ingenieur 120,9 Std. Techniker 532 Std. studentische Hilfskräfte 63 Std. (s. beiliegende Kopien)	63 498.90
Total	80 000.00

Durch den Techniker und studentische Hilfskräfte geleistete Arbeiten:

Vorbereitungsarbeiten in der Halle, Konzeption des Versuchs- und Herstellungsstands, Montage des Prüfstandes, Unterweisung und Betreuung der Assistenten und studentischen Hilfskräfte für diese Versuche.

Transport des Holzes von Bulle nach Lausanne, Herstellung und Montage des Holzrahmens, Kennzeichnen und Kleben der Dehnmessstreifen auf den Gläsern, sowie Kleben von Holz und Glas, Bestellung von Material wie Schrauben, Gewindestangen, Verankerungen.

Eichung der induktiven Wegaufnehmer, Stärken, Programmierung Messkette (Vielstellenmessgerät) UPM, Anschluss der Dehnmessstreifen, Einbauen der Probekörper.

Erste Versuchsläufe : Überwachung der Versuche, Kontrolle des Versuchsabläufe, Erfassen der Resultate und Transfer der Dateien.

Anschliessend mehrere Anpassungen des Versuchsstands.

Weitere Versuchsläufe : Überwachung der Versuche, Kontrolle der Versuchsabläufe, Erfassen der Resultate und Transfer der Dateien.

Abschliessender Abbau der Sensoren mit Halterungen und des Gestells, Aufräumen des Materials und Beseitigung der Probekörper.