

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

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

DIPLOMARBEIT Master Thesis

Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Holz-Glas-Verbundträgern

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

o.Univ.Prof. DDI Wolfgang WINTER

und der Mitbetreuung von
DI Dr. Werner Hochhauser

E 259

Institut für Architekturwissenschaften
Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

CHRISTINA MÜLLER

0326282

Beindelgasse 41, 3400 Klosterneuburg

Wien, am

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit durch ihre Unterstützung zur Seite gestanden sind.

Großer Dank gilt meinen Eltern, die mir durch finanzielle und vor allem moralische Unterstützung ein Studium ermöglicht haben.

Besonderer Dank gilt Herrn o.Univ.Prof. DDI Wolfgang Winter für die Begutachtung dieser Arbeit sowie Herrn DI Dr. Werner Hochhauser, der mit viel Engagement und tatkräftiger Unterstützung meine Diplomarbeit betreut hat.

Kurzfassung

Gegenstand der hier vorgestellten Arbeit sind experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Holz-Glas-Verbundträgern. Durch den Trend zu transparenten Bauteilen, die dem Betrachter den Eindruck von Leichtigkeit vermitteln, gewinnt der Einsatz von Glas zur Lastabtragung immer mehr an Bedeutung.

Am Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, der TU Wien wurden Formeln zur Bemessung von Holz-Glas-Verbundschubfeldträgern entwickelt. An der Holzforschung Austria, dem größten Prüfinstitut für Holz in Österreich, wurden Belastungsversuche mit Holz-Glas-Verbundschubfeldträgern durchgeführt, deren Ablauf und Ergebnisse in dieser Arbeit beschrieben werden. Die Ergebnisse dieses Projektes wurden im Forschungsendbericht (*Hochhauser, W., et al (2011)*) publiziert. Diese Diplomarbeit behandelt einen Teil des gesamten Forschungsprojektes.

Zur Einführung in die Materie werden die Ausgangsstoffe für die Versuchskörper Holz, Glas, Klebstoffe und Verbindungsmittel beschrieben. Zusätzlich zu den Großprobenversuchen an Schubfeldträgern wurden Kleinprobenversuche durchgeführt. Diese dienen der Ermittlung der Abscherfestigkeit des bei den Großproben verwendeten Klebstoffs Acrylat und des Verschiebungsmoduls der eingesetzten Schrauben.

Zu Beginn der Beschreibung der experimentellen Untersuchungen wird die Herstellung der Schubfeldträger erläutert. Bei der Produktion wurden Holz-Glas-Verbundelemente hergestellt, welche beidseitig auf einen Rahmen mit sechs rechteckigen Feldern geschraubt wurden. Anschließend werden die an der Holzforschung Austria in Wien durchgeführten Vier-Punkt-Biegeversuche beschrieben. Im Zuge dieser Versuchsreihe wurden Messungen von Verformungen und Verschiebungen ausgeführt, anhand welcher die Formeln zur Bemessung verglichen und angepasst werden konnten.

In dieser Arbeit werden Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Durchbiegung des Trägers und der vorherrschenden Kräfte in den Gurten und Pfosten vorgestellt. Nach der Beschreibung der Methoden und Formeln folgt deren Auswertung für den vorhandenen Versuchsträger. Vergleiche zwischen Ergebnissen aus den Berechnungen und aus den Versuchen werden in diversen Diagrammen veranschaulicht und anschließend interpretiert.

Im Anschluss an die Erläuterungen zu den Berechnungsmethoden wird ein Beispiel eines Holz-Glas-Verbundschubfeldträgers in Anlehnung an die Träger der Großprobenversuche mit aufgebracht Gleichlasten (Eigenlast und Nutzlast) durchgerechnet. Es werden der Tragfähigkeitsnachweis der Schubverklebung, der Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Trägerdurchbiegung sowie der Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Klebstoffverformung durchgeführt.

Abstract

Experimental and theoretical analyses of wood-glass composite beams are subject of the presented paper. Due to the trend towards building components which have a light and transparent appearance, the use of glass for load transfer is gaining importance.

At the Institute of Architectural Sciences, department Structural Design and Timber Engineering, at the Vienna University of Technology equations for the sizing of wood-glass composite shear panel beams have been developed. At the Holzforschung Austria, the biggest Austrian institute for wood testing, experiments with wood-glass composite shear panel beams have been carried out. In the following paper the procedure and the results of these experiments are discussed. The results of this research project are published in the final report (*Hochhauser, W., et al (2011)*). This master thesis covers a part of the whole research project.

As an introduction to the topic the base materials of the test items, wood, glass, adhesive and fasteners, are described. In addition to the large scale experiments with shear panel beams small scale experiments have been carried out. There the shearing strength of the adhesive acrylat and the screws which have been used in the large scale test objects were tested.

In the beginning of the description of the experimental analysis the production of the wood-glass composite shear panel beams is explained. Wood-glass composite elements were built and screwed onto both sides of wooden frames with six rectangular fields. Subsequent four-point bending tests, which were carried out at the Holzforschung Austria, are described. By means of measuring extensions and displacements in the test series, the equations for dimensioning have been compared and adjusted to the results of the experiments.

This paper shows methods for the calculation of a beam's deflection and the force in the chords and posts. The theoretical description of the methods and formulas is followed by the evaluation for the tested beams. Comparisons between the results of calculation and experiments are first illustrated in several diagrams and afterwards interpreted.

Subsequent to the explanations of calculation methods you may find an example of a shear panel beam similar to the large scale test objects with a uniformly distributed load (dead load and service load). The verification of the ultimate limit state for the shear adhesion, the serviceability limit state for the beam's deflection as well as the serviceability limit state of the adhesive's deformation are shown.

Abkürzungsverzeichnis

BFSH	Birkenfurniersperrholz
DMS	Dehnmessstreifen
ESG	Einscheiben-Sicherheitsglas
HFA	Holzforschung Austria
HGV	Holz-Glas-Verbund
IWA	Induktiver Wegaufnehmer
SFT	Schubfeldträger
SFTT	Schubfeldträger-Theorie
Temp.	Temperatur
TVG	Teilvorgespanntes Glas
OG	Obergurt
UG	Untergurt

Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

A	Fläche in cm^2
A_l, A_r	Auflagerkraft links und rechts in kN
C_G	Federsteifigkeit der Glasscheiben in kN/cm^2
C_{KL}	Federsteifigkeit der Koppelleisten in kN/cm^2
C_R	Federsteifigkeit des Holzrahmens in kN/cm^2
C_{VH}	Federsteifigkeit des Vorholzes in kN/cm^2
C_{VM}	Federsteifigkeit der Verbindungsmittel in kN/cm^2
C_t	Federsteifigkeit der Schubverklebung in kN/cm^2
E	Elastizitätsmodul (E-Modul) in kN/cm^2
E_{KL}	E-Modul der Koppelleisten in kN/cm^2
E_R	E-Modul des Rahmens in kN/cm^2
F	Kraft, Last in kN
F_{est}	Geschätzte Höchstlast in N
$F_{v,Rk}$	Charakteristischer Wert der Tragfähigkeit pro Scherfuge und Verbindungsmittel in N
$G_{\ddot{a}q,ges}$	Äquivalenter Gesamtschubmodul des Klebers in kN/cm^2
G_G	Schubmodul von Glas in kN/cm^2
G_{KL}	Schubmodul vom Holz der Koppelleisten in kN/cm^2

G_R	Schubmodul vom Holz des Rahmens in kN/cm^2
G_t	Schubmodul der Schubverklebung in kN/cm^2
H	Gesamtträgerhöhe in cm
H_H	Horizontalkraft nach Kreuzinger und Niedermaier
I	Flächenträgheitsmoment 2. Grades in cm^4
K_{ser}	Verschiebungsmodul von Schrauben in N/mm
K_t	Systemsteifigkeit eines Schubfeldes infolge Schubverklebung in kN/cm
L	Schubfeldträgerlänge in m
L_G	Gurtlänge eines Feldes in cm, entspricht Glasscheibenlänge
L_p	Pfostenlänge eines Feldes in cm, entspricht Glasscheibenhöhe
M	Biegemoment in kNm
N	Normalkraft in kN
$N_{x,BL}$	Gurtnormalkraft an der Stelle x infolge der Biegetheorie in kN
$N_{x,t}$	Gurtnormalkraft an der Stelle x infolge Schubfeldträger-Theorie in kN
Q	Querkraft in kN
R	Steifigkeit in N/mm
T	Temperatur in $^\circ\text{C}$
V	Volumen in cm^3

Kleine lateinische Buchstaben

a	Abstand des Schwerpunktes der Querschnittsteile zur Spannungsnulllinie in cm
b	Anzahl der Blechfelder (Schubfelder)
b	Breite in cm
b_{KLP}	Koppelleistenbreite der Pfosten in cm
b_R	Rahmenbreite in cm
b_{RP}	Rahmenbreite der Pfosten in cm
b_{SF}	Schubfeldbreite in cm
b_{VHP}	Vorholzbreite der Pfosten in cm
b_t	Schubverklebungsbreite in cm
c	Fugensteifigkeit zwischen zwei Querschnittsteilen in kN/cm^2
c	Systemsteifigkeit in kN/cm
d	Schraubendurchmesser in mm
d_G	Glasscheibendicke in cm

d_{KL}	Koppelleistendicke in cm
d_{KLP}	Koppelleistendicke der Pfosten in cm
d_{RP}	Rahmendicke der Pfosten in cm
d_{VH}	Vorholzdicke in cm
d_{VHP}	Vorholzdicke der Pfosten in cm
d_{τ}	Schubverklebungsdicke in cm
e_{VM}	Verbindungsmittelabstand in cm
g	Eigengewicht in kN/m
h	Höhe nach Kreuzinger und Niedermaier entspricht l_G
h_G	Glasscheibenhöhe in cm
h_{KL}	Koppelleistenhöhe in cm
h_{KLP}	Koppelleistenhöhe der Pfosten in cm
h_R	Rahmenhöhe in cm
h_{RP}	Rahmenhöhe der Pfosten in cm
h_{SF}	Schubfeldhöhe in cm
h_{VH}	Vorholzhöhe in cm
h_{VHP}	Vorholzhöhe der Pfosten in cm
k	Anzahl der Knoten (Anschlussgelenke zwischen den Feldrandstäben)
k_u, k_w	Flächenfedersteifigkeit nach Kreuzinger und Niedermaier in kN/cm^2
k_s	Verschiebungsmodul von Schrauben in N/mm
l	Länge in cm
l	Länge nach Kreuzinger und Niedermaier entspricht h_G
l_G	Glasscheibenlänge in cm
l_{VH}	Vorholzlänge in einem Schubfeld in cm
n	Anzahl der Verbindungsmittel
$n_{S,G}$	Anzahl der Schrauben im Gurt
$n_{S,P}$	Anzahl der Schrauben im Pfosten
q	Schubfluss in kN/m
q	Nutzlast in kN/m
s	Anzahl der Stäbe (Gurte und Pfosten), d.h. Feldrandstäbe
u	Verschiebung nach Kreuzinger und Niedermaier
v	Geschwindigkeit der Laststeigerung in N/sec
w	Durchbiegung in mm
z	Schwerlinienabstand in cm

Kleine griechische Buchstaben:

α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient
γ_i	Nachgiebigkeitsfaktor
γ	Teilsicherheitsbeiwert
Δu	Holzfeuchtewechsel in %
ε	Dehnung in mm/mm
v	Verformung in mm
$v_{0,1}, v_{0,4}$	Verschiebung bei $0,1 \cdot F_{\text{est}}$ und $0,4 \cdot F_{\text{est}}$ in mm
$v_{i,\text{mod}}$	Modifizierte Anfangsverschiebung in mm
ρ_{BFSH}	Rohdichte von Birkenfurniersperrholz in kg/m^3
ρ_G	Rohdichte von Teilvorgespanntem Glas kg/m^3
$\rho_{\text{Kerto-Q}}$	Rohdichte von Kerto-Q in kg/m^3
ρ_m	Mittelwert der Rohdichte in kg/m^3
σ	Spannung in kN/cm^2

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Motivation	11
1.2	Aufgabenstellung.....	11
2	Ausgangsstoffe	12
2.1	Holz.....	12
2.2	Glas	13
2.3	Klebstoffe.....	15
2.4	Verbindungsmitel im Holzbau.....	17
3	Experimentelle Untersuchungen	19
3.1	Überblick.....	19
3.2	Kleinprobenversuche.....	19
3.3	Großprobenversuche.....	29
4	Theoretische Untersuchungen	55
4.1	Grundlagen der Schubfeld-Theorie	55
4.2	Gebrauchstauglichkeitsnachweis - SLS (Serviceability Limit State).....	57
4.3	Tragfähigkeitsnachweis – ULS (Ultimate Limit State)	75
5	Vergleich zwischen den Ergebnissen der Realversuche und der theoretischen Berechnungen	83
5.1	Gebrauchstauglichkeitsnachweis - SLS (Serviceability Limit State).....	83
5.2	Tragfähigkeitsnachweis – ULS (Ultimate Limit State)	85
6	Berechnungs- und Bemessungsbeispiel eines Holz-Glas-Verbundschubfeldträgers	90
6.1	Annahmen für das Beispiel.....	90
6.2	Darstellung des angenommenen Schubfeldträgers	91
6.3	Annahmen zu Materialien und Geometrie, Modifikations-, Teilsicherheits- und Deformationsfaktoren sowie zu Einwirkungen.....	91
6.4	Ermittlung der Charakteristischen- und Design-Lasten	94
6.5	Umrechnung in äquivalente Knotenlasten und Querkräfte.....	95
6.6	Vorwerte für das Berechnungsbeispiel	96
6.7	Tragfähigkeitsnachweis der Schubverklebung.....	100
6.8	Gebrauchstauglichkeitsnachweis: Durchbiegung des Trägers.....	102
6.9	Gebrauchstauglichkeitsnachweis: Klebstoffverformung der Schubverklebung infolge Last.....	103

7	Einfluss der Durchlaufträgerwirkung von Ober- und Untergurt auf den Gebrauchstauglichkeits-nachweis	105
	Nachweisführung.....	105
8	Zusammenfassung.....	108
9	Anhang.....	110
	Literaturverzeichnis	111
	Abbildungsverzeichnis.....	114
	Tabellenverzeichnis.....	118
	Erklärung	119

1 Einleitung

1.1 Motivation

Gebäude werden sowohl von vertikalen Lasten wie Nutzlasten und Eigenlasten als auch von horizontalen Lasten wie Wind und Erdbeben beansprucht. Zur Lastabtragung ins Erdreich wurden bisher mineralische Werkstoffe, Holz, Stahl und Beton herangezogen. Glas hingegen wurde bislang im Baubereich vorrangig als raumabschließendes Konstruktionselement verwendet, da die Verglasung aufgrund ihrer Transparenz für die Belichtung von Gebäuden sorgt. In Zukunft könnten statisch wirksame Glaswandelemente die Aufgabe der Lastabtragung übernehmen. Aus architektonischer Sicht wirkt sich eine Reduktion der von der Außenhülle entkoppelten Tragstruktur positiv aus.

Sofern eine gleichmäßige Lasteinleitung gewährleistet werden kann und somit örtliche Spannungsspitzen vermieden werden, birgt Glas großes statisches Potential. Eine derartige „schonende“ Lasteinleitung ist durch eine elastische Verbindung von Holz und Glas mittels Verklebungen möglich. Glas ist im Stande große Druckkräfte aufzunehmen und kann bei Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zweckmäßig genutzt werden.

1.2 Aufgabenstellung

Um Holz-Glas-Verbundträger zur Lastabtragung einer Konstruktion heranziehen zu können, sind statische Dimensionierungen dieser notwendig. Für die Berechnung müssen Formeln entwickelt werden, die es ermöglichen mit angemessenem Aufwand eine Konstruktion zu bemessen.

Im Zuge der Entstehung der Dissertation von Hochhauser Werner (*Hochhauser, W. (2011)*) wurden Formeln zur Berechnung von Holz-Glas-Verbundschubfeldträgern entwickelt, welche in der vorliegenden Arbeit beschrieben und mit Hilfe von Großprobenversuchen kontrolliert bzw. angepasst werden.

2 Ausgangsstoffe

2.1 Holz

2.1.1 Holzeigenschaften

Durch den anisotropen Aufbau von Holz sind seine Eigenschaften in den einzelnen Strukturrichtungen unterschiedlich. Aus diesem Grund werden die Holzeigenschaften in drei Richtungen definiert:

- In Längsrichtung, in Richtung der Stammachse
- In radialer Richtung, orthogonal zu den Jahrringen
- In tangentialer Richtung, tangential zu den Jahrringen

Holzeigenschaften sind stark vom Feuchtegehalt des Holzes abhängig. Bei Wasseraufnahme kommt es zum Quellen und bei Trocknung zum Schwinden. Diese Abmessungsänderungen treten hauptsächlich quer zur Faserrichtung auf und führen zur Bildung von Rissen. Um dieses sogenannte „Arbeiten des Holzes“ möglichst einzuschränken, sollte Holz beim Einbau jene Gleichgewichtsfeuchte besitzen, welche dem später zu erwartendem Klima entspricht.

Die Rohdichte von Holz ist ein holzartenspezifischer Parameter und variiert in Abhängigkeit von der Holzfeuchte, der Jahrringbreite, dem Spätholzanteil, der Lage im Stamm, dem Baumalter u.a.. Im Allgemeinen lässt eine höhere Rohdichte auf höhere Härte, Festigkeit und Beständigkeit gegen Abnutzung schließen.

Die Druck- und Zugfestigkeit von Holz sind von der Belastungsrichtung abhängig.

(Ambrozy, H.G., Giertlová, Z. (2005), S. 14, 18-24)

2.1.2 Holzarten

Holz kann in folgende wesentliche Arten unterteilt werden:

- Nadelholz:
Nadelholz besitzt eine relativ einfache und regelmäßige Struktur, hauptsächlich bestehend aus Tracheiden (Holzfasern), Holzstrahlen und Harzkanälen. Deutlich sichtbare Jahrringe bestimmen das Aussehen.
Beispiele für in der Industrie verwendete Arten:
Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche
- Laubholz:
Laubholz weist eine unregelmäßigere Struktur auf, bestehend aus Tracheen (Gefäßen) und Holzstrahlen. Anhand der Anordnung und dem Durchmesser von Gefäßen kann man zwischen zerstreutporigen und ringporigen Laubhölzern unterscheiden. Bei ringporigen Laubholzarten sind Jahrringe, wie bei Nadelholz, deutlich erkennbar. Dagegen sind bei zerstreutporigen Laubhölzern Poren gleichmäßig über einen Jahrring verteilt, wodurch keine klaren Jahrringe auftreten.

Beispiele für in der Industrie verwendete Arten:
Eiche, Esche, Robinie, Buche, Ahorn, Pappel

(Ambrozy, H.G., Giertlová, Z. (2005), S. 11-16)

2.2 Glas

Nachfolgende Ausführungen in den Kapiteln „Glaseigenschaften“ und „Herstellung und Einteilung von Glas“ basieren auf folgenden Quellen:

(Achenbach, E. (1995), S. 33)

(Edl, T. (2008), S. 22, 23)

(Petzold, A., Marusch, H., Schramm, B. (1990), S. 13, 14, 35)

(Renno, D., Hübscher, M. (2000), S. 1-3, 45)

(Wagner, E. (2008), S. 10, 11, 19-22)

2.2.1 Glaseigenschaften

Glas ist eine amorphe (d.h. im Wesentlichen nicht kristalline) Substanz, deren Struktur sich durch die Anordnung ihrer kleinsten Bauteile von Kristallen unterscheidet. Der für Kristalle charakteristische regelmäßige Aufbau des Kristallgitters ist bei Glas nicht vorhanden. Der isotrope Werkstoff ist aus weitgehend ungeordneten Atomen und Ionen aufgebaut. Glas ähnelt strukturmäßig zwar einer Flüssigkeit, besitzt jedoch eine so hohe Zähigkeit bei normaler Umgebungstemperatur, sodass es als Feststoff angesehen wird.

Die Eigenschaften von Gläsern hängen im Allgemeinen stark von ihrer Zusammensetzung ab. Glas besitzt im Gegensatz zu vielen anderen Stoffen keinen scharfen Schmelzpunkt (oder auch Erstarrungspunkt). Dieser liegt bei vielen Glasarten um 600 °C. Unterhalb dieser Temperatur nimmt Glas den Aggregatzustand einer Flüssigkeit an, die allerdings fest ist.

Die mechanischen Eigenschaften von Glas variieren sehr stark und sind abhängig von der Herstellung, beispielsweise von der Abkühlgeschwindigkeit. Glas verhält sich bei Belastung über der Festigkeitsgrenze spröde. Es kommt zu keinen plastischen Verformungen, sondern zu einem plötzlichen Bruch mit muschelförmigen Bruchflächen. Die theoretische Druckfestigkeit von Alkali-Erdalkali-Silicatgläsern liegt zwischen 400 und 900 N/mm². Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient liegt bei diesem Glas bei $8 - 9 \times 10^{-6} [K^{-1}]$. Glas verhält sich in Abhängigkeit von seiner Zusammensetzung weitgehend resistent gegen Chemikalien mit Ausnahme von Flusssäure und heißer Phosphorsäure. Bei längerer Einwirkung von Wasser auf Glasflächen kann es auch hier zu einem Angriff kommen. Kondensiert Wasser auf Glas oder kommt es über längere Zeit zu einer Einwirkung durch stehende Wasserfilme auf Glasoberflächen, so entsteht eine Korrosionsschicht. Hierbei entsteht eine Auslaugung der Alkali- und Hydroxid-Ionen. Diese Zerstörung zeigt sich in Form von Trübung der Glasoberfläche.

Ein weiteres Charakteristikum für Glas ist seine Durchsichtigkeit. Diese optische Eigenschaft kann durch Zusatzstoffe verändert werden, sodass gezielt undurchsichtige, trübe oder färbige Gläser hergestellt werden.

Im Allgemeinen besitzt Glas einen hohen elektrischen Widerstand und eine Dichte von ca. $2,5 \text{ g/cm}^3$.

2.2.2 Herstellung und Einteilung von Glas

Glas ist ein anorganisches Produkt, das durch Schmelzen und anschließendes Abkühlen ohne Kristallisation erzeugt wird. Die je nach Glassorte unterschiedlich zusammengesetzten, feingemahlten und gemischten Rohstoffe werden in Schmelzwannen zusammengesmolzen. Dabei entsteht die sogenannte Glasschmelze, die zu unterschiedlichen Glasprodukten weiterverarbeitet wird.

Abbildung 1 zeigt die einzelnen Schritte der Glasherstellung. In der darauffolgenden Abbildung 2 werden die aus Glas herstellbaren Erzeugnisgruppen und anschließend in Abbildung 3 die Einteilung der Bauglaserzeugnisse dargestellt.

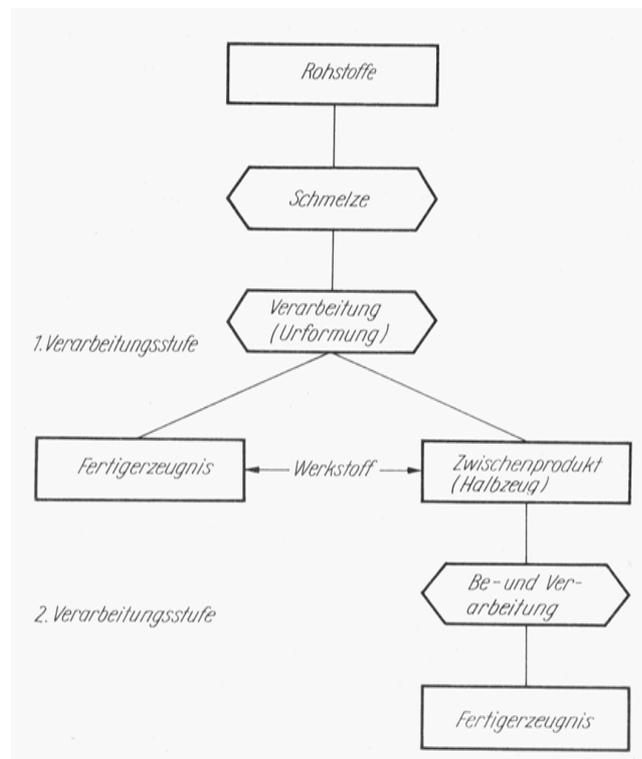


Abbildung 1: Vom Rohstoff zum Werkstoff Glas (Petzold, A., Marusch, H., Schramm, B. (1990), S. 13)

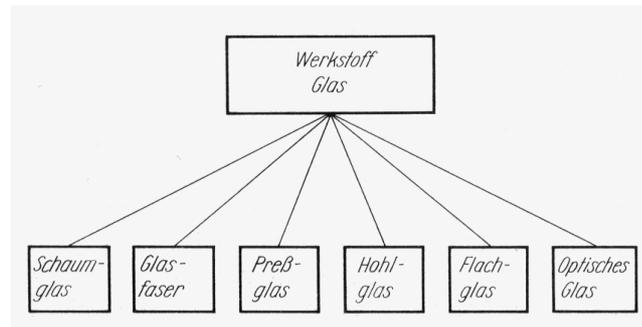


Abbildung 2: Zum Werkstoff Glas gehörende bzw. aus ihm herstellbare Erzeugnisgruppen (Petzold, A., Marusch, H., Schramm, B. (1990), S. 13)

Einteilungsprinzip	Technologische Fertigung	Geometrie	Verwendungszweck	Spezielle Eigenschaften und Veredelungsgrad
Bauglaserzeugnis	<ul style="list-style-type: none"> — Flachglas — Mundblasverfahren — Ziehverfahren — Fließverfahren — Preßglas — Glassteine — Betonglas — Glasdachsteine — Faserglas — Glasfaser und Glasseide — Glaswatte — Mineralwolle — Schaumglas 	<ul style="list-style-type: none"> — Flachglas — Profilglas — Hohlglas (Glassteine) — Faserglas 	<ul style="list-style-type: none"> — Fensterglas — Spiegelglas — Sicherheitsglas — Profilglas — Fassadenglas — Dämm- und Isolationsmaterial — Verstärkungsmaterial — Verkleidungsmaterial 	<ul style="list-style-type: none"> — Guß- und Preßglas — Mehrscheiben-Isolierglas — Oberflächenbeschichtetes Glas — Ornamentglas — Sicherheitsglas — Drahtglas — Farbglas — Trübglas — Antikglas — Eisblumenglas

Abbildung 3: Einteilung der Bauglaserzeugnisse (Petzold, A., Marusch, H., Schramm, B. (1990), S. 14)

Im Hochbau ist hauptsächlich das mittels Fließverfahren aus Flachglas hergestellte Floatglas in Verwendung.

Ein typischer Gemengesatz von Floatglas ist:

Quarzsand (SiO ₂):	59,6%
Soda (Na ₂ CO ₃):	18,2%
Dolomit (CaCO ₃ ·MgCO ₃):	14,0%
Kalk (CaCO ₃ , CaO):	5,0%
Feldspat (NaAlSi ₂ O ₈):	2,0%
Sulfat:	1,2%

Zusätzliche Rohstoffe, die je nach erwünschten Glaseigenschaften beigemischt werden, sind: Pottasche, Mennige, Borax, Bariumkarbonat und andere seltene Erden. Da Glas zu den recyclingfähigen Werkstoffen zählt, kann zu den Rohstoffen auch Altglas beigemischt werden.

2.3 Klebstoffe

Beim Kleben werden gleiche oder ungleiche Fügepartner durch einen aufgetragenen Klebstoff kraftschlüssig verbunden, ohne die Werkstoffeigenschaften der Fügepartner zu verändern. Habenicht zitiert aus der DIN 16920, dass ein Klebstoff als „nicht

metallischer Stoff, der Füge­teile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann“ definiert wird.

(Habenicht, G. (1997), S. 3)

2.3.1 Vor- und Nachteile von Klebstoffen

Kleben weist im Vergleich zu anderen Verbindungstechniken wie Schweißen oder Schrauben folgende Vorteile auf:

- Möglichkeit großflächiger Verbindungen
- Einfache Herstellung
- Kraft wird gleichmäßig und nicht konzentriert wie bei mechanischen Verbindungsmitteln übertragen
- Oberflächen- und Gefügestruktur der Werkstücke werden durch eine geringe Wärmeentwicklung nicht verändert
- Gewichtsersparnis
- Dichtende Verbindungen
- Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe ist möglich
- Keine Beschädigung der Füge­teile

Als nachteilig erweisen sich jedoch folgende Tatsachen:

- Erfordernis einer Überwachung der technisch anspruchsvollen Umsetzung
- Eigenschaft des Klebers zu altern
- Keine Möglichkeit einer zerstörungsfreien Kontrolle des Klebers und der Klebefuge
- Temperaturempfindlichkeit des Klebers und der Klebung

(Schultes, R. (2010), S. 3)

2.3.2 Einteilung der Klebstoffe

Die Einteilung der Klebstoffe kann nach der chemischen Basis sowie nach dem Abbindemechanismus erfolgen. Diese Einteilungen sind in folgenden Abbildungen dargestellt.

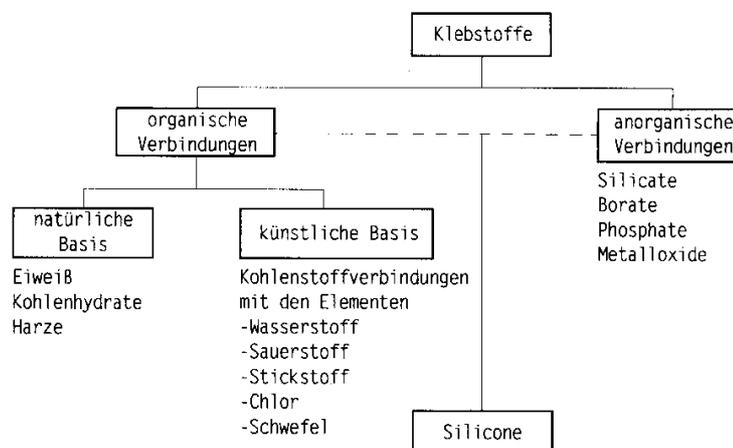


Abbildung 4: Einteilung der Klebstoffe nach der chemischen Basis
(Habenicht, G. (1997), S. 7)

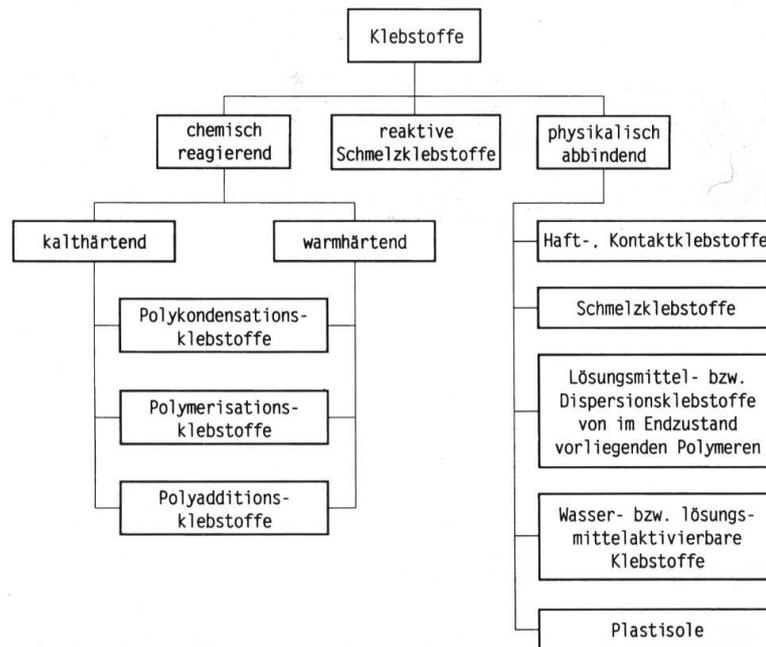


Abbildung 5: Einteilung nach dem Abbindemechanismus (Habenicht, G. (1997), S. 8)

2.4 Verbindungsmittel im Holzbau

Verbindungsmittel sind im Holzbau unerlässlich, da sie verschiedene Konstruktionselemente verbinden und somit einerseits die Lagesicherung gewährleisten, andererseits Kräfte von einem Bauteil in den anderen leiten.

2.4.1 Verbindungsmittelleigenschaften

Verbindungsmittel zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Maximal übertragbare Last in verschiedene Richtungen
- Art der Lasteinleitung
- Last-Verformungs-Verhalten
- Bruchverhalten

Die Einteilung der Verbindungsmittel kann anhand ihrer Wirkungsweise erfolgen, wobei flächenhaft wirkende Verbindungsmittel wie Klebstoff und Verbindungsmittel mit Tiefenwirkung wie Nägel, Schrauben und Bolzen unterschieden werden.

Beim Kleber erfolgt die Kraftweiterleitung gleichmäßig und flächig. Im Gegensatz dazu kommt es bei Nägeln, Schrauben und Bolzen zu einer punktuell konzentrierten Lasteinleitung. Durch Kontaktpressung im Loch werden Kräfte vom Verbindungsmittel mit Tiefenwirkung auf das Holz weitergegeben, wodurch im Holz Schub- und Normalkräfte entstehen.

Die Steifigkeit einer Verbindung hängt sehr stark vom Verbindungsmittel und dessen Verformungsverhalten ab.

In der Regel werden feste Verbindungen hergestellt. Es können aber auch Gelenke eingebaut werden.

Folgende Größen beeinflussen die Tragfähigkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit der Verbindungsmittel und der Gesamtkonstruktion, wobei nicht alle genannten Punkte auf alle Verbindungsmittel zutreffen:

- Lochleibungsfestigkeit des Bauteils
- Holzfeuchtigkeit des Bauteils
- Holzqualität und Holzfestigkeit des Bauteils
- Spaltempfindlichkeit des Holzes
- Lage, Art und Dicke der zu verbindenden Bauteile
- Mechanische Eigenschaften der Verbindungsmittel
- Schlankheit der Verbindungsmittel
- Durchmesser der Verbindungsmittel
- Eindringtiefe der Verbindungsmittel in das Holz
- Krafteinleitung in – oder quer zur Stabachse des Verbindungsmittels
- Verteilung und Abstände zwischen den Verbindungsmitteln sowie Randabstände
- Lochausführung (vorgebohrt oder nicht vorgebohrt)
- Lasteinwirkungsdauer
- Beanspruchungsart
- Winkel zwischen Kraft und Holzfaserrichtung

(Winter, W., Hollinsky, K. H., Weinlinger, T. (2010), S. 114, 115)

2.4.2 Gängigste Verbindungsmittel im Holzbau

Folgende metallische und hölzerne Verbindungsmittel kommen im Holzbau zum Einsatz:

- Stabdübel, Passbolzen, Bolzen
- Dübel
- Schrauben
- Nägel
- Eingeklebte Gewindestäbe
- Klebeverbindungen
- Winkel
- Stahlblech-Holz-Nagelverbindungen (Lochplatten, Stahlschuh,...)
- Sondersysteme mit Typisierung und Zulassung

(Winter, W., Hollinsky, K. H., Weinlinger, T. (2010), S. 114, 115)

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Überblick

Um die entwickelten, analytischen Formeln zur einfacheren Berechnung von Holz-Glas-Verbundschubfeldträgern zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen wurden Großprobenversuche durchgeführt. Zusätzlich zu den Großprobenversuchen fanden zwei Kleinprobenversuche statt, um die Eigenschaften der verwendeten Materialien zu testen.

Sowohl Kleinproben als auch Großproben wurden bei der Holzforschung Austria in Wien hergestellt und anschließend vor Ort Versuchen unterzogen.

3.1.1 Kleinprobenversuche

- Abscherversuche im Kleinformat
Bei diesen Versuchen wurde anhand von fünf Kleinproben die Abscherfestigkeit des bei den Großproben verwendeten Acrylats getestet.
- Verschiebungsmodul K_{ser}/k_s – Versuche
Im Zuge von sechs Abscherversuchen wurde der Verschiebungsmodul K_{ser} (auch k_s genannt) von Senkkopfschrauben, die bei den Großproben zum Einsatz kamen, ermittelt.

3.1.2 Großprobenversuche

Für die Versuchsreihe wurden drei Schubfeldträger hergestellt und an diesen anschließend Vier-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Wegaufnahme und Dehnmessstreifen wurden auf den Trägern angebracht und damit Verschiebungen und Dehnungen gemessen. Aus diesen Werten konnte auf die in den Holz-Glas-Verbundschubfeldträgern aufgetretenen Kräfte geschlossen werden, um diese mit den analytisch berechneten Kräften zu vergleichen.

3.2 Kleinprobenversuche

Im Zuge der Kleinprobenversuche wurden das Acrylat für die Schubverklebung auf seine Abscherfestigkeit und die Schrauben für die Montage der Holz-Glas-Verbundelemente auf dem Rahmen auf ihren Verschiebungsmodul untersucht.

3.2.1 Abscherversuche im Kleinformat

Um den Zweikomponenten-Acrylatklebstoff für die Schubverklebung bei den Holz-Glas-Elementen für die Großproben zu untersuchen, wurden an fünf Kleinproben Abscherversuche durchgeführt.

3.2.1.1 Versuchskörperaufbau

Auf Holzquader mit den Maßen 40 x 100 x 150 mm wurden mit einer 3,3 mm dicken Acrylschicht Glasstücke der Größe 8 x 50 x 90 mm geklebt. Um die Acrylschicht auf eine genaue Fläche von 30 x 50 mm² zu begrenzen, wurde rundherum doppelseitiges Montageklebeband aus geschlossenzelligem Polyethylen-Copolymerschaum mit einer Stärke von 3,3 mm angebracht. In der folgenden Abbildung ist der Aufbau der Probstücke zu erkennen.

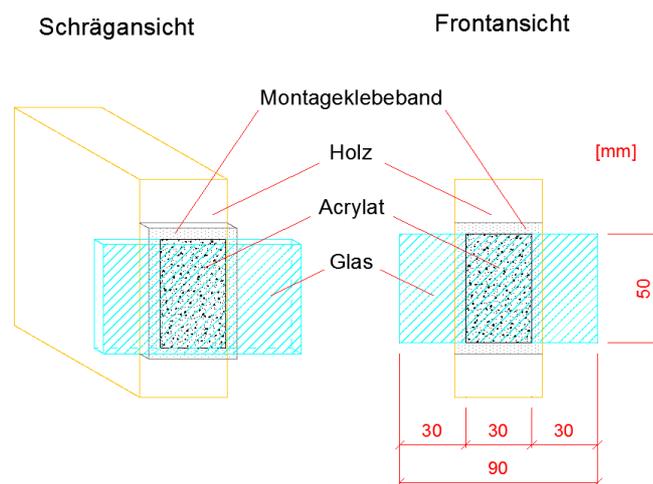


Abbildung 6: Versuchskörperaufbau für die Abscherversuche



Abbildung 7: Fünf Probekörper

3.2.1.2 Prüfen der Probekörper

Beim Abscherversuch wurden die Probekörper in eine Universalprüfmaschine der Holzforschung Austria eingespannt. Vor Beginn des eigentlichen Versuchs wurde der Druckbolzen bis zur Oberkante der Glasscheibe herangefahren.



Abbildung 8: Schrägansicht des Versuchskörpers in der Prüfmaschine

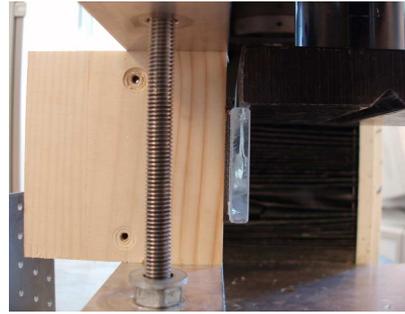


Abbildung 9: Seitenansicht des Versuchskörpers in der Prüfmaschine

Anschließend wurde die durch die Prüfmaschine aufgebrachte Last kontinuierlich gesteigert bis ein Versagen in der Klebefuge eintrat. Vor dem vollständigen Versagen traten im Glas hohe Spannungen auf, die Sprünge verursachten. Das Versagen der Klebefuge zeigte sich durch ein Ablösen des Acrylats sowohl vom Glas als auch vom Holz bzw. auch durch ein teilweises Ablösen des Klebers samt einer dünnen Holzschicht vom Holzblock.

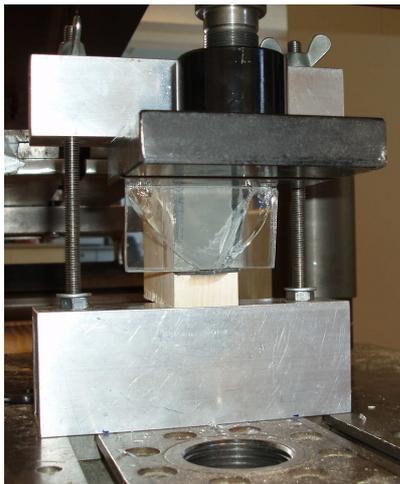


Abbildung 10: Schrägansicht eines belasteten Versuchskörpers in der Prüfmaschine

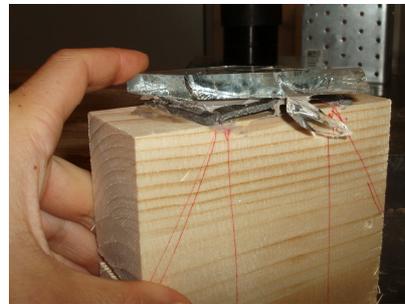


Abbildung 11: Schrägansicht eines bis zum Versagen belasteten Versuchskörpers

3.2.1.3 Ergebnisse aus den Versuchen

Die Auswertung der Versuchswerte kann in der Diplomarbeit „Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Holz-Glas-Verbundplatten“ von Michael Fuchs nachgelesen werden.

(Fuchs, M. (2011))

3.2.2 Verschiebungsmodul K_{ser}/k_s – Versuche

Der Verschiebungsmodul wird im EUROCODE 5 mit K_{ser} und in der ÖNORM EN 26 891 mit k_s bezeichnet. Bei den untersuchten Verbindungsmitteln handelt es sich um Squatec Senkkopfschrauben 5,0 x 80.

3.2.2.1 Ermittlung des Verschiebungsmoduls k_s im Versuch nach EN 26 891

Bei den Versuchen wurde der Verschiebungsmodul k_s von Senkkopfschrauben im Zuge von Abscherversuchen ermittelt.

3.2.2.1.1 Herstellung der Proben

Jede der sechs Proben wurde aus zwei Teilstücken Birkenfurniersperrholz und einem Mittelstück aus Kerto-Q, bestehend aus finnischer Fichte, hergestellt.

Alle der insgesamt 18 Teilstücke wurden gewogen, ihre Dichte berechnet und ihr Feuchtegehalt bestimmt. Laut ÖNORM EN 26 891 soll die Klimatisierung vor Herstellung und Prüfung des Probekörpers derart erfolgen, dass die Prüfbedingungen mit jenen im Bauwerk übereinstimmen.



Abbildung 12: Holzfeuchtemessung

Drei der Teilstücke aus Kerto-Q wurden beidseitig mit Teflonfolie beklebt, welche die Reibung zwischen Mittel- und Randholz verhindern sollte. Der Vergleich zwischen den beklebten und nicht beklebten Probestücken sollte den Einfluss der Reibung zwischen den Hölzern zeigen.

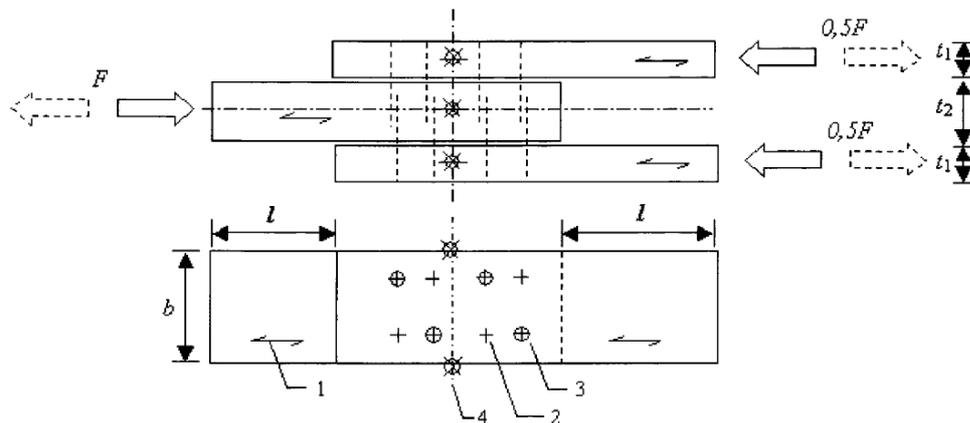


Abbildung 13: Aufkleben der Teflonfolie auf die Probesteile



Abbildung 14: Mit Teflonfolie beklebtes und unbeklebtetes Probesteile

Das Teilstück Kerto-Q, mit den Abmessungen 70 x 100 x 550 mm, wurde zwischen den Randhölzern aus Birkenfurniersperrholz mit den Abmessungen 40 x 100 x 550 mm angebracht. Gemäß ÖNORM EN 1380 wurde mit einem Durchmesser von 3 mm vorgebohrt, um anschließend Mittelholz und Randhölzer mit insgesamt acht Senkkopfschrauben, vier auf jeder Seite, zu verbinden. Diese wurden im Versuch einschnittig belastet. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung der einschnittig belasteten acht Schrauben. Die überstehende Länge l wurde mit 50 mm gewählt.



Legende

- 1 Faserrichtung
- 2 nicht hervorstehendes Ende
- 3 hervorstehendes Ende
- 4 ⊕ Messpunkte zur Ermittlung der Verschiebung
- l freie Länge
- t_1 Breite der Seitenteile
- t_2 Mittelteil

Abbildung 15: Schematische Darstellung einer dreiteiligen Verbindung mit einschnittig belasteten Schrauben von jeder Seite nach (ÖNORM EN1380, S. 7)

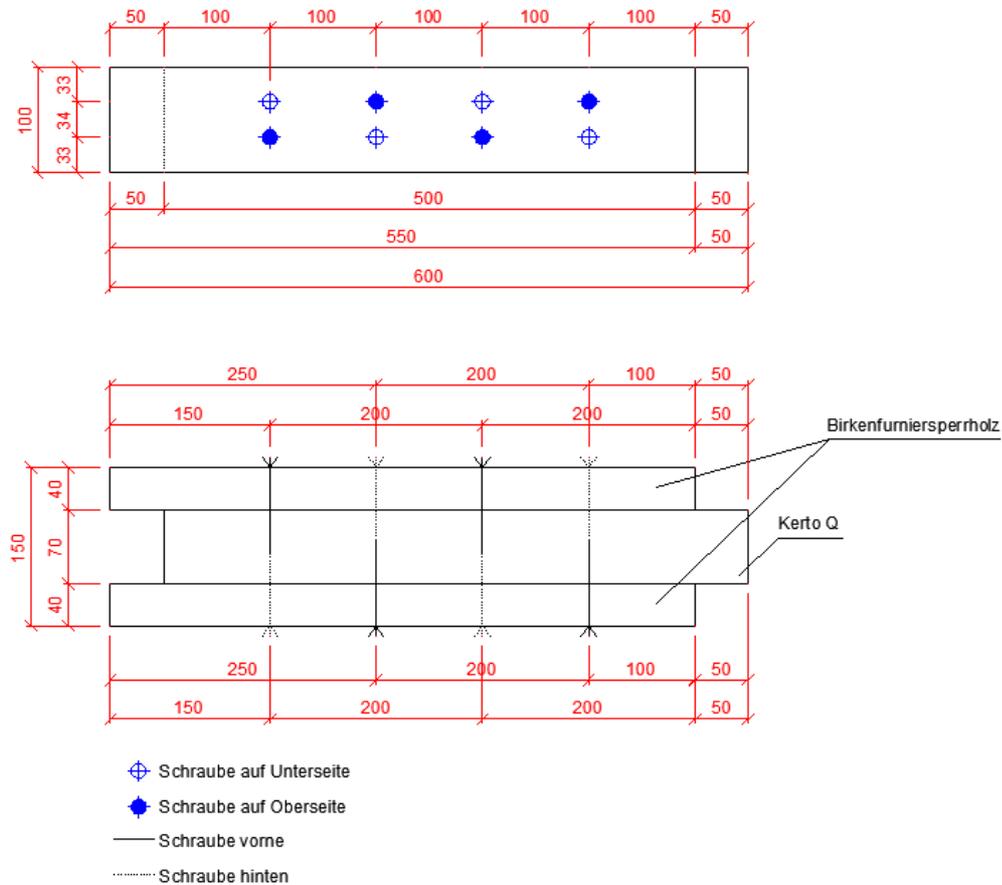


Abbildung 16: Grundriss und Ansicht der Probekörper zur Veranschaulichung des Schraubenbildes und der Maße

Probenzusammensetzung:									
Probe	Masse [kg]			Rohdichte ρ [kg/m ³]			Feuchtigkeit [%]		
	BFSH links	Kerto Q	BFSH rechts	BFSH links	Kerto Q	BFSH rechts	BFSH links	Kerto Q	BFSH rechts
1	1,425	1,920	1,430	647,727	498,701	650,000	13,70	11,63	15,07
2	1,430	1,950	1,435	650,000	506,494	652,273	14,30	12,30	14,03
3	1,455	1,955	1,455	661,364	507,792	661,364	15,17	11,67	14,77
4	1,460	1,965	1,465	663,636	510,390	665,909	15,43	11,07	13,77
5	1,470	1,990	1,470	668,182	516,883	668,182	15,60	11,65	14,93
6	1,480	1,990	1,485	672,727	516,883	675,000	13,60	10,55	14,40

Tabelle 1: Probenzusammensetzung

3.2.2.1.2 Prüfen der Proben und Berechnung des Verschiebungsmoduls k_s

Die Lastaufbringung in Faserrichtung durch die Prüfmaschine erfolgte gemäß den Angaben der ÖNORM EN 26 891. „Die Last ist bis auf $0,4 F_{est}$ aufzubringen und dort 30 s konstant zu halten. Die Last ist anschließend auf $0,1 F_{est}$ zu verringern und erneut 30 s konstant zu halten. Danach ist die Last zu steigern, bis die Bruchlast oder eine Verschiebung von 15 mm erreicht ist.“ (ÖNORM EN 26 891, S. 3) Folgende Abbildungen sollen das Belastungsverfahren und die idealisierte Last-Verschiebungskurve grafisch darstellen:

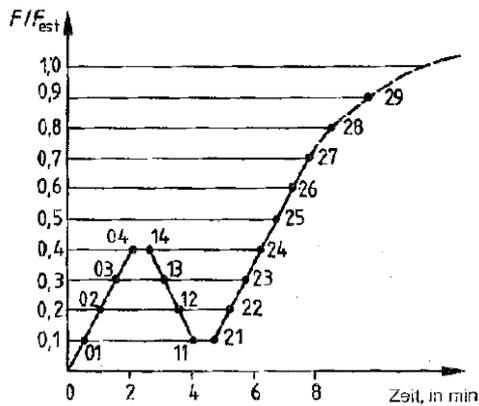


Abbildung 17: Belastungsverfahren
(ÖNORM EN 26 891, S. 3)

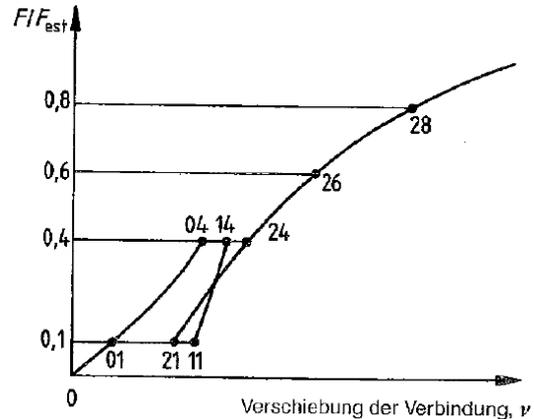


Abbildung 18: Idealierte Last-Verschiebungskurve und Messwerte
(ÖNORM EN 26 891, S. 3)

Nach der Norm wurde unterhalb von $0,7 \cdot F_{est}$ eine konstante Belastungsgeschwindigkeit von $0,2 \cdot F_{est}$ pro Minute gefahren. Oberhalb von $0,7 \cdot F_{est}$ war die konstante Geschwindigkeit so zu wählen, dass die Prüfung noch weitere 3-5 Minuten dauerte, bevor es zum Bruch oder einer Verschiebung von 15 mm kam.

(ÖNORM EN 26 891, S. 4)

Die Last und die jeweilige Verschiebung wurden von der Prüfmaschine gemessen. Um den Verschiebungsmodul zu berechnen, werden folgende Formeln angewendet

(ÖNORM EN 26 891, S. 4):

$$F_{est} = F_{v,Rk} \cdot n \quad (3.1)$$

$$v_{i,mod} = \frac{4}{3} \cdot (v_{04} - v_{01}) \quad (3.2)$$

$$k_s = \frac{0,4 \cdot F_{est}}{v_{i,mod}} \quad (3.3)$$

mit:

F_{est} geschätzte Höchstlast in N

$F_{v,Rk}$ charakteristischer Wert der Tragfähigkeit pro Scherfuge und Verbindungsmittel nach (EUROCODE 5, Kap. 8.2) in N

n Anzahl der Verbindungsmittel

v_{01}, v_{04} Verschiebung bei $0,1 \cdot F_{est}$ und $0,4 \cdot F_{est}$ in mm

$v_{i,mod}$ modifizierte Anfangsverschiebung in mm

k_s Verschiebungsmodul in N/mm, entspricht K_{ser} nach (EUROCODE 5)

Für den ersten Versuch wurde mit einer geschätzten Höchstlast F_{est} von 16 kN gerechnet. Dieser Wert wurde aufgrund des Ergebnisses von $F_{(v=15mm)} = 30,6$ kN beim Abdrücken des ersten Probestücks für alle fünf weiteren Probestücke auf $F_{est} = 30$ kN korrigiert.

	F_est [N]	v.01 [mm]	v.04 [mm]	F(v=15mm) [kN]	v_i,mod [mm]	ks_insges [N/mm]	ks_je Schraube u Scherfuge [N/mm]
Probe 1 mit Teflon	16000	0,738	1,347	30,600	0,812	7881,77	985,22
Probe 2	30000	0,819	2,411	34,653	2,123	5653,27	706,66
Probe 3 mit Teflon	30000	0,951	2,407	30,430	1,941	6181,32	772,66
Probe 4	30000	0,306	1,533	35,459	1,636	7334,96	916,87
Probe 5 mit Teflon	30000	0,306	1,828	29,727	2,029	5913,27	739,16
Probe 6	30000	0,267	1,590	36,049	1,764	6802,72	850,34

Proben mit Teflon:	Mittelwert von ks [N/mm]	832,35
	Standardabweichung von ks [N/mm]	133,45
Proben ohne Teflon:	Mittelwert von ks [N/mm]	824,62
	Standardabweichung von ks [N/mm]	107,44

Tabelle 2: Messwerte aus den Abscherversuchen

Der Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen der Proben mit und ohne Teflonfolie zeigt, dass sich die Reibung zwischen dem Mittel- und Randholz nur marginal auf den Verschiebungsmodul k_s auswirkt.

Das von der Prüfmaschine beim Abdrücken der Probekörper aufgezeichnete Kraft-Weg Diagramm wird in folgender Abbildung dargestellt.

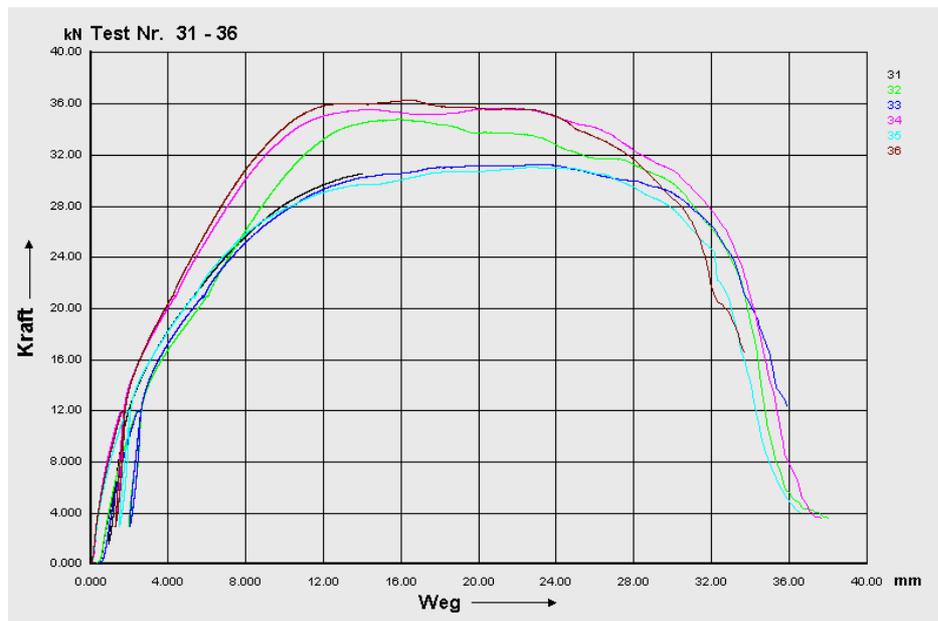


Abbildung 19: Kraft-Weg Diagramm der Messwerte

Nachfolgende Abbildungen zeigen Aufnahmen der Probekörper während und nach den Versuchsdurchführungen.



Abbildung 20: Probekörper in der Prüfmaschine



Abbildung 21: Ein bis zum Versagen belasteter Probekörper

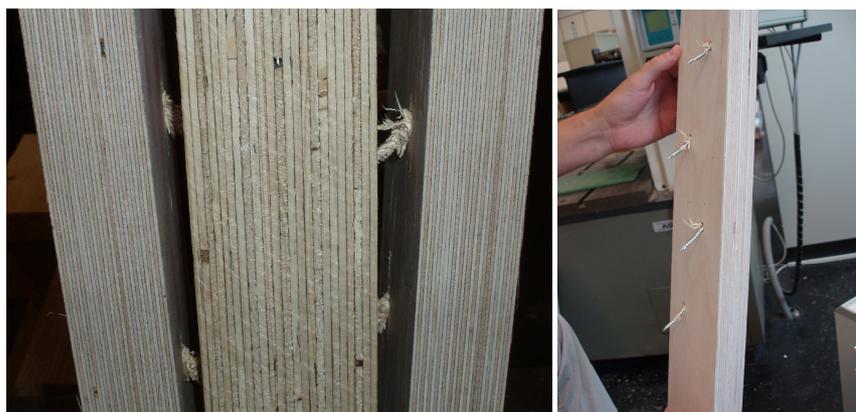


Abbildung 22: Nahaufnahme verformter Schrauben

Nach dem Abdrücken der Probekörper zeigten sich leichte Einpressungen infolge der Schraubenverformung im Birkenfurniersperrholz (Randhölzer) und deutliche Einpressungen im Kerto-Q (Mittelholz). Dies lässt auf einen Versagensfall c oder e nach (EUROCODE 5, Kap. 8.2) schließen.

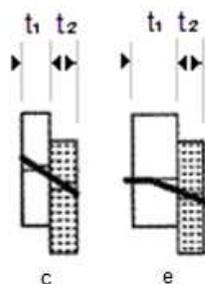


Abbildung 23: Mögliche Versagensmechanismen der Schrauben

3.2.2.2 Berechnung des Verschiebungsmoduls K_{ser} nach EUROCODE 5

Birkenfurniersperrholz		Masse	Volumen	Dichte ρ	Feuchtigkeit
		[kg]	[m ³]	[kg/m ³]	%
1	1,425	0,0022	647,727	13,70	
2	1,430	0,0022	650,000	15,07	
3	1,430	0,0022	650,000	14,30	
4	1,435	0,0022	652,273	14,03	
5	1,455	0,0022	661,364	15,17	
6	1,455	0,0022	661,364	14,77	
7	1,460	0,0022	663,636	15,43	
8	1,465	0,0022	665,909	13,77	
9	1,470	0,0022	668,182	15,60	
10	1,470	0,0022	668,182	14,93	
11	1,480	0,0022	672,727	13,60	
12	1,485	0,0022	675,000	14,40	
		Mittelwert ρ_{BFSH}	661,364		

Kerto Q (finn. Fichte)		Masse	Volumen	Dichte ρ	Feuchtigkeit
		[kg]	[m ³]	[kg/m ³]	%
1	1,990	0,0039	516,883	10,55	
2	1,990	0,0039	516,883	11,65	
3	1,965	0,0039	510,390	11,07	
4	1,955	0,0039	507,792	11,67	
5	1,950	0,0039	506,494	12,30	
6	1,920	0,0039	498,701	11,63	
		Mittelwert ρ_{KertoQ}	509,524		

Tabelle 3: Gemessene Werte der Probestücke

$$\rho_{BFSH} = 661,364 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{Kerto-Q} = 509,524 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 5 \text{ mm}$$

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{BFSH} \cdot \rho_{KertoQ}} = 580,5 \text{ kg/m}^3 \quad (3.4)$$

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \cdot \frac{d}{23} = 3040,5 \text{ N/mm} \quad (3.5)$$

(EUROCODE 5, Kap 7.1)

mit:

ρ_{BFSH} Rohdichte von Birkenfurniersperrholz in kg/m³

$\rho_{Kerto-Q}$ Rohdichte von Kerto-Q in kg/m³

ρ_m Mittelwert der Rohdichte in kg/m³

d Schraubendurchmesser in mm

K_{ser} Verschiebungsmodul in N/mm

3.2.2.3 Vergleich der Verschiebungsmodule

Das Vergleichen der Werte von k_s mit K_{ser} macht deutlich, dass K_{ser} rund 3,7-mal so groß ist wie k_s . Dieser große Unterschied zeigt, dass die Formel nach EUROCODE 5

nicht ideal für diese Probe ist. Der Grund dafür liegt darin, dass der EUROCODE 5 von Probestücken aus Vollholz ausgeht, bei diesem Versuch jedoch Birkenfurniersperrholz und Kerto-Q zum Einsatz kamen. Beide dieser Hölzer bestehen aus verleimten Schichten, die teilweise um 90° gedreht und daher weicher als Vollholz sind, da sie quer zur Faser belastet werden.

Ein weiterer möglicher Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse von k_s und K_{ser} könnte in der Verschraubung der Senkkopfschrauben liegen. Laut EUROCODE 5 soll der Senkkopf nicht bis ins Holz geschraubt werden. Bei den Kleinprobenversuchen wurde dieser jedoch vollständig in das Holz geschraubt, um dieselbe Verschraubung zu prüfen, die später bei den Großproben zum Einsatz kam.

Für Berechnungen in den folgenden Kapiteln wurde der Verschiebungsmodul in Anlehnung an die Messwerte aus den Abscherversuchen (siehe Tabelle 2) mit 8,25 kN/cm gewählt.

3.3 Großprobenversuche

In diesem Kapitel werden zuerst die für die Großproben verwendeten Materialien und anschließend die Herstellung der Schubfeldträger erläutert. Anschließend werden der Versuchsablauf und die daraus gewonnenen Ergebnisse beschrieben.

3.3.1 Ausgangsstoffe

3.3.1.1 Holz

- Birkenfurniersperrholz

Birkenfurniersperrholz wird aus mehreren miteinander verleimten Schichten aus Birkenfurnieren, mit einer Dicke von 1,4 mm, hergestellt. Es besitzt einen Elastizitätsmodul von $E_{BFSH} = 892,5 \text{ kN/cm}^2$ und einen Schubmodul von $G_{BFSH} = 18,5 \text{ kN/cm}^2$.

(Howebo GmbH: Birke)

(Verband der finnischen Forstindustrie)

(Finnforest Deutschland GmbH: Birkenperrholz)

- Kerto-Q

Als Kerto-Q wird aus finnischer Fichte hergestelltes Furnierschichtholz mit kreuzweise verleimten Lagen bezeichnet. Durch das Reduzieren von natürlichen Fehlstellen im Holz bei der Herstellung wird der Werkstoff vergütet. Daraus ergibt sich ein Baustoff mit höheren Festigkeiten und verminderter Quell- und Schwindverformung. Der Faserverlauf verläuft vorwiegend in Längsrichtung und nur zu ca. 20 % in Querrichtung. Kerto-Q besitzt eine Rohdichte von $\rho_{Kerto-Q} = 480 \text{ kg/m}^3$, einen Elastizitätsmodul von $E_{Kerto-Q} = 1050 \text{ kN/cm}^2$ und einen Schubmodul von $G_{Kerto-Q} = 50 \text{ kN/cm}^2$.

(Finnforest Deutschland GmbH: Kerto®)

(Finnforest Deutschland GmbH: Technische Daten, S. 10)

3.3.1.2 Teilvorgespanntes Glas (TVG)

Dieses Produkt ist ein thermisch vorgespanntes Glas, bei dem durch eine Wärmebehandlung die Vorspannung erzielt wird. Bei der Herstellung wird die Glasscheibe gleichmäßig auf über 600 °C auf Temperaturen zwischen dem Transformations- und dem Erweichungspunkt erhitzt. So werden innere Spannungen abgebaut und das Glas wird spannungsfrei. Die Vorspannungen entstehen durch rasches Abkühlen mit kalter Luft. Daraus folgt eine schnellere Abkühlung der äußeren Zonen im Gegensatz zum Scheibenkern. Die Behinderung des Zusammenziehens des Kerns durch die bereits verfestigten äußeren Zonen führt zu Druckspannungen an der Glasoberfläche und Zugspannungen im Glasinneren, wie in Abbildung 24 dargestellt wird. TVG besitzt eine Druckfestigkeit von 700 – 900 N/mm², einen Elastizitätsmodul von $E_{\text{TVG}} = 7300 \text{ kN/cm}^2$ und einen Schubmodul von $G_{\text{TVG}} = 2800 \text{ kN/cm}^2$.

(Wagner, E. (2008), S. 12, 81, 85)

(Kreuzinger, H., Niedermaier, P. (2005), S. 8)

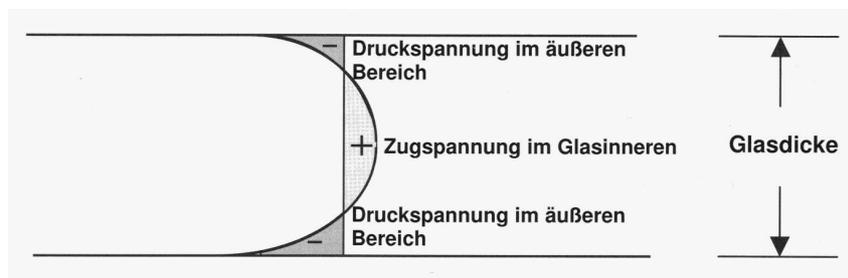


Abbildung 24: Spannungsverlauf im teilvorgespannten Glas (Wagner, E. (2008), S. 85)

3.3.1.3 Klebstoff

- Zweikomponentenkleber auf Acrylatbasis



Abbildung 25:
Zweikomponenten
Acrylatklebstoff

3.3.1.4 Verbindungsmittel

- Winkel:

L 60/60/2,5/40 aus Lochblech
mit der Stahlgüte S 250

Dieser gleichschenkelige Winkel wird zur Verbindung von zwei Holzbauteilen unter einem Winkel von 90° eingesetzt. Der Winkel kann mit bis zu 5 Schrauben pro Schenkel fixiert werden.

- Schrauben:
 - 5,0 x 80 Squaretec Senkkopfschrauben
 - 5,0 x 50 Squaretec SenkkopfschraubenDiese Schrauben der Firma Haberkorn Ulmer kommen bei der Verbindung zweier Holzbauteile zum Einsatz.

3.3.1.5 Reinigungsmittel

Dieser Reiniger kommt zur Vorbereitung von Oberflächen vor dem Auftragen von Klebstoffen zum Einsatz und wurde mit dem verwendeten Zweikomponentenklebstoff mitgeliefert.



Abbildung 26:
Reinigungsmittel

3.3.1.6 Montageklebeband

DuploCOLL:

DuploCOLL ist ein hochbelastbares, doppelseitiges Montageklebeband aus geschlossenzelligem Polyethylen-Copolymerschaum der Firma Lohmann.



Abbildung 27: Duplo-COLL Montageklebeband

3.3.2 Herstellung der Großproben

Bei der Produktion der Großproben wurden im ersten Arbeitsschritt Holz-Glas-Verbundelemente hergestellt. Im zweiten Arbeitsschritt wurden Rahmen aus dem Holzwerkstoff Kerto-Q mit sechs rechteckigen Feldern angefertigt, an welche im letzten Arbeitsschritt beidseitig die Holz-Glas-Verbundelemente geschraubt wurden. Diese drei Schritte der Produktion werden im Folgenden genauer erklärt.

3.3.2.1 Herstellung der Holz-Glas-Verbundelemente für den Schubfeldträger

Für die Holz-Glas-Verbundelemente wurde Teilvorgespanntes Glas (TVG) mit geschliffenen Kanten der Maße 8 x 625 x 1250 mm verwendet. Dieses wurde auf einen Arbeitstisch mit daran befestigten Holzklötzchen aufgelegt. Die Holzklötzchen dienen der Lagesicherung der Glasscheibe sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung. Die Glasscheibe wurde zur Vorbereitung für die Schubverklebung mit einem Reiniger behandelt. Vor dem Anbringen der Koppelleisten auf der Glasscheibe wurde diese anhand von Markierungen auf dem Arbeitstisch und Abstandhaltern der Breite 6 mm ausgerichtet.

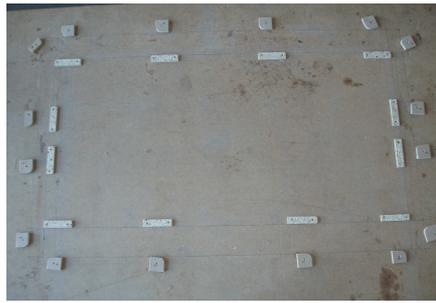


Abbildung 28: Arbeitstisch mit Holzklötzchen zur Ausrichtung der Elemente

Bevor die Koppelleisten ebenfalls auf dem Arbeitstisch in Position gebracht werden konnten, wurde auf diesen DuploCOLL, ein 10 mm breites und 3,3 mm dickes Montageklebeband, angebracht. Durch leichtes Zusammendrücken des Montageklebebandes wurde so ein Abstand zwischen Glas und Koppelleiste bzw. eine Klebefugendicke von 3 mm gewährleistet. Gleichzeitig diente dieses Band auch der Begrenzung der Klebefuge auf die gewünschte Breite von 14 mm.



Abbildung 29: Gurt-Koppelleiste (an OG und UG) mit gelbem Montageklebeband



Abbildung 30: Pfosten-Koppelleiste mit gelbem Montageklebeband (innerhalb des Trägers)



Abbildung 31: Randpfosten-Koppelleiste mit gelbem Montageklebeband (am Rand des Trägers)

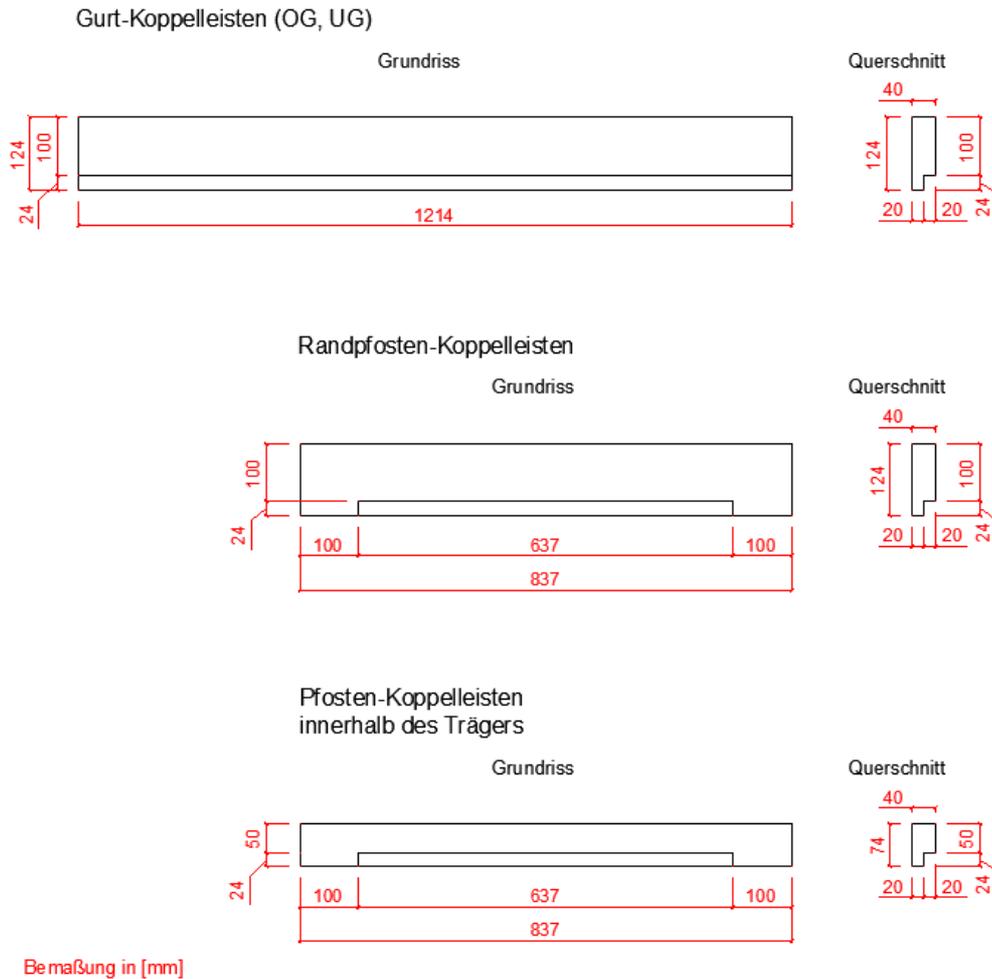


Abbildung 32: Bemaßung der Koppelleisten

Die aus Birkenfurniersperrholz bestehenden Koppelleisten konnten anschließend an allen vier Seiten der Glasscheibe positioniert werden. Mittels der Holzklötzchen auf dem Arbeitstisch wurde die Lage der vier Koppelleisten nachjustiert und gleichzeitig wurden diese fixiert. So sollte ein Verrutschen der Elemente während der weiteren Arbeitsvorgänge verhindert werden. Anschließend wurde die Glasoberfläche an den Rändern mit Klebeband versehen, um eine Verunreinigung der Glasscheibe mit Acrylat zu verhindern.

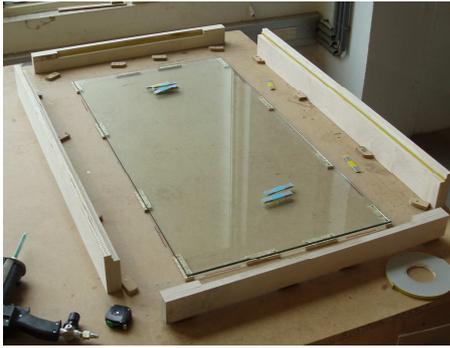


Abbildung 33: Glasscheibe mit Koppelleisten und Abstandhaltern, bereit zur Positionierung



Abbildung 34: Um die Glasscheibe mit Klebeband angeordnete und bereits fixierte Koppelleisten, bereit zum Verpressen der Klebefugen

Das für die Schubverklebung verwendete Acrylat besteht aus zwei farblich unterschiedlichen Komponenten. Vor der Verwendung des Acrylats musste der „Butterfly Test“ durchgeführt werden. Dabei wurde eine rund 20 cm lange Spritzprobe auf einen Karton aufgetragen. Dieser wurde zusammen- und auseinander gefaltet, wodurch sich die Spritzprobe ausbreiten und vermischen sollte. Waren nun noch Farbunterschiede in der Probe zu erkennen, deutete dies auf eine unzureichende Vermischung der Komponenten hin. Der Test wurde solange wiederholt, bis der Kleber eine einheitlich graue Farbe annahm. Mit einer Druckluftpistole wurde das Acrylat in die Fuge zwischen Holz und Glas gepresst und das überschüssige Material mit einer Spachtel entfernt. Durch Abziehen des Klebebandes nach der Verklebung entstand ein glatter Rand der Klebefuge die eine Breite von 14 mm aufwies.

Nach einer Aushärtungszeit von 30 Minuten konnte das Holz-Glas-Verbundelement vom Arbeitstisch entfernt werden.



Abbildung 35: Butterfly Test



Abbildung 36: Druckluftpistole



Abbildung 37: Verfüllung der Schubklebefuge mit Acrylat



Abbildung 38: Entfernung des überschüssigen Acrylats mit einer Spachtel

Abbildung 39 verdeutlicht die Anordnung der Koppelleisten zueinander, innerhalb eines Holz-Glas-Verbundelements. Dabei ist jedoch anzumerken, dass im Zuge des Herstellungsprozesses ein Element, ausschließlich bestehend aus Koppelleisten ohne Glasscheibe, nicht zusammengefügt wurde. Diese Abbildung dient lediglich der Veranschaulichung.

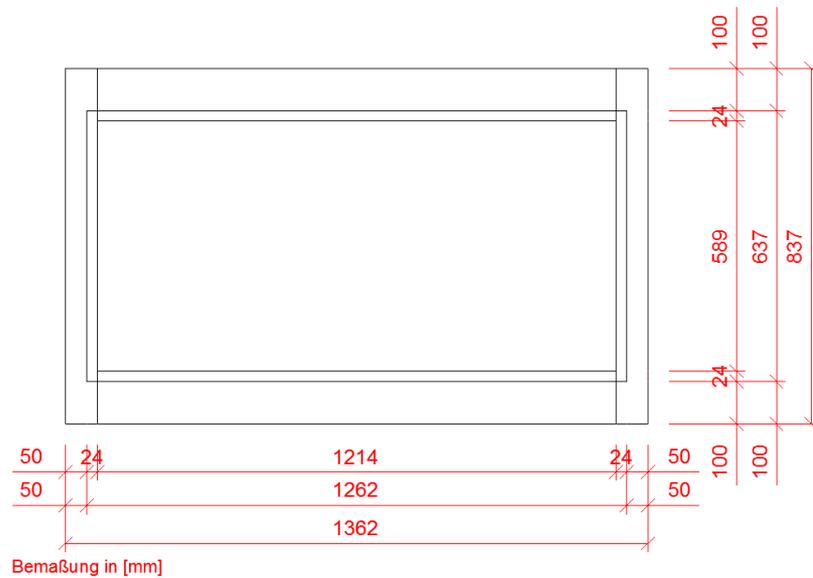


Abbildung 39: Darstellung der zusammengefügteten Koppelleisten, ohne Glasscheibe

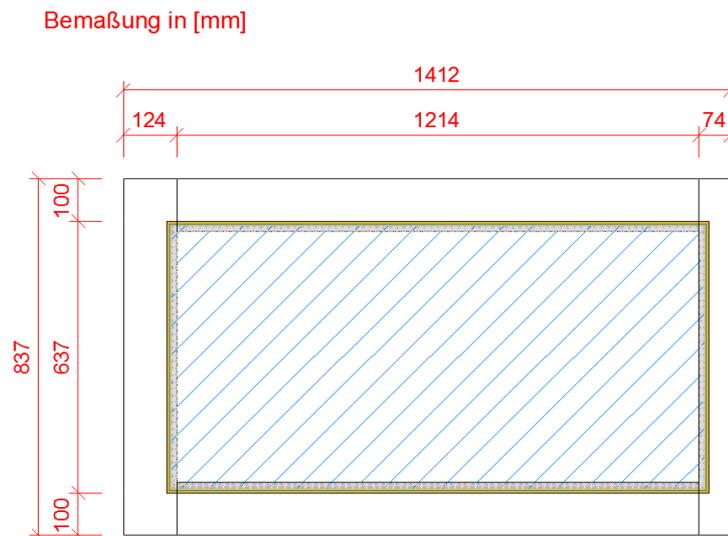


Abbildung 40: Ansicht eines Holz-Glas-Verbundelements eines Träger-Randfeldes

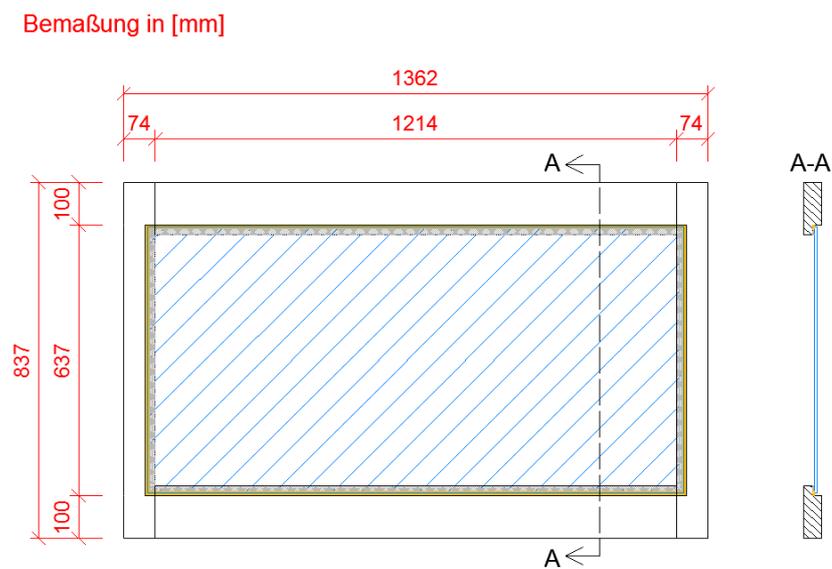


Abbildung 41: Ansicht und Schnitt eines Holz-Glas-Verbundelements eines Träger-Mittelfeldes

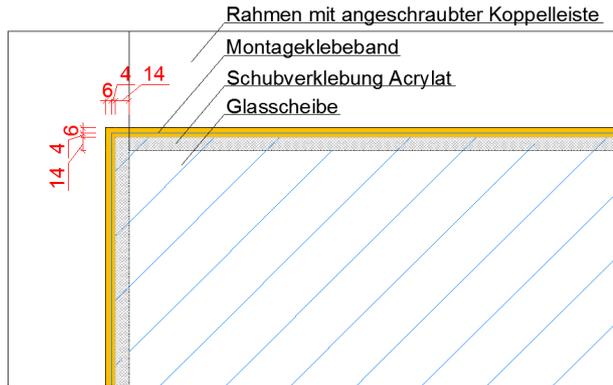


Abbildung 42: Detail einer Rahmenecke des Holz-Glas-Verbundschubfeldträgers (Bemaßung in mm)

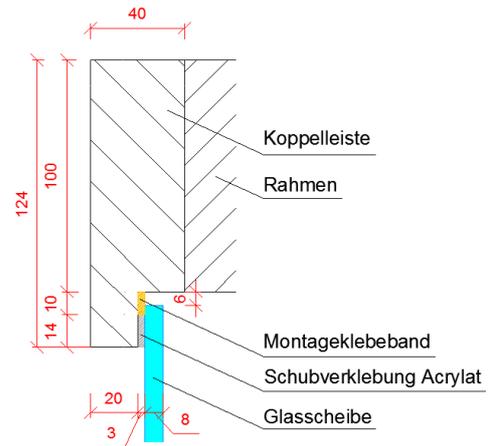


Abbildung 43: Detail eines Schnitts durch die Koppelleiste und anschließende Teile (Bemaßung in mm)

3.3.2.2 Probleme bei der Herstellung der Holz-Glas-Verbundelemente

Beim Auftragen der Schubverklebung trat bei einigen Elementen eine unzureichende Verfüllung der Klebefuge auf. Da die Elemente bis zur Aushärtung der Schubverklebung nicht bewegt werden durften und somit nicht sofort kontrolliert werden konnten, war ein nachträgliches Verkleben nötig. Dazu wurde die schon ausgehärtete Klebefuge im Abstand von ca. 25 cm vorsichtig mit Nagel und Hammer perforiert. Anschließend wurde der Hohlraum mit dem Zweikomponenten Acrylatklebstoff ausgefüllt.



Abbildung 44: Fehlstelle in der Schubverklebung (Montageklebeband in gelb, Acrylat in grau)



Abbildung 45: Anbohren der Schubverklebung



Abbildung 46: Verpressen der Fehlstellen in der Schubverklebung

3.3.2.3 Herstellung des Rahmens

Der Holzrahmen wurde aus Kerto-Q hergestellt. Dazu wurden zwei 8,272 m lange Träger, die als Ober- und Untergurt dienen sollten, durch sieben 0,637 m lange Pfosten verbunden. In jedem Feld wurde in den vier Ecken jeweils ein Winkel L 60/60/2,5/40 der Stahlgüte S 250 + Z 275 angeordnet, dessen Schenkel mit drei Squaretec Senkkopfschrauben 5,0 x 50 mit den Gurten und drei Squaretec Senkkopfschrauben 5,0 x 80 mit den Pfosten verbunden wurden.

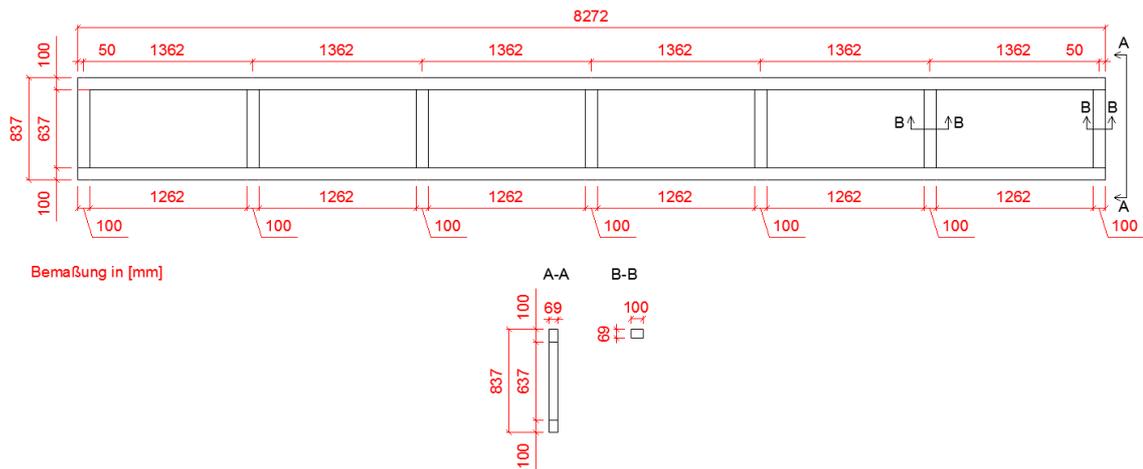


Abbildung 47: Ansicht und Schnitte des Rahmens



Abbildung 48: Fünf übereinandergestapelte Rahmen für Versuchsträger, die untersten drei davon für Schubfeldträger

3.3.2.4 Herstellung des gesamten Holz-Glas-Verbundträgers für Schubfeld-Versuche

Nach der Herstellung der einzelnen Elemente der Versuchsträger wurden diese zusammengefügt. Die Holz-Glas-Verbundelemente wurden vorgebohrt und anschließend mit 5,0 x 80 Squaretec Senkkopfschrauben auf den Rahmen geschraubt. Insgesamt wurden drei Schubfeldträger hergestellt, bei denen je Seite sechs Holz-Glas-

Verbundelemente am Rahmen angebracht wurden. In Abbildung 49, Abbildung 50 und Abbildung 51 sind die Anordnungen der Schrauben dargestellt.

Die Verschraubung erfolgte in den äußeren vier Feldern 1, 2, 5 und 6 zweireihig, in einem Abstand von 8 cm in Trägerlängsrichtung. Der Reihenabstand betrug 3,4 cm, wobei die Reihen in Längsrichtung um 4 cm versetzt angeordnet wurden. Die Koppelleisten der Rückseite wurden nach dem gleichen Schema, allerdings um 4 cm in Längsrichtung versetzt, verschraubt.

Die Koppelleisten der mittleren Felder wurden mit einer Schraubenreihe befestigt. Der Schraubenabstand in Trägerlängsrichtung betrug 8 cm, wobei die Schraubenachsen der vorderen und hinteren Koppelleiste um 1 cm vertikal versetzt waren.

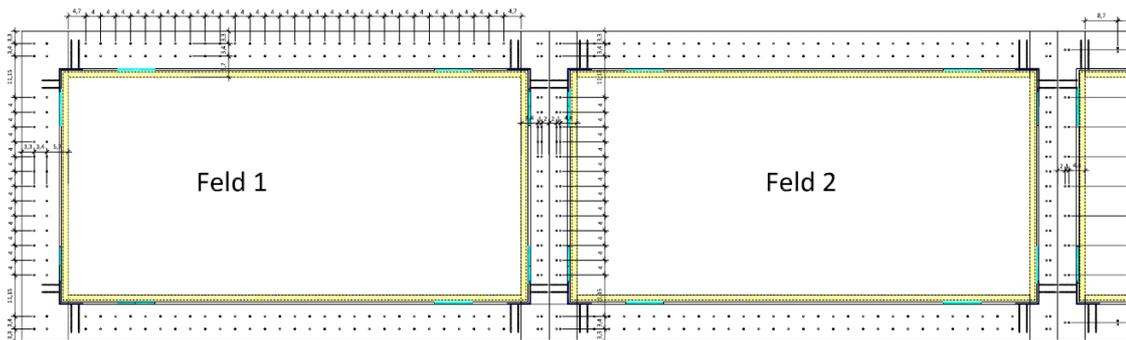


Abbildung 49: Anordnung der Schrauben in Feld 1 und Feld 2 (Randfelder) (Zeichnung: Weinlinger, T.)

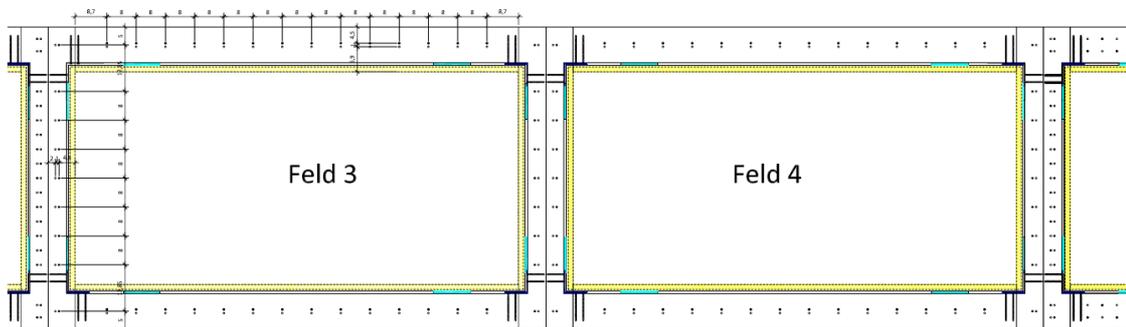


Abbildung 50: Anordnung der Schrauben in Feld 3 und Feld 4 (Mittelfelder) (Zeichnung: Weinlinger, T.)

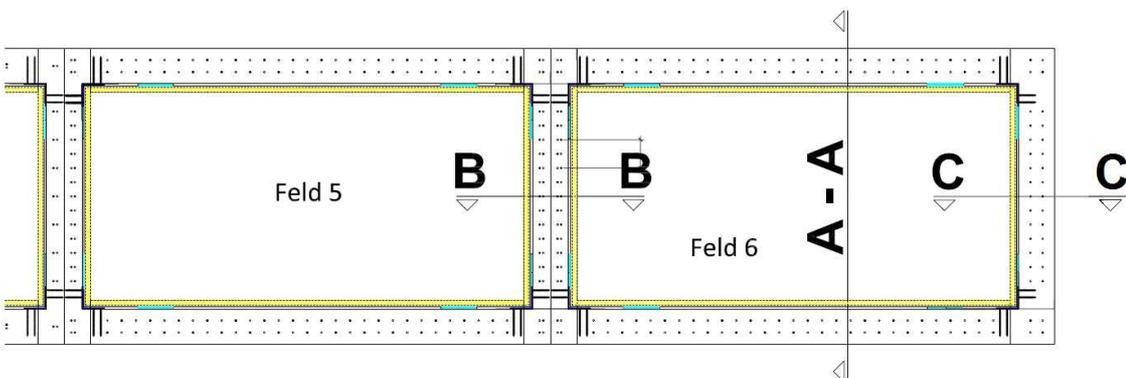


Abbildung 51: Anordnung der Schrauben in Feld 5 und Feld 6 (Randfelder) (Zeichnung: Weinlinger, T.)

Nachfolgende Abbildungen zeigen Aufnahmen des Herstellungsprozesses der Großproben an der Holzforschung Austria.



Abbildung 52: Auflegen der Holz-Glas-Verbundelemente auf den Rahmen



Abbildung 53: Arbeitsvorgang der Verschraubung



Abbildung 54: Zwei fertige Schubfeldträger

Die Maße der für die Großprobenversuche hergestellten Holz-Glas-Verbundträger werden im Folgenden in Ansicht und Schnitt dargestellt.

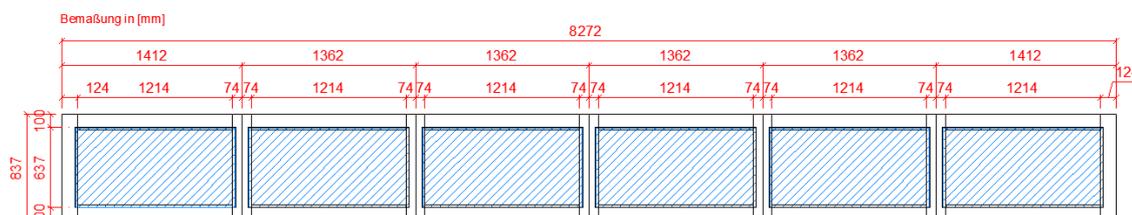


Abbildung 55: Maße des Holz-Glas-Verbundträgers (Schubfeldträger)

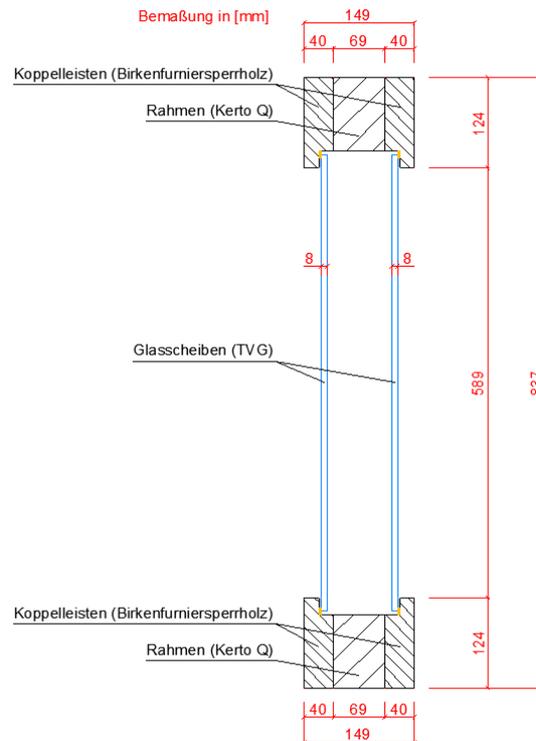


Abbildung 56: Schnitt durch den Holz-Glas-Verbundträger (Schubfeldträger)

3.3.2.5 Wirkung des Trägers

Durch den Aufbau des Rahmens ohne Diagonalen, jedoch mit nicht ideal gelenkiger Verbindung zwischen den Pfosten und Gurten ergab sich ein Vierendeelträger, an welchen die Holz-Glas-Verbundelemente angeschraubt wurden.

Bei der Belastung des Trägers im Zuge des Versuchs bildeten sich in den Holz-Glas-Verbundelementen Schubfelder aus. Die Vierendeelwirkung, welche durch die zwar kleinen, aber doch vorhandenen Winkel zur Verbindung von Pfosten und Gurten entstand, wird bei der Berechnung vernachlässigt. Ebenso wird die Durchlaufwirkung von Ober- und Untergurt als latenter Tragmechanismus angesehen. Der Träger wird als Schubfeldträger mit gelenkig verbundenen Stäben der Unterkonstruktion betrachtet.

3.3.3 Prüfen der Großproben im Vier-Punkt-Biegeversuch

An den drei hergestellten Schubfeldträgern wurden an der Holzforschung Austria in Wien Vier-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Die Großproben wurden auf gelenkige Auflager gesetzt und lediglich durch zwei Stahldreiecke pro Lager gegen Kippen gestützt. Dadurch konnten sich die Auflagerpunkte der Träger infolge der Durchbiegung horizontal frei bewegen. In der Trägermitte wurde mit Hilfe einer Holzkonstruktion ebenso das seitliche Ausweichen und Kippen des Trägers verhindert. Temporäre Unterstützungen entlang der Großproben während der Vorbereitungsarbeiten sollten ein Durchbiegen infolge Eigengewichts und Kriechen des Klebstoffs vor Versuchsbeginn verhindern. Diese wurden nach Abschluss der Vorbereitungen entfernt.

Anschließend wurden in drei Feldern des Trägers Messmittel in Form von Dehnmessstreifen (DMS) zur Messung von Verzerrungen (Dehnungen und Stauchungen) und induktive Wegaufnehmer (IWA) zur Ermittlung von Verschiebungen und Durchbiegungen am Träger angebracht. Die DMS wurden nach Säuberung der Glasscheibe mit Isopropylalkohol mit einem mitgelieferten Kleber direkt auf die Glasscheibe bzw. auf das Holz geklebt. Die IWA lieferten Verschiebungen infolge der Veränderungen der Lage ihrer Messfühler, die den Abstand zu Holzklötzchen feststellten.

In der Trägermitte wurde an Ober- und Untergurt jeweils ein DMS auf dem Rahmen befestigt. Weitere DMS wurden in den äußersten zwei Feldern an den vier Seiten der Glasscheibe angebracht. Um die Verschiebung zwischen Glas und Holz zu messen, wurden zwölf IWA an den Koppelleisten befestigt. Weitere IWA dienten zur Messung der Verschiebung zwischen den Koppelleisten und der Vertikalverschiebung des Trägers. In Abbildung 57 ist die Anordnung der Messmittel dargestellt.

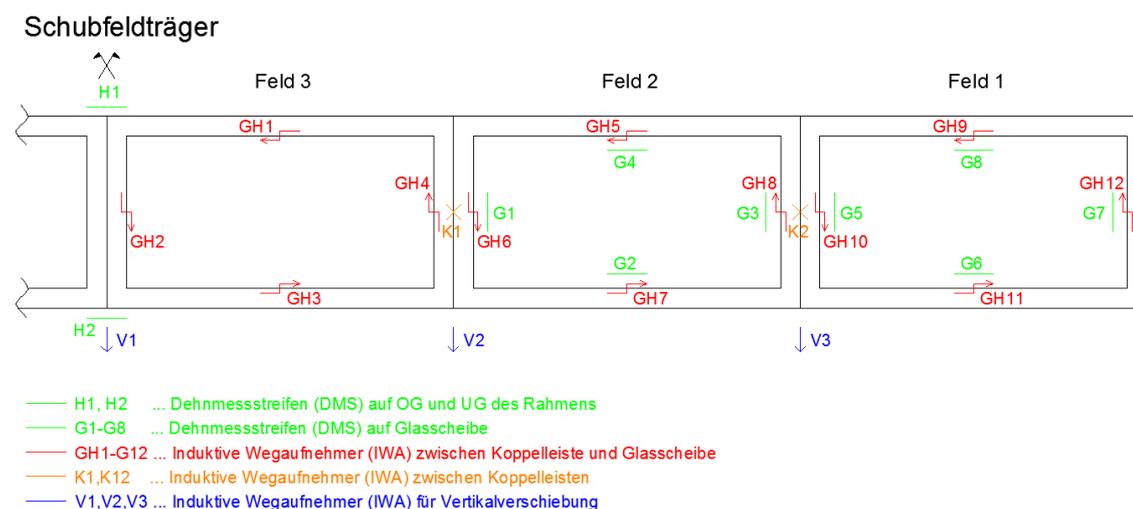


Abbildung 57: Nummerierung der Felder und Messmittelanordnung am Schubfeldträger, angebracht am halben System

Nachdem alle Vorbereitungen abgeschlossen waren und eine Vorlast von 50 N von der Presse aufgebracht worden war, begann der Vier-Punkt-Biegeversuch. Über zwei Druckzylinder wurde in den Drittelpunkten Kraft auf die Großproben ausgeübt und bis zum Versagen des Holz-Glas-Verbundträgers gesteigert. Da die Pressen weggesteuert waren und die Konstruktion durch die anisotropen Eigenschaften von Holz in den zwei Druckpunkten teilweise unterschiedliche Steifigkeiten vorwies, wurden zeitweise geringfügig unterschiedlich hohe Kräfte über die Druckzylinder auf den Träger aufgebracht.

Das Versagen trat jeweils im Untergurt durch Überschreitung der Zugfestigkeit auf. Bei zwei Trägern zeigte sich der Bruch im Drittelpunkt, beim dritten Träger in der Mitte. Bei zwei der drei Großproben kam es infolge des Untergurtversagens anschließend zum Abscheren des Obergurtes infolge Querkraft. Die Glasscheiben wiesen bei keinem der Versuchsträger Sprünge oder andere Anzeichen des Versagens auf.

Der in Abbildung 58 dargestellte Lastzyklus wurde im Zuge der Schubfeldträger – Versuche durchgeführt. Er wurde aus der DIN EN 595 als Zyklus für Fachwerkträger entnommen und für die Großprobenversuche modifiziert. Die Belastung erfolgte bis zu

denselben Laststufen wie in DIN EN 595 beschrieben, die Belastungsdauer wurde allerdings verringert.

Um die Steifigkeit des Gesamtsystems zu berechnen und die theoretische mit der realen Steifigkeit zu vergleichen, wird folgende Formel nach DIN EN 594 für Wandscheiben herangezogen:

$$R = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{F_4 - F_1}{v_{04} - v_{01}} + \frac{F_{24} - F_{21}}{v_{24} - v_{21}} \right) \quad (3.6)$$

mit:

- R Steifigkeit [N/mm]
- F Last [N]
- v Verformung [mm]

Aus den realen und theoretischen Verformungen der drei Versuche ergibt sich somit ein Mittelwert der Steifigkeit mit $R_{MW,real} = 1928,14 \text{ N/mm}$ und $R_{MW,theoretisch} = 1374,65 \text{ N/mm}$. Der reale Schubfeldträger erweist sich somit steifer als theoretisch berechnet.

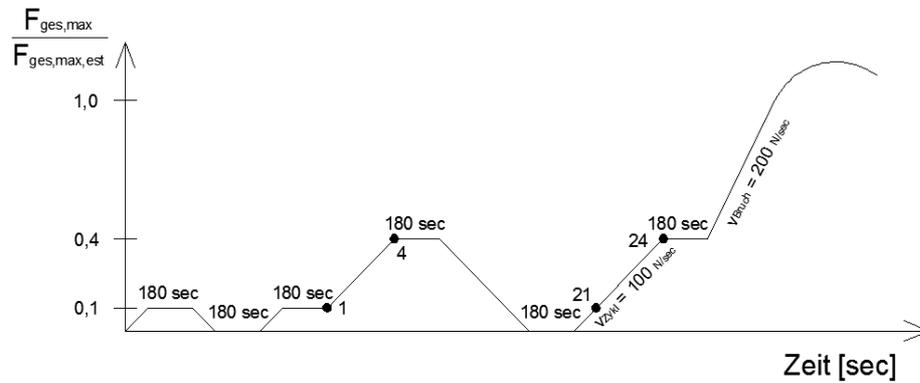


Abbildung 58: Lastzyklus der für die Schubfeldträger – Versuche angewendet wurde

- $F_{ges,max,est} = 45 \text{ kN}$
- 10 % von $F_{ges,max,est} = 4,5 \text{ kN}$
- 40 % von $F_{ges,max,est} = 18 \text{ kN}$
- $v_{zykl} = 100 \text{ N/sec}$
- $v_{Bruch} = 200 \text{ N/sec}$ (Hochhauser, W., et al (2011))

Abbildung 59 bis Abbildung 66 zeigen Detailaufnahmen der Vier-Punkt-Biegeversuche.



Abbildung 59: Stahl dreiecke am Auflager zur Sicherung gegen Kippen



Abbildung 60: Bewegliches Auflager



Abbildung 61: Holzkonstruktion in der Trägermitte zur Sicherung gegen Kippen



Abbildung 62: Druckzylinder, angreifend im Drittelpunkt auf den Träger

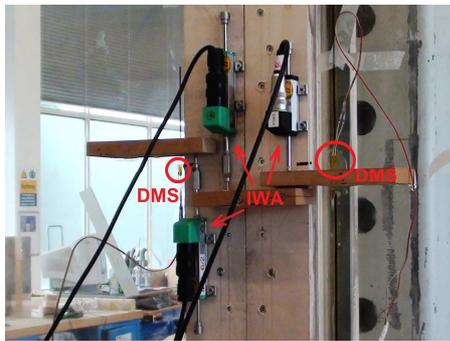


Abbildung 63: Messmittel (IWA und DMS)



Abbildung 64: Versagen des Trägers im Drittelpunkt

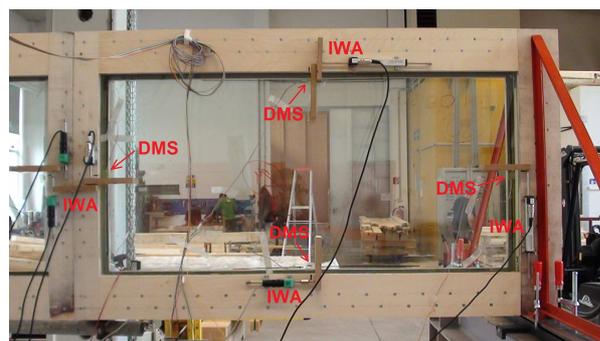


Abbildung 65: Messmittel im Randfeld

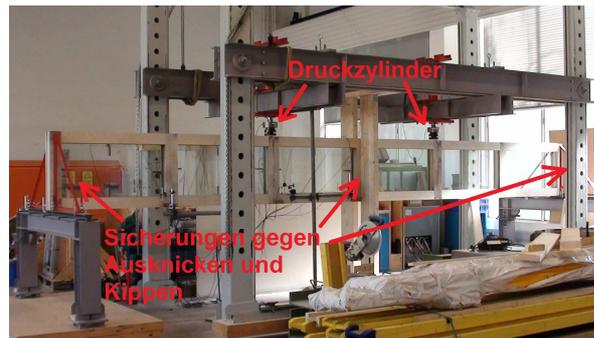


Abbildung 66: Gesamter Versuchsaufbau

3.3.4 Ergebnisse der Großprobenversuche

Die an den Großproben angeordneten Messmittel lieferten Daten zu den Verschiebungen einzelner Teile der Holz-Glas-Verbundträger zueinander. An den Schubfeldträgern angebrachte Dehnmessstreifen lieferten Dehnungen und Stauchungen am Ober- und Untergurt sowie an den vier Seiten der Glasscheiben. Induktive Wegaufnehmer maßen Verschiebungen zwischen den aneinanderliegenden Koppelleisten, zwischen Koppelleisten und Glasscheiben und die vertikale Verschiebung (= die Durchbiegung) des Trägers.

Die Werte der DMS wurden vom Computer in der Einheit mV ausgegeben und mit Hilfe des von der Holzforschung Austria in Wien zur Verfügung gestellten Korrekturfaktors 386,473 umgerechnet (siehe Anhang).

Die Anordnung der Messmittel sowie die Nummerierung der Felder lässt sich anhand Abbildung 57 nachvollziehen.

Die in den Diagrammen des Kapitels 3.3.4 aufgetragene Kraft F auf der Ordinatenachse stellt die gesamte auf das System aufgebrachte Last dar.

Die durchschnittliche Bruchlast der Schubfeldträger lag bei rund 121,82 kN, durch welche ein Versagen des Untergurts herbeigeführt wurde.

3.3.4.1 Kraft-Verschiebungsdiagramme: Durchbiegung des Trägers

Die folgenden vier Kraft-Verschiebungsdiagramme stellen grafisch die Durchbiegung in Trägermitte, im Drittel- und im Sechstelpunkt der Schubfeldträger in Abhängigkeit von der auf den Holz-Glas-Verbundträger aufgebrachten Gesamtlast dar. Infolge der Belastung auf 40 % mit anschließender Entlastung und darauffolgender Belastung bis zum Bruch im Zuge des Lastzyklus zeigt sich in der Kraft-Verschiebungskurve eine Schleife im Anfangsbereich. In der Trägermitte und im Trägerdrittelpunkt liegt nahezu dieselbe Durchbiegung vor. Hingegen weist der Sechstelpunkt einen deutlich geringeren Wert auf, der nur knapp über der Hälfte der Durchbiegung im Halbierungspunkt liegt. Plötzliche Knicke in der Verschiebungskurve und bei steigender Last konstant bleibende Durchbiegungen ergeben sich durch nicht ideale Anbringung der induktiven Wegaufnehmer an den Versuchsträgern. (vgl. Hochhauser, W., et al (2011)) Die maximale Durchbiegung in der Trägermitte wurde bei allen drei Schubfeldträgern korrekt gemessen und ergibt im Durchschnitt von 77,9 mm. Die für einen Gebrauchstauglichkeitsnachweis wichtige Durchbiegung von $L/300$ von 27,6 mm

wird bei durchschnittlich 45,60 kN erreicht. Der Wert $L/300$ wurde gemäß (EUROCODE 5, Tabelle 7.2) für die maximal zulässige Durchbiegung für beidseitig aufgelagerte Biegestäbe gewählt.

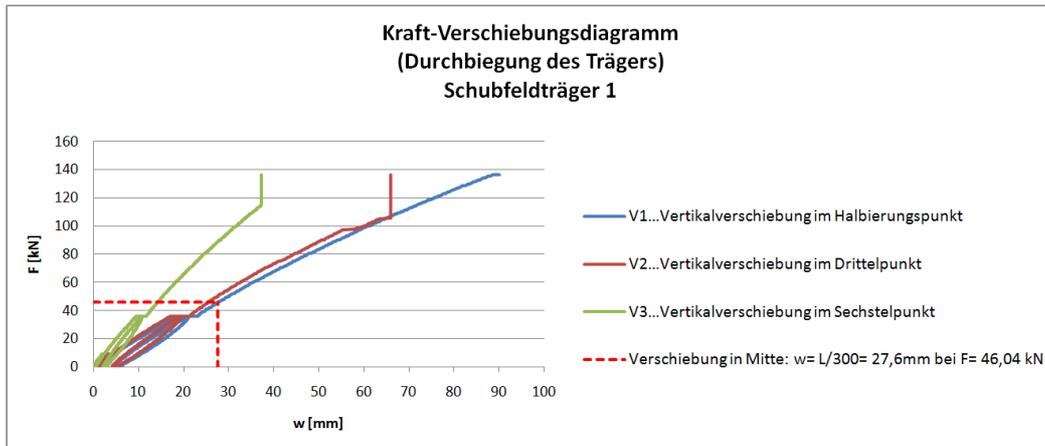


Abbildung 67: Durchbiegung des Trägers im Halbierungs-, Drittel- und Sechstelpunkt (Schubfeldträger 1)

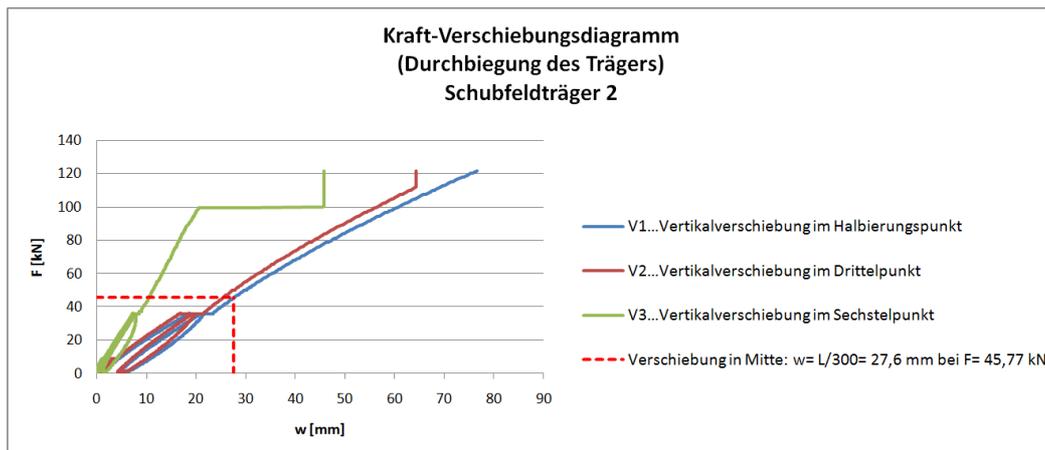


Abbildung 68: Durchbiegung des Trägers im Halbierungs-, Drittel- und Sechstelpunkt (Schubfeldträger 2)

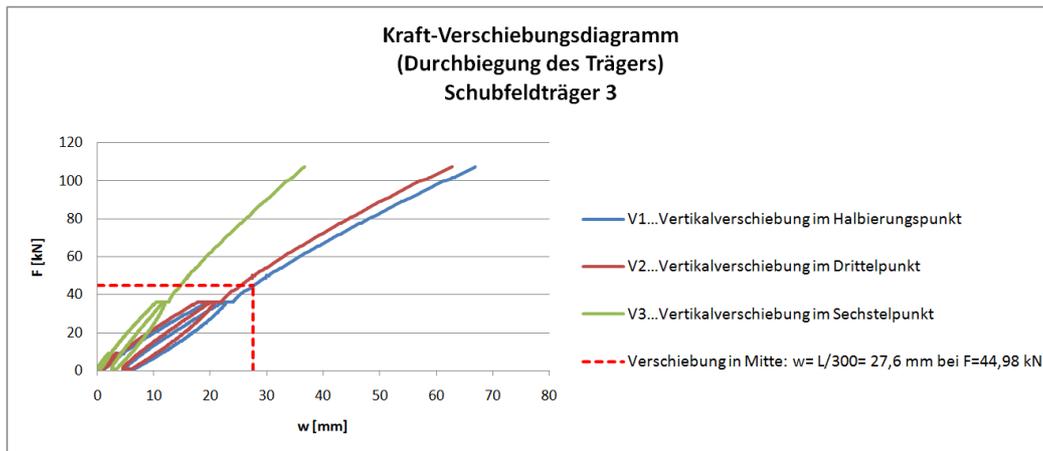


Abbildung 69: Durchbiegung des Trägers im Halbierungs-, Drittel- und Sechstelpunkt (Schubfeldträger 3)

Das Diagramm in Abbildung 70 zeigt den über alle drei Schubfeldträger gemittelten Verlauf der Durchbiegungen wiederum im Halbierungs-, Drittel- und Sechstelpunkt des Trägers. In diesem Diagramm wurden die Durchbiegungswerte bei Lasten über 99,19 kN weggelassen, da bei größeren Kräften nicht alle IWA korrekte Werte lieferten und so eine Mittelung inkorrekte Ergebnisse liefern würde.

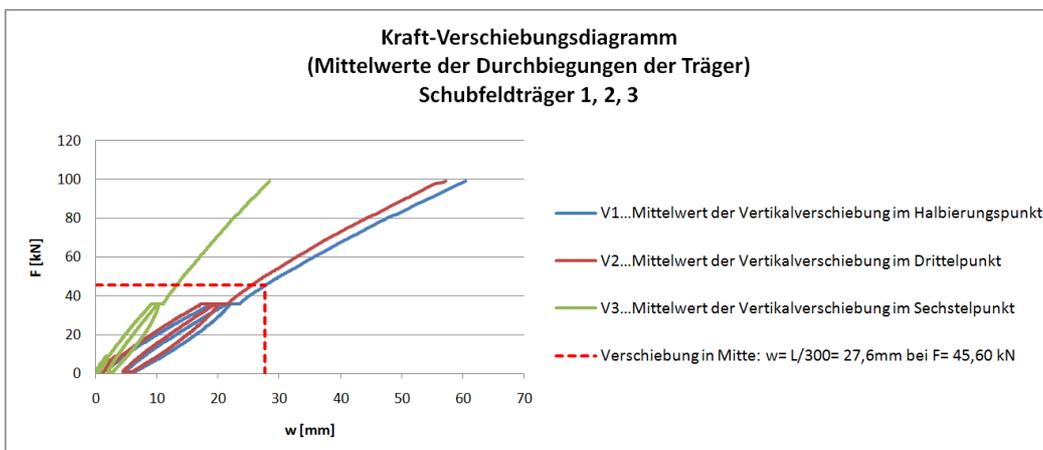


Abbildung 70: Mittelwerte der Durchbiegungen im Halbierungs-, Drittel- und Sechstelpunkt

3.3.4.2 Kraft-Verschiebungsdiagramme: Relativverschiebungen zwischen den Koppelleisten

In den folgenden drei Diagrammen (Abbildung 74 bis Abbildung 76) werden die Relativverschiebungen zwischen aneinanderliegenden Koppelleisten der drei Schubfeldträger grafisch dargestellt. Die Belastung auf 40 % der geschätzten Maximallast mit darauffolgender Entlastung lässt sich in allen drei Diagrammen deutlich durch eine Schleife in der Last – Verschiebungskurve erkennen.

Jene Relativverschiebungen, welche bei der Bruchlast sowie bei der Kraft, bei der eine Durchbiegung von $L/300 = 27,6$ mm auftritt, ergeben, sind in den Abbildungen eingezeichnet.

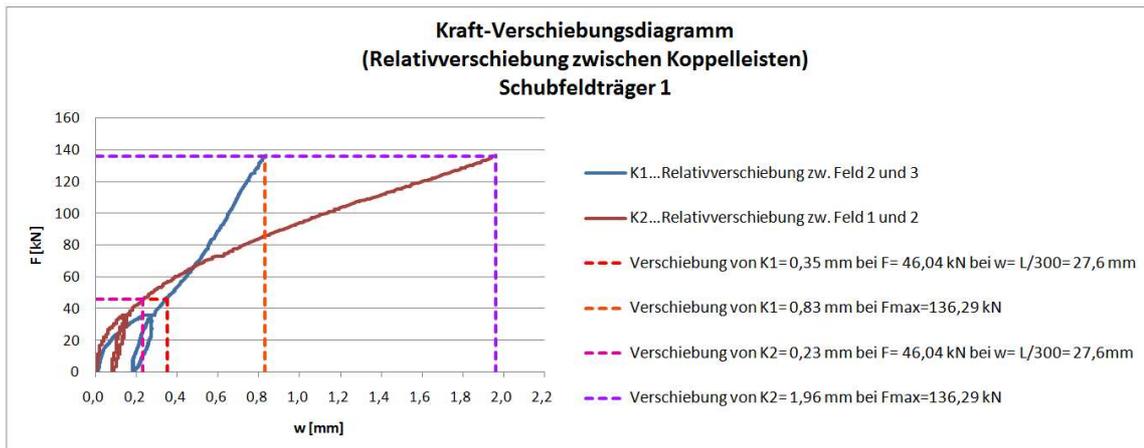


Abbildung 71: Relativverschiebung zwischen den Koppelleisten (Schubfeldträger 1)

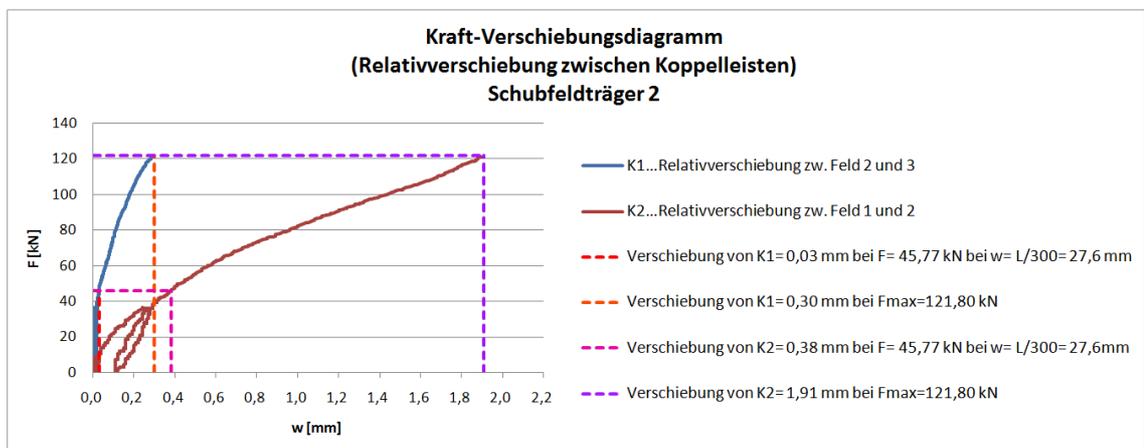


Abbildung 72: Relativverschiebung zwischen den Koppelleisten (Schubfeldträger 2)

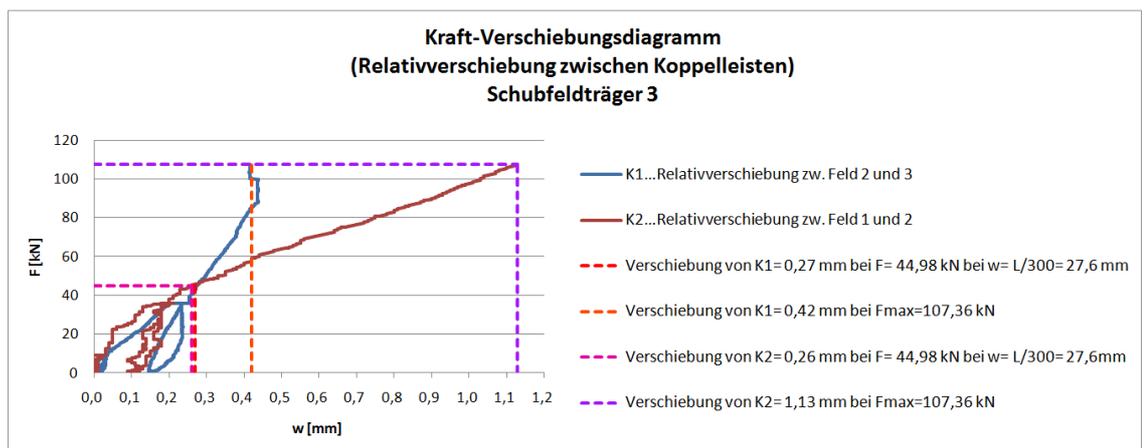


Abbildung 73: Relativverschiebung zwischen den Koppelleisten (Schubfeldträger 3)

3.3.4.3 Kraft-Verschiebungsdiagramme: Verschiebungen zwischen Holz und Glas

Die nachfolgenden drei Diagramme zeigen die Mittelwerte der Verschiebungen zwischen den Koppelleisten und den Glasscheiben, gemessen mit den induktiven Wegaufnehmern GH9 - GH12, GH5 - GH8 bzw. GH1 - GH4 für Feld 1, Feld 2 bzw. Feld 3

(vgl. Abbildung 57). Die Werte der vier IWA eines Feldes wurden jeweils gemittelt und repräsentieren in den Diagrammen die mittlere Verschiebung zwischen Glas und Holz in jedem Feld.

In allen drei Diagrammen sind die bleibenden Verformungen nach der Entlastung in Form einer Schleife am Anfang der Verschiebungskurve, hervorgerufen durch die beim Lastzyklus durchgeführte Belastung auf 40 % der geschätzten Maximallast mit anschließender Entlastung und darauffolgender Belastung bis zum Bruch, sichtbar.

Die deutlich größeren Verschiebungen in den Feldern 1 und 2 im Vergleich zu Feld 3 sind darauf zurückzuführen, dass nach Schubfeldtheorie Feld 3 keine Belastung erfährt. Die geringe Verschiebung in Feld 3 entsteht durch den Anteil der Biegeverformung.

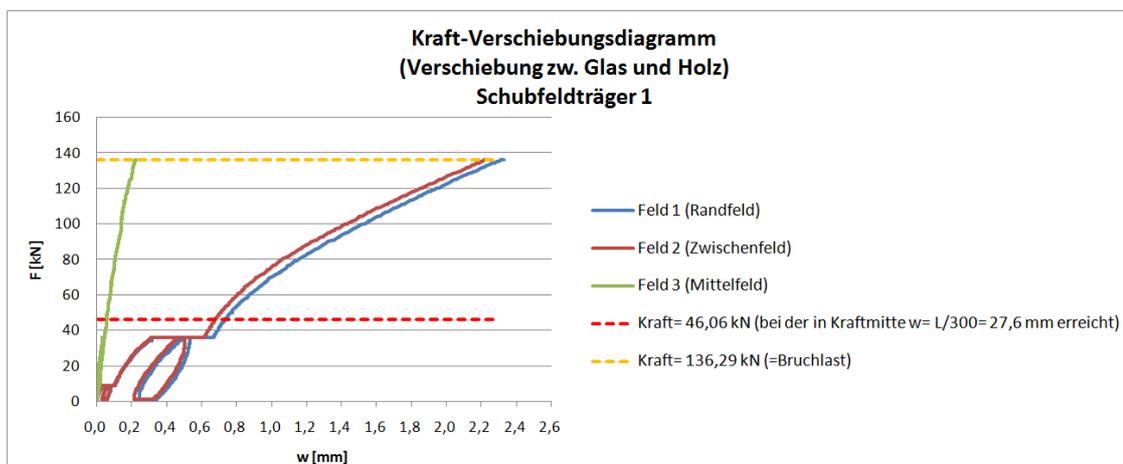


Abbildung 74: Verschiebungen zwischen Koppelleisten und Glasscheibe in Feld 1, Feld 2 und Feld 3 (Schubfeldträger 1)

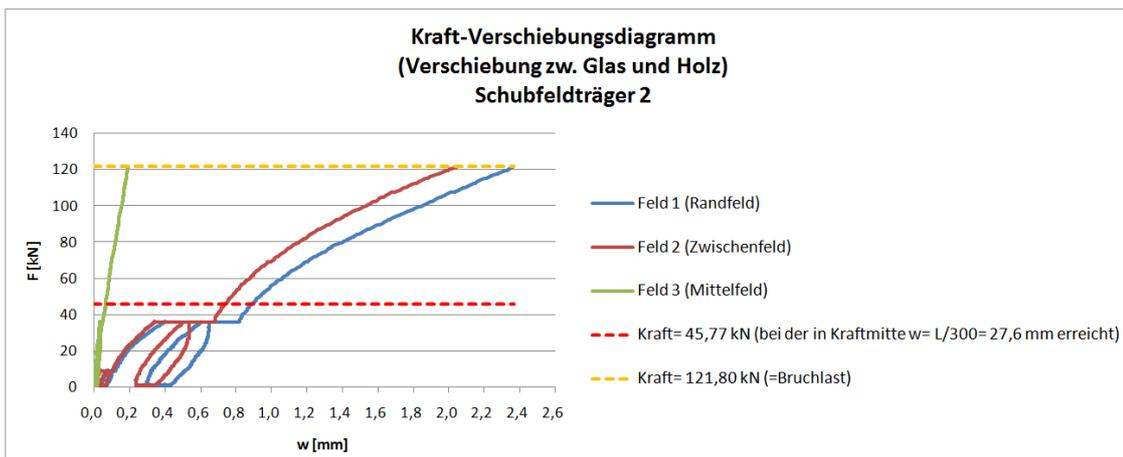


Abbildung 75: Verschiebungen zwischen Koppelleisten und Glasscheibe in Feld 1, Feld 2 und Feld 3 (Schubfeldträger 2)

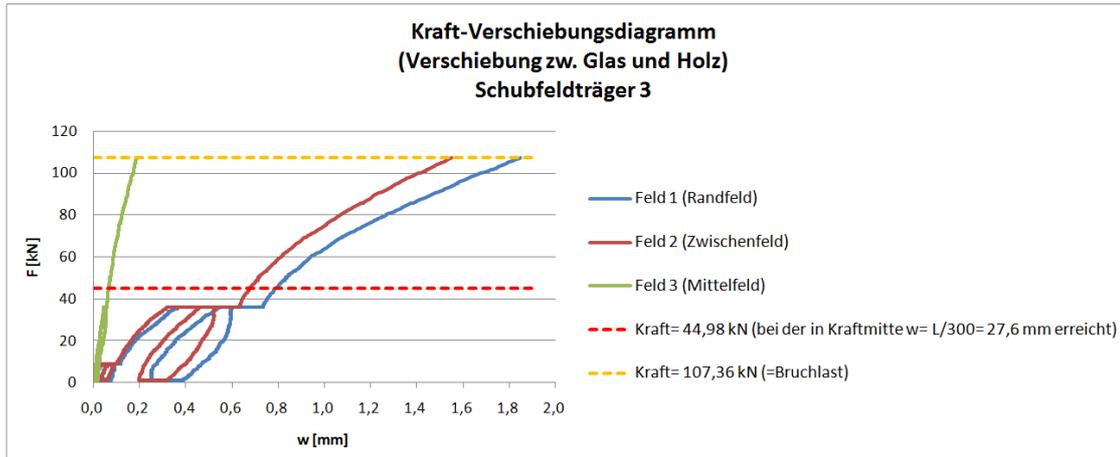


Abbildung 76: Verschiebungen zwischen Koppelleisten und Glasscheibe in Feld 1, Feld 2 und Feld 3 (Schubfeldträger 3)

3.3.4.4 Kraft-Verzerrungsdiagramme: Stauchung und Dehnung von Ober- und Untergurt

Die drei im Anschluss abgebildeten Diagramme (Abbildung 77 bis Abbildung 79) zeigen die in Ober- und Untergurt aufgezeichneten Verzerrungen in Abhängigkeit von der aufgebrachtten Gesamtkraft auf das System. Die aufgetretenen Maximalverzerrungen liegen zwischen 13,76 ‰ und 17,99 ‰.

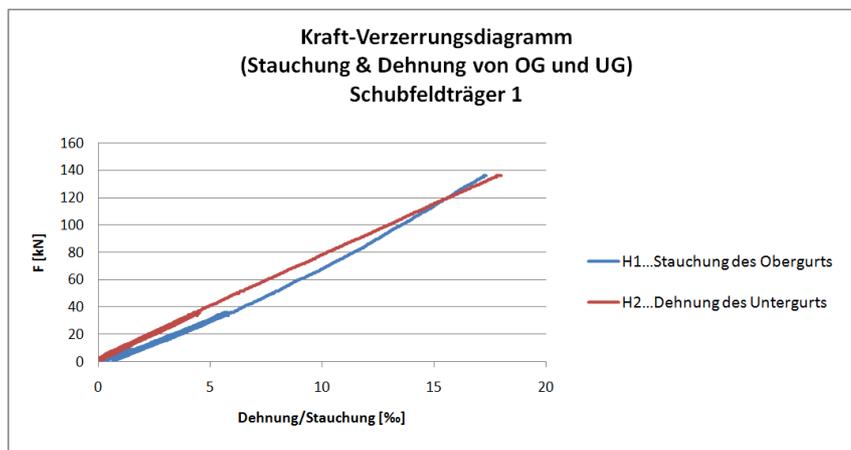


Abbildung 77: Dehnungen und Stauchungen des Ober- und Untergurts (Schubfeldträger 1)

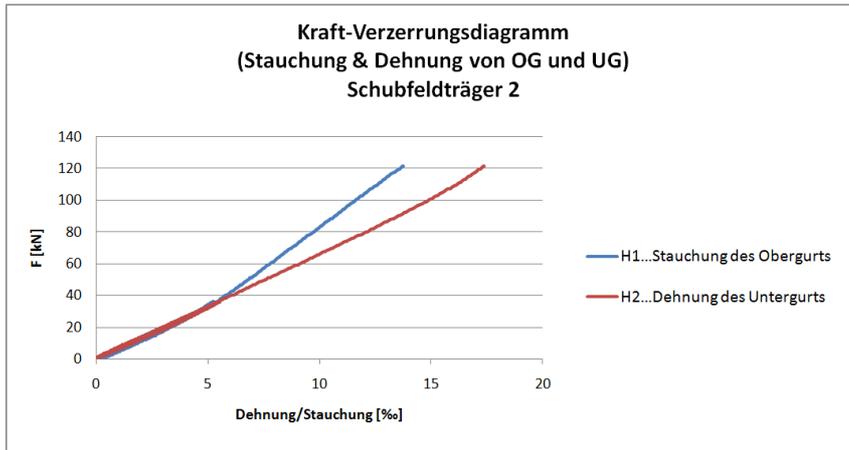


Abbildung 78: Dehnungen und Stauchungen des Ober- und Untergurts (Schubfeldträger 2)

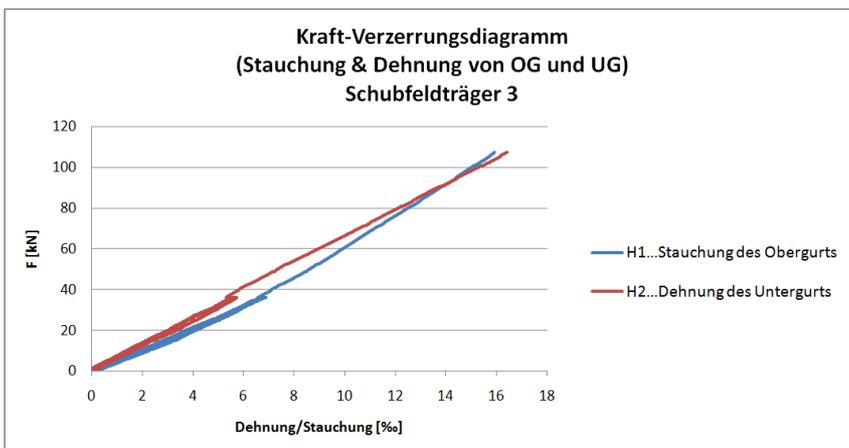


Abbildung 79: Dehnungen und Stauchungen des Ober- und Untergurts (Schubfeldträger 3)

3.3.4.5 Kraft-Dehnungsdiagramme: Mittelwerte der Glasdehnungen in Feld 1 und Feld 2

Nachfolgende drei Diagramme (Abbildung 80 bis Abbildung 82) bilden den Verlauf der Glasdehnungen im Zuge des Lastzyklus ab. Der Mittelwert aus den Daten der Dehnmessstreifen G5-G8 bzw. G1-G4 ergibt die mittlere Dehnung der Glasscheibe in Feld 1 bzw. in Feld 2.

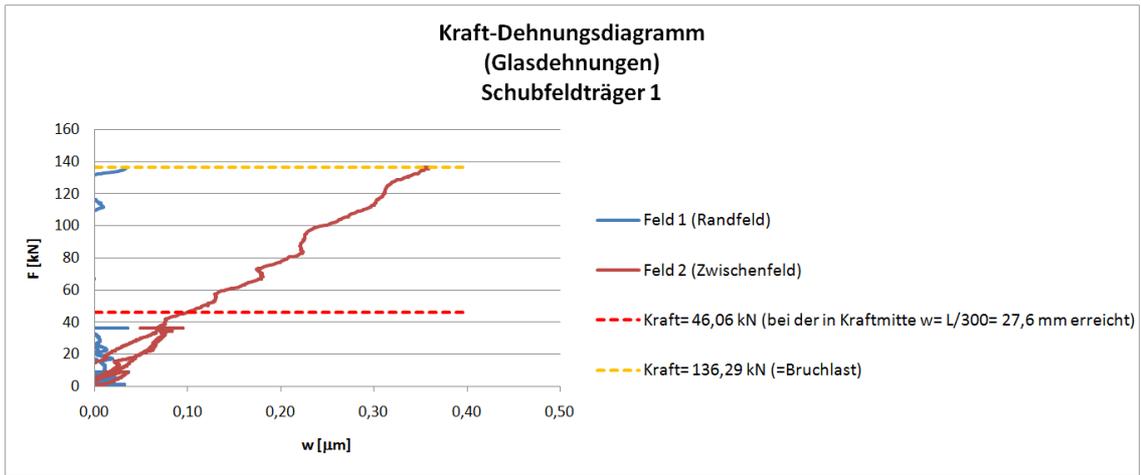


Abbildung 80: Glasdehnung der Scheiben in Feld 1 und Feld 2 (Schubfeldträger 1)

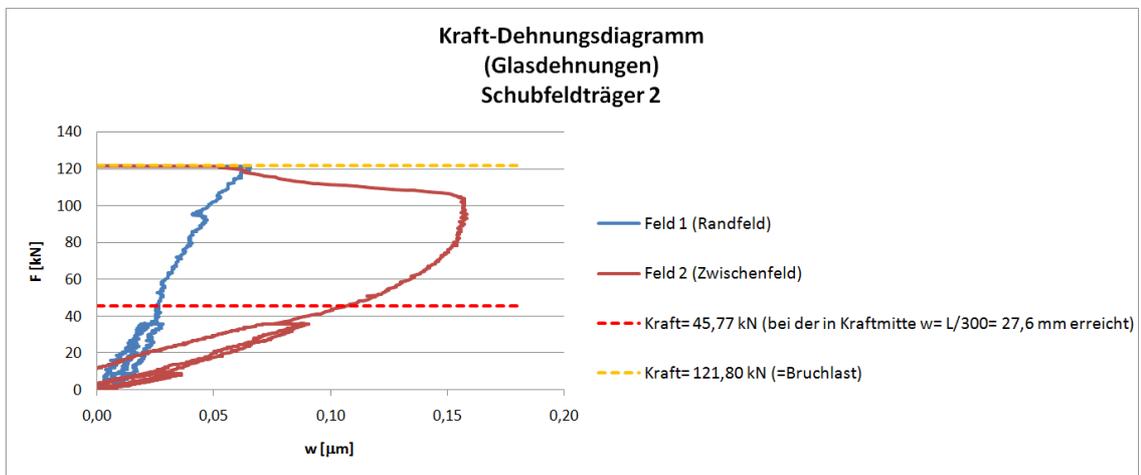


Abbildung 81: Glasdehnung der Scheiben in Feld 1 und Feld 2 (Schubfeldträger 2)

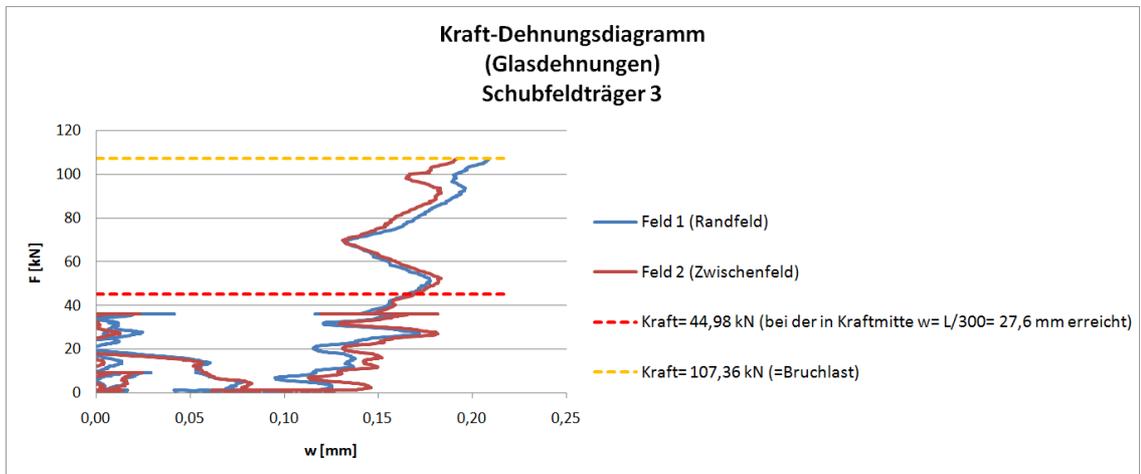


Abbildung 82: Glasdehnung der Scheiben in Feld 1 und Feld 2 (Schubfeldträger 3)

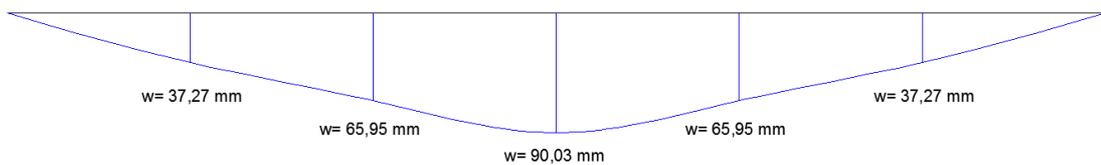
3.3.4.6 Abbildungen der Schubfeldträgerdurchbiegungen

Die folgenden Skizzen zeigen die Durchbiegungsverläufe für die jeweilige Maximallast der Träger. Weiters sind die Durchbiegungen mit zugehöriger Last bei der Erreichung von $w = L/300 = 27 \text{ mm}$ dargestellt. Die genauen Werte sind in den Sechstelpunkten angegeben.

Da die Messmittel nur auf drei der sechs Schubfelder angebracht waren und somit nur für den halben Träger tatsächliche Versuchswerte vorhanden sind, wird für folgende Darstellungen von einer symmetrischen Durchbiegung des Trägers ausgegangen.

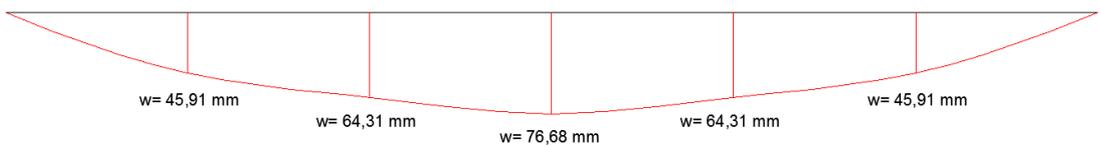
Schubfeldträger 1, Durchbiegung w

w bei maximaler Last ($F = 136,29 \text{ kN}$)



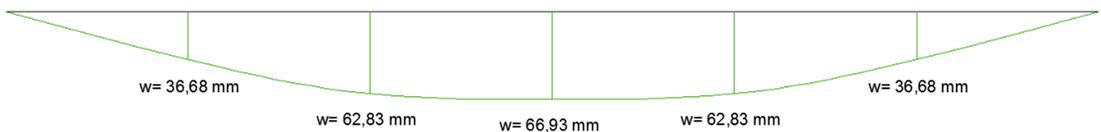
Schubfeldträger 2, Durchbiegung w

w bei maximaler Last ($F = 121,80 \text{ kN}$)



Schubfeldträger 3, Durchbiegung w

w bei maximaler Last ($F = 107,36 \text{ kN}$)



Schubfeldträger 1,2,3; Durchbiegung w

w bei maximaler Last ($F = 136,29 \text{ kN}$, $F = 121,80 \text{ kN}$, $F = 107,36 \text{ kN}$)

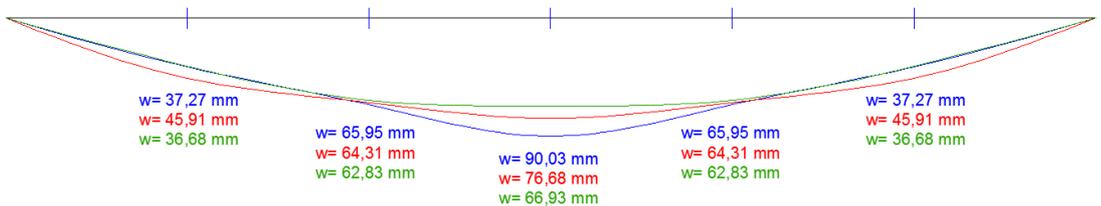
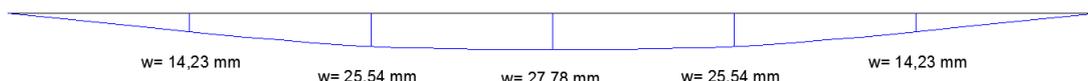


Abbildung 83: Durchbiegungsdarstellungen bei maximaler Last der Schubfeldträger 1, 2 und 3 sowie aller drei Schubfeldträger

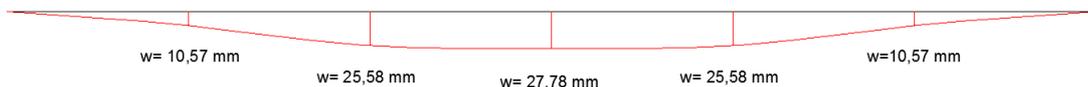
Schubfeldträger 1, Durchbiegung w

w = L/300 = 27,6 mm erreicht (F = 46,04 kN)



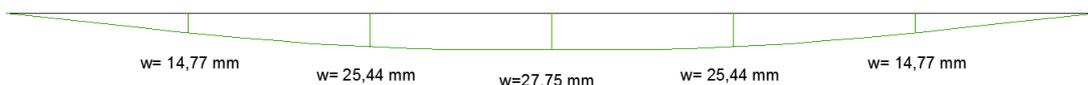
Schubfeldträger 2, Durchbiegung w

w = L/300 = 27,6 mm erreicht (F = 45,77 kN)



Schubfeldträger 3, Durchbiegung w

w = L/300 = 27,6 mm erreicht (F = 44,98 kN)



Schubfeldträger 1,2,3; Durchbiegung w

w = L/300 = 27,6 mm erreicht (F = 46,04 kN, F = 45,77 kN, F = 44,98 kN)



Abbildung 84: Durchbiegungsdarstellungen der Schubfeldträger 1, 2 und 3 sowie aller drei Schubfeldträger, bei der in der Trägermitte $w = L/300 = 27,6$ mm erreicht bzw. überschritten wurde

4 Theoretische Untersuchungen

4.1 Grundlagen der Schubfeld-Theorie

Die Schubfeldträger-Theorie basiert auf der Schubfeld-Theorie, welche von Rammerstorfer in „Repetitorium Leichtbau“ behandelt wird. Bei der Schubfeld-Theorie stellt Rammerstorfer Überlegungen zu einem einzelnen, rechteckigen Schubfeld an. Bei der Schubfeldträger-Theorie werden diese Überlegungen aufgegriffen und für Schubfeldträger, bestehend aus mehreren aneinandergefügten Schubfeldern, erweitert.

Rammerstorfer beschreibt in „Repetitorium Leichtbau“ zur Einführung in die Schubfeld-Theorie Bauteile aus dünnen Blechen. Er zeigt anhand eines I-Trägers mit sehr dünnem, hohem Steg, unter welchen Näherungsannahmen „die Querkraft allein durch konstante Schubspannungen im Steg [...] und das Biegemoment allein durch Normalkräfte in den Gurten übertragen wird“. (Rammerstorfer, F. G. (1992), S. 48) Durch Vereinfachungen des Trägheitsmoments und weiteren Umformungen ergibt sich der Schubfluss im Stegblech dieses I-Trägers zu

$$q = \frac{Q_z}{H}. \quad (4.1)$$

mit:

Q_z	Querkraft in z-Richtung
H	Trägerhöhe

Diese Annahmen gelten aber nur bei Trägern, deren Stegbreite sehr klein gegen deren Höhe und deren Stegfläche sehr klein gegen deren Gurtfläche ist. Obwohl bei diesen Trägern Biegespannungen σ_{xx} im Steg auftreten, gilt bei der einfachen Schubfeldträger-Theorie, dass $\sigma_{xx} \equiv 0$.

Der Schubfeld-Theorie liegen nach Rammerstorfer folgende Näherungen zugrunde:

- Die Stäbe (Gurte und Pfosten) sind miteinander gelenkig verbunden.
- Bei rechteckigen Stegblechen werden in den Stäben nur Längskräfte übertragen.
- Die Längskräfte, welche aus der Biegung resultieren, werden ausschließlich in den Stäben übertragen. Im Blechfeld hingegen werden bezüglich der Trägerlängsrichtung und Trägerquerrichtung nur Schubspannungen übertragen.
- Die Querkraft wird bei rechteckigen Schubfeldern nur durch Schubspannungen im Blechfeld übertragen, wohingegen die Stäbe querkraftfrei sind.
- Die Einleitung der Kräfte erfolgt ausschließlich über die Stäbe und nicht direkt im Stegblech.

Bei der Schubfeld-Theorie ist im rechteckigen Schubfeld der Schubfluss q konstant. Die Normalkräfte in den Gurten und Pfosten sind linear veränderlich. Es gilt:

$$\frac{dN}{dx} = q \quad \Rightarrow \quad N = qx + C \quad (4.2)$$

In folgender Abbildung wird das Schnittprinzip eines rechteckigen Schubfeldträgers dargestellt. Der Schubfluss im Schubfeld ist konstant, wodurch sich $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q$ ergibt.

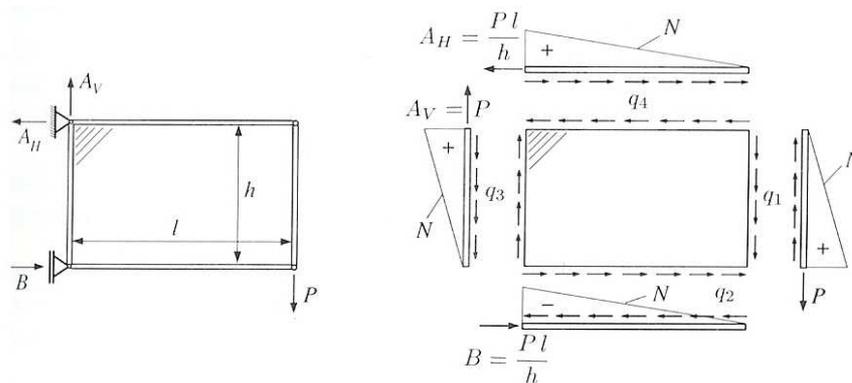


Abbildung 85: Rechteckiges Schubfeld (Rammerstorfer, F. G. (1992), S.49)

Es ergibt sich jedoch bei der Schubfeldidealisierung eine kinematische Inkompatibilität, die die Schwächen der Schubfeld-Theorie zeigt:

Bei Belastung erfährt das Schubfeld (das Stegblech) lediglich eine Winkeländerung durch Gleitung, aber keine Änderung der Längen der Seitenkanten. Die Gurte und Pfosten, welche durch Normalkräfte beansprucht werden, erfahren jedoch eine Dehnung oder Stauchung. Dies ergibt einen inkompatiblen Deformationszustand. In Realität sind auch bei Rechteckfeldern die Normalkräfte in den Randstäben nicht linear verteilt.

In einem Schubfeldträger sind der Schubfluss q jedes Teilfeldes sowie der Normalkraftwert in jedem Stab unbekannt. Durch die Annahme, ein Schubfeld entspräche einem Diagonalstab, kann für einen Schubfeldträger in Analogie zu ebenen Fachwerken mit folgender Formel die statische Bestimmtheit kontrolliert werden:

$$s + b + 3 = 2k \quad (4.3)$$

mit:

- s Anzahl der Stäbe (Gurte und Pfosten), d.h. Feldrandstäbe
- b Anzahl der Blechfelder (Schubfelder)
- k Anzahl der Knoten (Anschlussgelenke zwischen den Feldrandstäben)

(Rammerstorfer, F. G. (1992), S. 48-51)

In dieser Diplomarbeit sind die Schubfelder, welche von Rammerstorfer als Stegbleche beschrieben werden, als Glasscheiben ausgeführt. Die Stäbe der Schubfeldträger entsprechen der Holzrahmenkonstruktion.

Auch Kreuzinger und Niedermaier behandeln das Thema der Schubfeld-Theorie und gehen dabei direkt von Glas als Schubfeld aus. Kreuzinger und Niedermaier gehen bei der Verwendung ihrer Formeln von drei Annahmen aus:

- Die Scheibe wird als starr angenommen.
- Die Randglieder, welche um die Glasscheibe angeordnet sind, sind gelenkig miteinander verbunden.
- Die Randglieder sind unendlich steif.

(Kreuzinger, H., Niedermaier, P. (2005))

Im Folgenden werden die Formeln für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis (Kapitel 4.2) und den Tragfähigkeitsnachweis (Kapitel 4.3) angegeben. Im Anschluss an die allgemeinen Erläuterungen erfolgt die Auswertung dieser Formeln für die Versuchsträger bei einer Pressenkraft von $F = 22,5$ kN. Bei dieser Kraft stellte sich bei den Versuchen eine Durchbiegung in der Trägermitte von 2,747 cm ($= L/300$) und in den Trägerdrittelpunkten von 2,526 cm ein. Der Wert $L/300$ entspricht der maximal zulässigen Durchbiegung für Biegestäbe gemäß (*EUROCODE 5, Tabelle 7.2*).

4.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis - SLS (Serviceability Limit State)

In die für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis zu berechnende Durchbiegung eines Schubfeldträgers fließen ein Anteil entstehend durch Schubverformungen und ein weiterer Anteil entstehend durch Biegeverformungen ein. Summiert man diese zwei Komponenten auf, so erhält man rechnerisch eine gute Annäherung an die reale Biegelinie. Abbildung 86 zeigt eine grafische Darstellung der Durchbiegungsanteile und der Gesamtdurchbiegung.

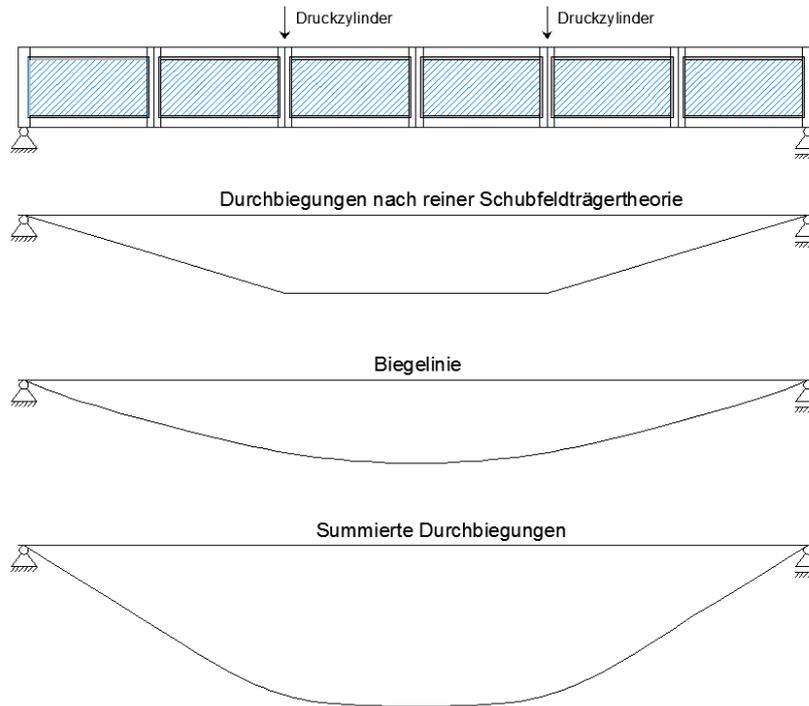


Abbildung 86: Einfließende Komponenten in die gesamte Durchbiegung

Die Formeln (4.4) bis (4.6) zur Berechnung der Trägerdurchbiegung wurden von Hochhauser Werner entwickelt.

4.2.1 Formel zur Berechnung der Trägerdurchbiegung für $x \leq l/2$

$$w_x = w_{x,BL} + w_{x,SFTT} \quad (4.4)$$

$$w_x = w_{x,BL} + \frac{Q_1}{K_\tau} + \frac{Q_2}{K_\tau} + \dots + \frac{Q_x}{K_\tau} \quad (4.5)$$

$$w_x = w_{x,BL} + \frac{1}{K_\tau} \cdot \sum_{i=1}^x Q_i \quad (4.6)$$

mit:

$w_{x,SFTT}$	Durchbiegung an der Stelle x infolge der Schubfeldträger-Theorie
$w_{x,BL}$	Durchbiegung an der Stelle x infolge der Biegetheorie
Q_i	Querkraft an der Stelle i
K_τ	Systemsteifigkeit eines Schubfeldes infolge Schubverklebung

In Formel (4.6) geht durch $w_{x,BL}$ der Anteil der Durchbiegung infolge der Biegetheorie und durch $\frac{1}{K_\tau} \cdot \sum_{i=1}^x Q_i$ der Anteil nach Schubfeldträger-Theorie in die Berechnung ein.

Diese Formel gilt bei $x \leq \frac{l}{2}$ für folgenden Träger:

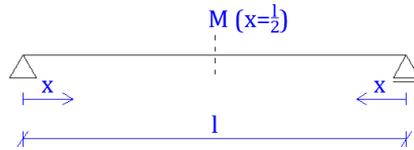


Abbildung 87: Allgemeiner Träger der Länge l, für den die Durchbiegung berechnet werden soll (M steht für die Mitte des Trägers)

Die Formel kann sowohl bei Schubfeldträgern mit gerader-, als auch ungerader Anzahl der Schubfelder angewendet werden. Bei gerader und ungerader Felderanzahl verläuft der Querkraftverlauf betragsmäßig symmetrisch. In beiden Fällen ändert sich lediglich das Vorzeichen ab $x = \frac{l}{2}$. Der Schubfluss q lässt sich aus dem Querkraftverlauf und der Trägerhöhe mittels $q = \frac{Q}{h}$ berechnen.

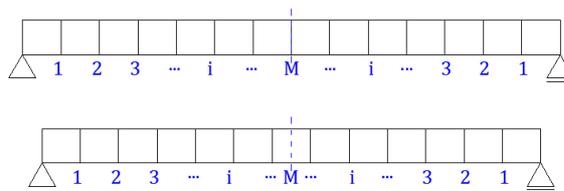


Abbildung 88: Träger mit gerader Anzahl an Schubfeldern (oben) und Träger mit ungerader Anzahl an Schubfeldern (unten) (M steht für die Mitte des Trägers)

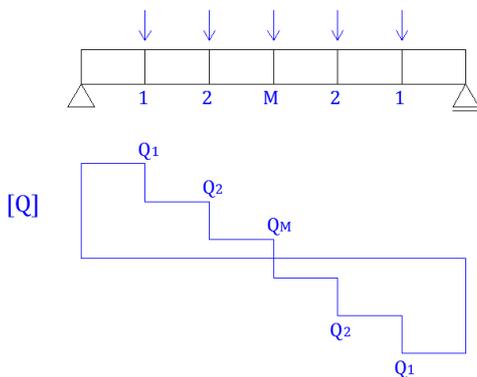


Abbildung 89: Schubfeldträger mit gerader Anzahl an Feldern mit dazugehörigem Querkraftverlauf (M steht für die Mitte des Trägers)

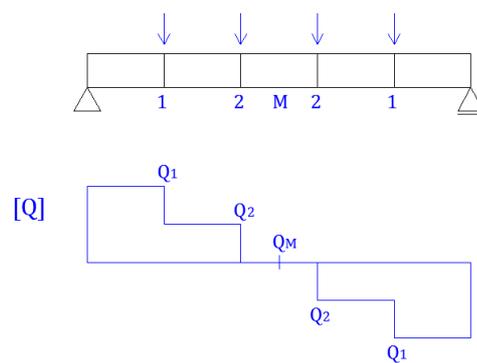


Abbildung 90: Schubfeldträger mit ungerader Anzahl an Feldern mit dazugehörigem Querkraftverlauf (M steht für die Mitte des Trägers)

4.2.2 Formeln zur Berechnung der Biegelinie des Holz-Glas-Verbundschubfeldträgers

Die Formeln zur Berechnung der Biegelinie müssen dem Belastungsfall entsprechend gewählt werden. Folgende Formeln (4.7) und (4.8) beschreiben die Biegelinie eines Trägers, der mit zwei symmetrischen Einzellasten belasteten wird. Weicht die Trägerbelastung von der einer Vier-Punkt-Belastung ab, so müssen die Formeln zur Berechnung der Biegelinie angepasst werden.

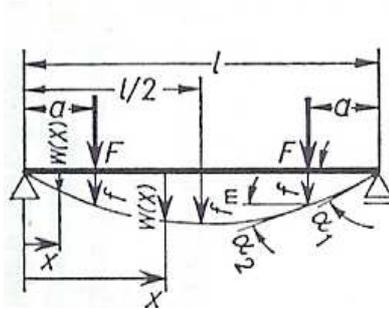


Abbildung 91: Biegelinie eines Durchlaufträgers mit zwei Einzellasten (Holzmann, G., Meyer, H., Schumpich, G. (1983), S.105)

$$w_{(x \leq a < \frac{l}{2})} = \frac{Fl^3}{2EI} \cdot \frac{x}{l} \cdot \left[\frac{a}{l} \cdot \left(1 - \frac{a}{l} \right) - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right] \quad (4.7)$$

$$w_{(a \leq x \leq \frac{l}{2})} = \frac{Fl^3}{2EI} \cdot \frac{a}{l} \cdot \left[\frac{x}{l} \cdot \left(1 - \frac{x}{l} \right) - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right] \quad (4.8)$$

(Holzmann, G., Meyer, H., Schumpich, G. (1983), S. 105)

4.2.2.1 Material- und Querschnittswerte zur Berechnung der Biegesteifigkeit des Holz-Glas-Verbundträgers

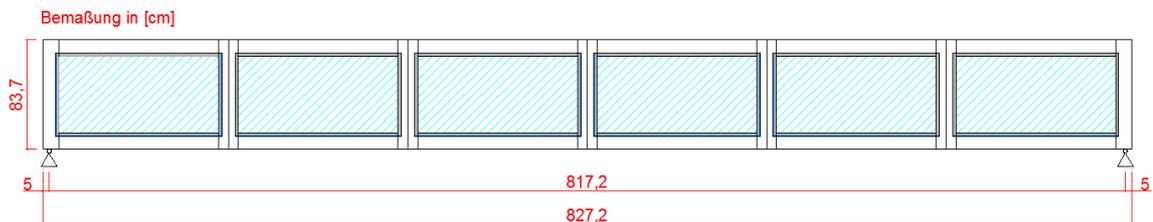


Abbildung 92: Ansicht des Holz-Glas-Verbundträgers

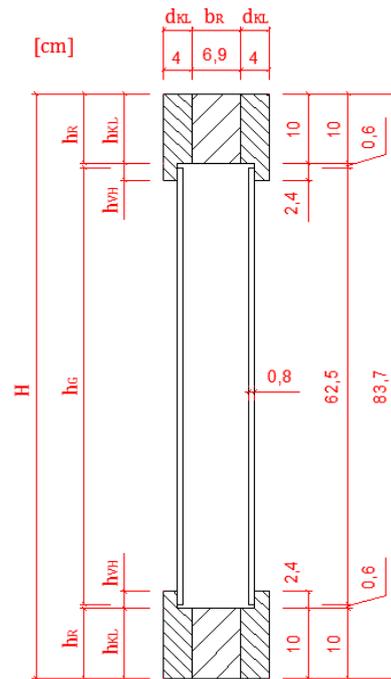


Abbildung 93: Querschnitt des Holz-Glas-Verbundträgers

mit:	
d_G	Glasscheibendicke [cm]
h_G	Glasscheibenhöhe [cm]
b_R	Rahmenbreite [cm]
h_R	Rahmenhöhe [cm]
d_{KL}	Koppelleistendicke [cm]
h_{KL}	Koppelleistenhöhe [cm]
h_{VH}	Vorholzhöhe [cm]
H	Gesamtträgerhöhe [cm]

Die Biegesteifigkeit des Trägers wird mit dem Gamma-Verfahren bestimmt, eines der gebräuchlichsten Verfahren bei der Berechnung von mehrteiligen Trägern, deren Querschnittsteile nachgiebig verbunden sind. Durch das Einfließen der Nachgiebigkeit der Fugen ergibt sich eine effektive Biegesteifigkeit EI_{eff} . Im Zuge des Verfahrens wird ein Nachgiebigkeitsfaktor γ_i berechnet, welcher die Steineranteile der miteinander nachgiebig verbundenen Querschnittsteile in Abhängigkeit von den Fugensteifigkeiten abmindert. Der Nachgiebigkeitsfaktor nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei 0 bei keinem Verbund und 1 bei starrem Verbund vorliegt.

Eine genaue Beschreibung der Verbundträgerberechnung nach dem Gamma-Verfahren wird in der Dissertation von Kreher Klaus (*Kreher, K. (2004)*) angegeben.

4.2.2.1.1 Gamma-Verfahren

- Eingangswerte:

I	Flächenträgheitsmoment 2. Grades [cm ⁴]
b	Breite [cm]
h	Höhe [cm]
c	Fugensteifigkeit zwischen zwei Querschnittsteilen [kN/cm ²]
c_{VM}	Federsteifigkeit der Verbindungsmittel (Schrauben) [kN/cm ²]

K_{ser}	Verschiebungsmodul der Schrauben [kN/cm]
$n_{S,G}$	Anzahl der Schrauben im Gurt
L_G	Gurtlänge eines Feldes, entspricht Glasscheibenlänge [cm]
C_τ	Federsteifigkeit der Schubverklebung [kN/cm ²]
G_τ	Schubmodul der Schubverklebung [kN/cm ²]
b_τ	Schubverklebungsbreite [cm]
d_τ	Schubverklebungsdicke [cm]
γ	Nachgiebigkeitsfaktor [-]
E	Elastizitätsmodul [kN/cm ²]
A_i	Fläche eines Querschnittsteils [cm ²]
A_k	Fläche eines Einzelquerschnitts, aus dem ein gesamter Querschnittsteil zusammengesetzt ist [cm ²]
A_{ges}	Gesamtfläche eines Querschnittsteils [cm ²]
z	Schwerlinienabstand [cm]
l	Gesamtträgerlänge [cm]
a	Abstand des Schwerpunktes der Querschnittsteile zur Spannungsnulllinie [cm]

Flächenträgheitsmoment 2. Grades:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4.9)$$

Fugensteifigkeit zwischen zwei Querschnittsteilen, verbunden durch Schrauben (4.10) bzw. eine Klebefuge (4.11):

$$c_{\gamma,i} = C_{VM} = K_{ser} \cdot \frac{n_{S,G}}{L_G} \quad (4.10)$$

$$c_{\gamma,i} = C_\tau = G_\tau \cdot \frac{b_\tau}{d_\tau} \quad (4.11)$$

Nachgiebigkeitsfaktor:

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i}{l^2 \cdot c_{\gamma,i}}} \quad \text{für } i=1,3 \quad (4.12)$$

$$\gamma_2 = 1$$

Abstand des Schwerpunktes der Querschnittsteile zur Spannungsnulllinie, welche beim symmetrischen Querschnitt auf halber Trägerhöhe liegt:

$$a_i = \sum_k \frac{A_k \cdot z_k}{A_{ges}} \quad (4.13)$$

• Wirksame Biegesteifigkeit eines zusammengesetzten Trägers (effektive Biegesteifigkeit):

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (4.14)$$

(Kreher, K. (2004), S. 26-28)

4.2.2.1.2 Gamma-Verfahren für den Holzteil mit einer Verbindung durch Schrauben (nach Kreher: Typ B)

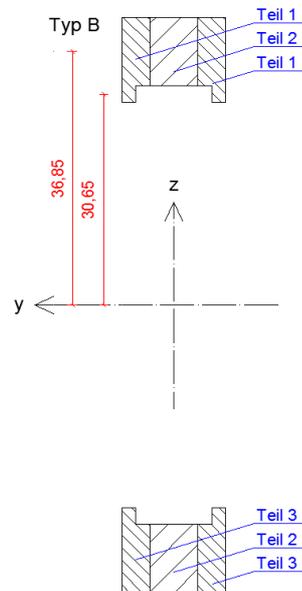


Abbildung 94: Aufteilung des Holzteils nach dem Gamma-Verfahren in Teil 1,2,3

- Eingangswerte:

Gesamtträgerlänge:

$$l = 817,2 \text{ cm}$$

Querschnittsfläche:

$$A_1 = A_3 = 89,6 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = 138 \text{ cm}^2$$

E-Modul:

$$E_1 = E_3 = E_{\text{BFSH}} = 892,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_2 = E_{\text{Kerto-Q}} = 1050 \text{ kN/cm}^2$$

Verschiebungsmodul der Schrauben:

$$K_{\text{ser}} = 8,25 \text{ kN/cm}$$

Schraubenanzahl pro Länge:

$$\frac{n_{S,G}}{L_G} = \frac{29}{125} \text{ Stk/cm}$$

Flächenträgheitsmoment 2. Grades:

$$I_1 = I_3 = 2 \cdot \left(\frac{4 \cdot 10^3}{12} + \frac{2 \cdot 2,4^3}{12} \right) = 671,27 \text{ cm}^4$$

$$I_2 = 2 \cdot \left(\frac{6,9 \cdot 10^3}{12} \right) = 1150 \text{ cm}^4$$

Fugensteifigkeit zwischen Querschnittsteil 1 (Koppelleisten aus BFSH) und Querschnittsteil 2 (Rahmen aus Kerto-Q), verbunden durch Schrauben:

$$c_{\gamma 1} = c_{\gamma 3} = C_{VM} = 8,25 \cdot \frac{29}{125} = 1,91 \text{ kN/cm}^2$$

Nachgiebigkeitsfaktor:

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 892,5 \cdot 89,6}{817,2^2 \cdot 1,91}} = 0,6182$$

$$\gamma_2 = 1$$

Abstand des Schwerpunktes der Querschnittsteile zur Spannungsnulllinie:

$$a_2 = 0 \text{ cm}$$

$$a_1 = a_3 = \frac{2 \cdot (40 \cdot 36,85 + 4,8 \cdot 30,65)}{2 \cdot 44,8} = 36,18 \text{ cm}$$

- Wirksame Biegesteifigkeit (effektive Biegesteifigkeit) des Holzteils, bestehend aus Ober- und Untergurt, ohne Glasscheibe:

$$(EI)_{eff,OG+UG} = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2 + \gamma_3 E_3 A_3 a_3^2$$

$$(EI)_{eff,OG+UG} = 892,5 \cdot 671,27 + 1050 \cdot 1150 + 892,5 \cdot 671,27 + 0,6182 \cdot 892,5 \cdot 89,6 \cdot 36,18^2 + 1 \cdot 1050 \cdot 138 \cdot 0^2 + 0,6182 \cdot 892,5 \cdot 89,6 \cdot 36,18^2 = 131.880.073,90 \text{ kNcm}^2$$

4.2.2.1.3 Gamma-Verfahren für den gesamten Holz-Glas-Verbundträger mit Verbindung durch Klebefugen (nach Kreher: Typ A)

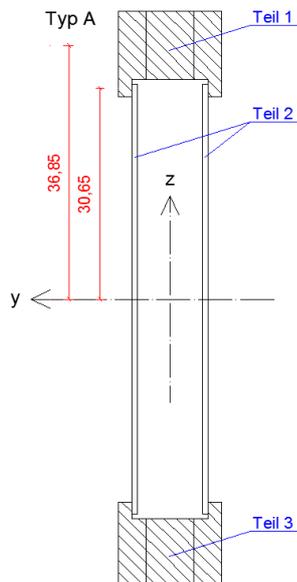


Abbildung 95: Aufteilung des HGV-Trägers nach dem Gamma-Verfahren in Teil 1,2,3

- Eingangswerte:

Gesamträgerlänge:

$$l = 817,2 \text{ cm}$$

Querschnittsfläche:

$$A_{\text{Kerto-Q}} = 69 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{BFSH}} = 89,6 \text{ cm}^2$$

$$A_1 = A_3 = A_{\text{Kerto-Q+BFSH}} = A_{\text{ges}} = 158,6 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = A_{\text{Glas}} = 100 \text{ cm}^2$$

E-Modul:

$$E_{\text{BFSH}} = 892,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{\text{Kerto-Q}} = 1050 \text{ kN/cm}^2$$

$$\begin{aligned} E_1 = E_3 = E_{\text{Holzteil}} &= \frac{A_{\text{Kerto-Q}}}{A_{\text{ges}}} \cdot E_{\text{Kerto-Q}} + \frac{A_{\text{BFSH}}}{A_{\text{ges}}} \cdot E_{\text{BFSH}} \\ &= \frac{69}{158,6} \cdot 1050 + \frac{89,6}{158,6} \cdot 892,5 = 961,02 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$E_2 = E_{\text{TVG}} = 7300 \text{ kN/cm}^2$$

Effektive Biegesteifigkeit von Teil 1 und Teil 3:

$$(EI)_{eff,Teil1} = (EI)_{eff,Teil3} = \frac{(EI)_{eff,OG+UG}}{2} = \frac{131.880.073,90}{2} = 65.940.036,95 \text{ kNcm}^2$$

Klebefuge:

$$\text{Breite: } b_{\tau} = 1,4 \text{ cm}$$

$$\text{Dicke: } d_{\tau} = 0,3 \text{ cm}$$

$$\text{Schubmodul: } G_{\tau} = 0,2 \text{ kN/cm}^2$$

Glasscheibe:

$$\text{Glasdicke: } d_G = 0,8 \text{ cm}$$

$$\text{Glashöhe: } h_G = 62,5 \text{ cm}$$

Flächenträgheitsmoment 2. Grades:

$$I_2 = 2 \cdot \left(\frac{0,8 \cdot 62,5^3}{12} \right) = 32552,08 \text{ cm}^4$$

Fugensteifigkeit zwischen Querschnittsteil 1 (Holz) und Querschnittsteil 2 (Glasscheiben), verbunden durch eine Klebefuge:

$$c_{\gamma 1} = c_{\gamma 3} = C_{\tau} = 0,2 \cdot \frac{1,4}{0,3} = 0,93 \text{ kN/cm}^2$$

Nachgiebigkeitsfaktor:

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 961,02 \cdot 158,6}{817,2^2 \cdot 0,93}} = 0,2930$$

$$\gamma_2 = 1$$

Abstand des Schwerpunktes der Querschnittsteile zur Spannungsnulllinie:

$$a_2 = 0 \text{ cm}$$

$$a_1 = a_3 = \frac{(149 \cdot 36,85 + 4,8 \cdot 30,65)}{158,6} = 35,55 \text{ cm}$$

• Wirksame Biegesteifigkeit des gesamten Holz-Glas-Verbundträgers (effektive Biegesteifigkeit):

$$(EI)_{eff,HGV} = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2 + \gamma_3 E_3 A_3 a_3^2$$

$$(EI)_{eff,HGV} = EI_{eff,Teil1} + E_2 I_2 + EI_{eff,Teil3} + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2 + \gamma_3 E_3 A_3 a_3^2$$

$$(EI)_{eff,HGV} = 65940036,95 + 7300 \cdot 32552,08 + 65940036,95 + 0,2930 \cdot 961,02 \cdot 158,6 \cdot 35,55^2 + 1 \cdot 7300 \cdot 100 \cdot 0^2 + 0,2930 \cdot 961,02 \cdot 158,6 \cdot 35,55^2 = 482.354.179,70 \text{ kNcm}^2$$

4.2.2.2 Auswertung der Biegelinie für den Holz-Glas-Verbundträger bei $F=22,5 \text{ kN}$

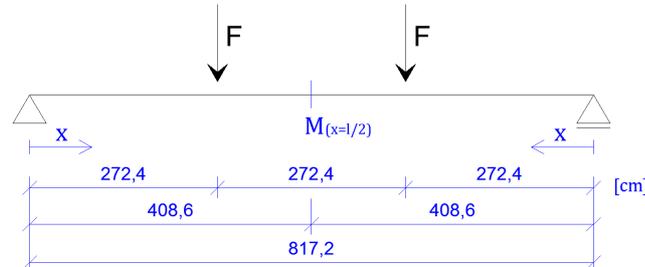


Abbildung 96: Holz-Glas-Verbundträger mit
 $EI = EI_{eff,HGV} = 482.354.179,70 \text{ kNcm}^2$; $l = 817,2 \text{ cm}$;
 $a = l/3 = 272,4 \text{ cm}$
 (M steht für die Mitte des Trägers)

Auswertung der Durchbiegung an den Stellen: $w_{1,(x=l/3)}$ unter linker Kraft
 $w_{2,(x=l/2)}$ in Trägermitte
 $w_{3,(x=l/3)}$ unter rechter Kraft

$$w_{1,BL,(x=\frac{l}{3} \leq a < \frac{l}{2})} = w_3 = \frac{F \cdot 817,2^3}{2 \cdot 482354179,7} \cdot \frac{272,4}{817,2} \cdot \left[\frac{272,4}{817,2} \cdot \left(1 - \frac{272,4}{817,2} \right) - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{272,4}{817,2} \right)^2 \right]$$

$$w_{1,BL,(x=\frac{l}{3} \leq a < \frac{l}{2})} = w_3 = 0,03492 \cdot F = 0,03492 \cdot 22,5$$

$$w_{1,BL,(x=\frac{l}{3} \leq a < \frac{l}{2})} = w_3 = 0,79 \text{ cm}$$

$$w_{2,BL,(a \leq x = \frac{l}{2} \leq \frac{l}{2})} = \frac{F \cdot 817,2^3}{2 \cdot 482354179,7} \cdot \frac{272,4}{817,2} \cdot \left[\frac{408,6}{817,2} \cdot \left(1 - \frac{408,6}{817,2} \right) - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{272,4}{817,2} \right)^2 \right]$$

$$w_{2,BL,(a \leq x = \frac{l}{2} \leq \frac{l}{2})} = 0,04016 \cdot F = 0,04016 \cdot 22,5$$

$$w_{2,BL,(a \leq x = \frac{l}{2} \leq \frac{l}{2})} = 0,90 \text{ cm}$$

4.2.3 Formeln zur Berechnung der Durchbiegung des Holz-Glas-Verbundschubfeldträgers infolge Schubfeldträger-Theorie

Verallgemeinerung der Schubfeldträger-Theorie

Da nach Kreuzinger und Niedermaier bei Schubfeldern aus Holz und Glas die Scheibe als starr und die Randglieder als steif angesehen werden, müssen sämtliche Verformungen aus der Verformung der Klebefuge resultieren. Diese Annahme trifft jedoch nur auf Konstruktionen mit weichen, elastischen Klebstoffen zu, bei welchen die Verformungen der übrigen Bauteilkomponenten vernachlässigbar klein sind. Das bei den Großprobenversuchen verwendete Acrylat kann nicht als derart weicher Kleber betrachtet werden. Um die getroffenen Annahmen dennoch anwenden zu

können, wird deshalb aus den Einflüssen der einzelnen Bauteilkomponenten eine äquivalente Gesamtfedersteifigkeit ermittelt, aus welcher sich durch Rückrechnung ein äquivalenter Schubmodul der Klebefuge bestimmen lässt, welcher die Gesamtheit aller Verformungen beinhaltet. Anschließend kann über die Verschiebungsformel (4.24) nach Kreuzinger und Niedermaier die Federsteifigkeit eines Schubfeldes mit (4.25) berechnet werden.

Im Folgenden werden die Formeln dieser Rechenschritte dargestellt und grafisch veranschaulicht.

4.2.3.1 Formeln zur Berechnung der Federsteifigkeit eines Schubfeldes C_{ges}

- Federsteifigkeitsberechnungen der Teilkomponenten:

$$\text{Rahmen:} \quad C_R = G_R \cdot \frac{h_R}{b_R} \quad (4.15)$$

$$\text{Verbindungsmittel:} \quad C_{VM} = K_{ser} \cdot \min\left(\frac{n_{S,G}}{L_G}, \frac{n_{S,P}}{L_P}\right) \quad (4.16)$$

$$\text{Koppelleiste:} \quad C_{KL} = G_{KL} \cdot \frac{h_{KL}}{d_{KL}} \quad (4.17)$$

$$\text{Vorholz:} \quad C_{VH} = G_{KL} \cdot \frac{h_{VH}}{d_{VH}} \quad (4.18)$$

$$\text{Schubverklebungsfuge:} \quad C_\tau = G_\tau \cdot \frac{b_\tau}{d_\tau} \quad (4.19)$$

$$\text{Glasscheibe:} \quad C_G = 2 \cdot G_G \cdot \frac{d_G}{\left(\frac{h_G}{1 + \frac{h_G}{l_G}}\right)} \quad (4.20)$$

(Hochhauser, W., et al (2011), Kap. 4.1.2)

- Skizzen zu Federsteifigkeitsberechnungen der Teilkomponenten:

Rahmen

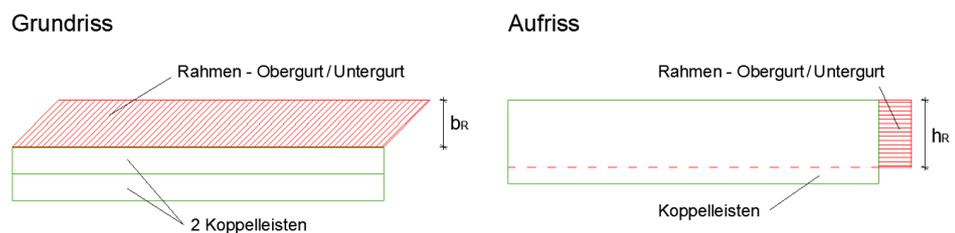


Abbildung 97: Schubverformung des Rahmens

Verbindungsmittel

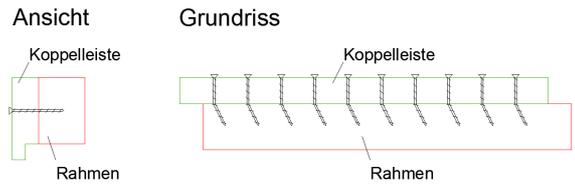


Abbildung 98: Schubverformung der Schrauben

Koppelleiste

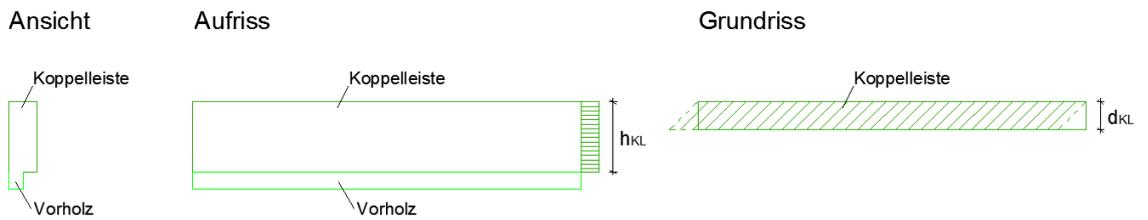


Abbildung 99: Schubverformung der Koppelleiste

Vorholz

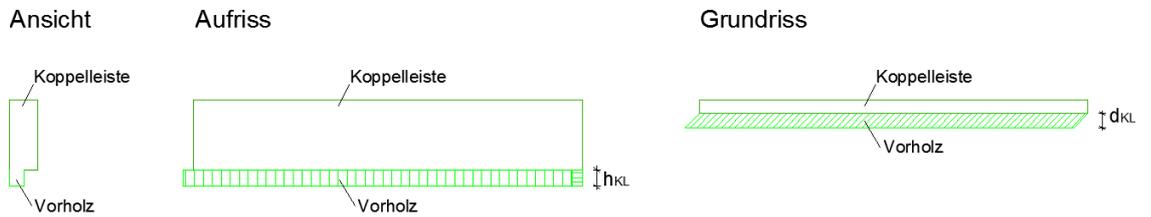


Abbildung 100: Schubverformung des Vorholzes

Schubverklebungsfuge

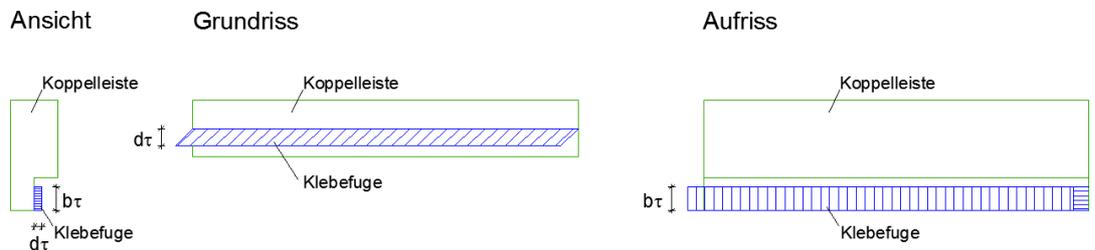


Abbildung 101: Schubverformung der Klebefuge

Glasscheibe

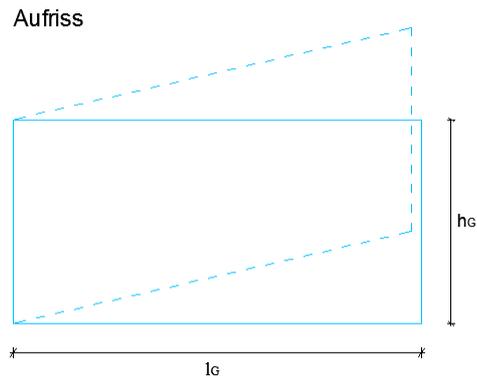


Abbildung 102: Schubverformung der Glasscheibe

- Gesamtfedersteifigkeit eines Schubfeldes C_{ges} in $[\text{kN}/\text{cm}^2]$ nach Hochhauser:

$$C_{ges} = \left(\frac{1}{C_R} + \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{1}{C_{VM}} + \frac{1}{C_{KL}} + \frac{1}{C_{VH}} + \frac{1}{C_\tau} + \frac{1}{C_G} \right)^{-1}} \right)^{-1} \quad (4.21)$$

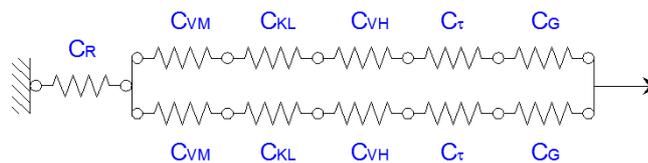


Abbildung 103: zugehöriges Federmodell für die Berechnung von C_{ges} nach Hochhauser

mit:

C_R	Federsteifigkeit des Holzrahmens $[\text{kN}/\text{cm}^2]$
G_R	Schubmodul vom Holz des Rahmens $[\text{kN}/\text{cm}^2]$
h_R	Rahmenhöhe $[\text{cm}]$
b_R	Rahmenbreite $[\text{cm}]$
C_{VM}	Federsteifigkeit der Verbindungsmittel $[\text{kN}/\text{cm}^2]$
K_{ser}	Verschiebungsmodul der Schrauben (entspricht k_s) $[\text{kN}/\text{cm}]$
$n_{s,G}$	Anzahl der Schrauben im Gurt
$n_{s,P}$	Anzahl der Schrauben im Pfosten
L_G	Gurtlänge eines Feldes, entspricht Glasscheibenlänge $[\text{cm}]$
L_P	Pfostenlänge eines Feldes, entspricht Glasscheibenhöhe $[\text{cm}]$
C_{KL}	Federsteifigkeit der Koppelleisten $[\text{kN}/\text{cm}^2]$
G_{KL}	Schubmodul vom Holz der Koppelleisten $[\text{kN}/\text{cm}^2]$
h_{KL}	Koppelleistenhöhe $[\text{cm}]$
d_{KL}	Koppelleistendicke $[\text{cm}]$
C_{VH}	Federsteifigkeit des Vorholzes $[\text{kN}/\text{cm}^2]$
h_{VH}	Vorholzhöhe $[\text{cm}]$
d_{VH}	Vorholzdicke $[\text{cm}]$
C_τ	Federsteifigkeit der Schubverklebung $[\text{kN}/\text{cm}^2]$
G_τ	Schubmodul der Schubverklebung $[\text{kN}/\text{cm}^2]$
b_τ	Schubverklebungsbreite $[\text{cm}]$

d_τ	Schubverklebungsdicke [cm]
C_G	Federsteifigkeit der Glasscheiben [kN/cm ²]
G_G	Schubmodul von Glas [kN/cm ²]
d_G	Glasscheibendicke [cm]
l_G	Glasscheibenlänge [cm]

4.2.3.2 Formeln zur Berechnung der Systemsteifigkeit eines Schubfeldes infolge Schubverklebung K_τ

Äquivalenter Gesamtschubmodul des Klebers in [kN/cm²]:

$$G_{\text{äq,ges}} = C_{\text{ges}} \cdot \frac{d_\tau}{b_\tau} \quad (4.22)$$

Berechnung nach Kreuzinger und Niedermaier:

$$\text{Schubsteifigkeit:} \quad k_u = k_w = G_{\text{äq,ges}} \cdot \frac{b_\tau}{d_\tau} \quad [\text{kN/cm}^2] \quad (4.23)$$

$$\text{Verschiebung:} \quad u = \frac{2\text{III}}{k_u \text{II}} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{k_w \cdot h}{k_u \cdot 3 \cdot \text{II}}} + \frac{\frac{h}{\text{II}}}{1 + \frac{k_w \cdot \text{II}}{k_u \cdot 3 \cdot h}} \right) \quad (4.24)$$

(Kreuzinger, H., Niedermaier, P. (2005))

Die Federsteifigkeit eines Schubfeldes erhält man durch Umformung der Formel für die Verschiebung nach (Kreuzinger, H., Niedermaier, P. (2005)).

Systemsteifigkeit eines Schubfeldes infolge Schubverklebung:

$$K_\tau = \frac{\text{III}}{u} = \left[\frac{2}{k_u \text{II}} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{k_w \cdot h}{k_u \cdot 3 \cdot \text{II}}} + \frac{\frac{h}{\text{II}}}{1 + \frac{k_w \cdot \text{II}}{k_u \cdot 3 \cdot h}} \right) \right]^{-1} \quad (4.25)$$

Durch Einsetzen der in dieser Arbeit üblichen Bezeichnungen erhält man:

$$K_\tau = \left[\frac{2}{k_u \cdot h_G} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{k_w \cdot l_G}{k_u \cdot 3 \cdot h_G}} + \frac{\frac{l_G}{h_G}}{1 + \frac{k_w \cdot h_G}{k_u \cdot 3 \cdot l_G}} \right) \right]^{-1} \quad (4.26)$$

mit:

$G_{\text{äq,ges}}$	Äquivalenter Gesamtschubmodul des Klebers [kN/cm ²]
k_u, k_w	Flächenfedersteifigkeit nach Kreuzinger und Niedermaier [kN/cm ²]
u	Verschiebung nach Kreuzinger und Niedermaier
III	Horizontalkraft nach Kreuzinger und Niedermaier
K_τ	Systemsteifigkeit eines Schubfeldes infolge Schubverklebung [kN/cm]
II	Länge nach Kreuzinger und Niedermaier entspricht h_G
h	Höhe nach Kreuzinger und Niedermaier entspricht l_G
l_G	Glasscheibenlänge [cm]
h_G	Glasscheibenhöhe [cm]

In weiterer Folge wird vereinfacht angenommen, dass k_u und k_w identisch sind.

4.2.3.3 Auswertung der Formel für die Durchbiegung infolge Schubfeldträger-Theorie für eine Belastung von $F=22,5\text{ kN}$

4.2.3.3.1 Eingangswerte

$$G_R = G_{\text{Kerto-Q}} = 50\text{ kN/cm}^2, h_R = 10\text{ cm}, b_R = 6,9\text{ cm}$$

$$K_{\text{ser}} = 8,25\text{ kN/cm}, n_{S,G} = 29\text{ Stück}, L_G = 125\text{ cm}, n_{S,P} = 13\text{ Stück}, L_P = 62,5\text{ cm}$$

$$G_{KL} = G_{\text{BFSH}} = 18,5\text{ kN/cm}^2, h_{KL} = 10\text{ cm}, d_{KL} = 4\text{ cm}, h_{VH} = 2,4\text{ cm}, d_{VH} = 2\text{ cm}$$

$$G_\tau = 0,2\text{ kN/cm}^2, b_\tau = 1,4\text{ cm}, d_\tau = 0,3\text{ cm}$$

$$G_G = 2800\text{ kN/cm}^2, d_G = 0,8\text{ cm}, l_G = 125\text{ cm}, h_G = 62,5\text{ cm}$$

mit:

G_R	Schubmodul vom Holz des Rahmens [kN/cm^2]
h_R	Rahmenhöhe [cm]
b_R	Rahmenbreite [cm]
K_{ser}	Verschiebungsmodul der Schrauben (entspricht k_s) [kN/cm]
$n_{S,G}$	Anzahl der Schrauben im Gurt
$n_{S,P}$	Anzahl der Schrauben im Pfosten
L_G	Gurtlänge eines Feldes, entspricht Glasscheibenlänge [cm]
L_P	Pfostenlänge eines Feldes, entspricht Glasscheibenhöhe [cm]
G_{KL}	Schubmodul vom Holz der Koppelleisten [kN/cm^2]
h_{KL}	Koppelleistenhöhe [cm]
d_{KL}	Koppelleistendicke [cm]
h_{VH}	Vorholzhöhe [cm]
d_{VH}	Vorholzdicke [cm]
G_τ	Schubmodul der Schubverklebung [kN/cm^2]
b_τ	Schubverklebungsbreite [cm]
d_τ	Schubverklebungsdicke [cm]
G_G	Schubmodul von Glas [kN/cm^2]
d_G	Glasscheibendicke [cm]
l_G	Glasscheibenlänge [cm]
h_G	Glasscheibenhöhe [cm]

4.2.3.3.2 Berechnung der Federsteifigkeit eines Schubfeldes C_{ges}

- Federsteifigkeitsberechnungen der Teilkomponenten:

$$\text{Rahmen:} \quad C_R = 50 \cdot \frac{10}{6,9} = 72,46 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

$$\text{Verbindungsmittel:} \quad C_{VM} = 8,25 \cdot \min\left(\frac{29}{125}, \frac{13}{62,5}\right) = 1,72 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

$$\text{Koppelleiste:} \quad C_{KL} = 18,5 \cdot \frac{10}{4} = 46,25 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

$$\text{Vorholz:} \quad C_{VH} = 18,5 \cdot \frac{2,4}{2} = 22,20 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

$$\text{Schubverklebungsfuge:} \quad C_\tau = 0,2 \cdot \frac{1,4}{0,3} = 0,93 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

$$\text{Glasscheibe:} \quad C_G = 2 \cdot 2800 \cdot \frac{0,8}{\left(\frac{62,5}{62,5} + \frac{1}{125}\right)} = 107,52 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

- Gesamtfedersteifigkeit eines Schubfeldes C_{ges} :

$$C_{ges} = \left(\frac{1}{72,46} + \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{1}{1,72} + \frac{1}{46,25} + \frac{1}{22,20} + \frac{1}{0,93} + \frac{1}{107,52} \right)^{-1}} \right)^{-1}$$

$$C_{ges} \approx 1,11 \text{ kN/cm}^2$$

4.2.3.3.3 Berechnung der Systemsteifigkeit eines Schubfeldes infolge Schubverklebung K_τ

Äquivalenter Gesamtschubmodul des Klebers: $G_{\ddot{a}q,ges} = 1,11 \cdot \frac{0,3}{1,4}$

$$G_{\ddot{a}q,ges} = 0,24 \text{ kN/cm}^2$$

Berechnung nach Kreuzinger und Niedermaier:

Flächenfedersteifigkeit: $k_u = k_w = 0,24 \cdot \frac{1,4}{0,3}$

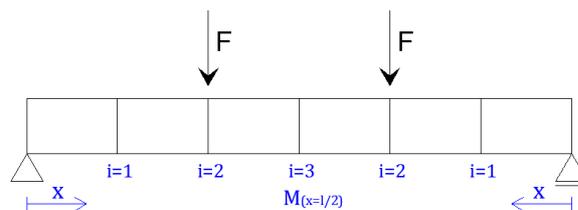
$$k_u = k_w = 1,11 \text{ kN/cm}^2$$

Systemsteifigkeit eines Schubfeldes infolge Schubverklebung:

$$K_\tau = \left[\frac{2}{1,11 \cdot 62,5} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{1,11 \cdot 125}{1,11 \cdot 3 \cdot 62,5}} + \frac{\frac{125}{62,5}}{1 + \frac{1,11 \cdot 62,5}{1,11 \cdot 3 \cdot 125}} \right) \right]^{-1}$$

$$K_\tau = 14,97 \text{ kN/cm}$$

4.2.3.3.4 Berechnung der Durchbiegung



Querkraftverlauf



Abbildung 104: Holz-Glas-Verbundträger mit Querkraftverlauf bei einer Belastung von $F = 22,5 \text{ kN}$ (M steht für die Mitte des Trägers)

Auswertung der Durchbiegung an den Stellen:

$w_{1,(x=l/3)}$: Verformung unter linker Kraft bei $i=2$ gemäß Abbildung 104

$w_{2,(x=l/2)}$: Verformung in Trägermitte bei $i=3$ gemäß Abbildung 104

$w_{3,(x=l/3)}$: Verformung unter rechter Kraft bei $i=2$ gemäß Abbildung 104

Q_i : $Q_1 = 22,5$ kN, $Q_2 = 22,5$ kN, $Q_3 = 0$ kN

$$w_{1,SFTT,(x=l/3),i=2} = w_{3,SFTT,(x=l/3),i=2} = \frac{1}{K_\tau} \cdot (Q_1 + Q_2) = \frac{1}{14,97} \cdot (22,5 + 22,5) = 3,01 \text{ cm}$$

$$w_{2,SFTT,(x=l/2),i=3} = \frac{1}{K_\tau} \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3) = \frac{1}{14,97} \cdot (22,5 + 22,5 + 0) = 3,01 \text{ cm}$$

4.2.4 Berechnung der Gesamtdurchbiegung bei $F = 22,5$ kN infolge Biege- und Schubverformungen und Vergleich mit dem Realversuch

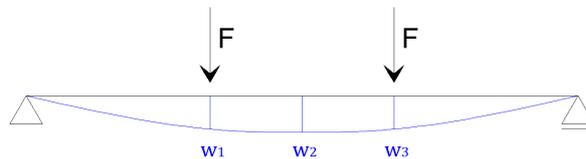


Abbildung 105: Durchbiegung des Trägers

- Durchbiegungen nach der theoretischen Berechnung:

$$w_x = w_{x,BL} + w_{x,SFTT}$$

$$w_{1,(x=l/3)} = 0,79 + 3,01 = 3,80 \text{ cm}$$

$$w_{2,(x=l/2)} = 0,90 + 3,01 = 3,91 \text{ cm}$$

$$w_{3,(x=l/3)} = 0,79 + 3,01 = 3,80 \text{ cm}$$

mit:

$w_{x,SFTT}$ Durchbiegung an der Stelle x infolge der Schubfeldträger-Theorie

$w_{x,BL}$ Durchbiegung an der Stelle x infolge der Biegetheorie

- Durchbiegungen aus den Realversuchen:

$$w_{1,(x=l/3),Realversuch} = 2,526 \text{ cm}$$

$$w_{2,(x=l/2),Realversuch} = 2,747 \text{ cm}$$

$$w_{3,(x=l/3),Realversuch} = 2,526 \text{ cm}$$

Das Ergebnis der theoretische Berechnung liegt deutlich auf der sicheren Seite.

4.3 Tragfähigkeitsnachweis – ULS (Ultimate Limit State)

Die Versuche zu Holz-Glas-Verbundschubfeldträgern haben gezeigt, dass für die Tragfähigkeit des gesamten Trägers die Zugfestigkeit des Untergurts maßgebend ist. Bei allen drei Großproben kam es zuallererst zu einem Versagen des Untergurts infolge Normalkraft, und infolge dessen teilweise auch zu einem Versagen des Obergurts infolge Querkraft. Sonstige Teile der Konstruktion wie Glasscheiben und Kleber, hielten den Kräften bis zu diesem Zeitpunkt stand.

4.3.1 Formel zur Berechnung der Gurtnormalkräfte

$$N_x = N_{x,\tau} = N_{x,BL} \quad (4.27)$$

$$N_x = N_{x,\tau} = \frac{M_x}{H} \quad (4.28)$$

mit:

N_x	gesuchte Gurtnormalkraft
$N_{x,\tau}$	Gurtnormalkraft an der Stelle x infolge Schubfeldträger-Theorie
$N_{x,BL}$	Gurtnormalkraft an der Stelle x infolge der Biegetheorie
M_x	Biegemoment an der Stelle x
H	Trägerhöhe

4.3.2 Formeln zur Berechnung der Normalkraft $N_{x,\tau}$ im Ober- und Untergurt nach Schubfeldträger-Theorie

mit:

q	Schubfluss [kN/m]
N	Normalkraft [kN]
F	Druckkraft auf Träger in den Drittelpunkten [kN]
h_{SF}	Schubfeldhöhe [m]
b_{SF}	Schubfeldbreite [m]
A_l, A_r	Auflagerkraft links und rechts [kN]

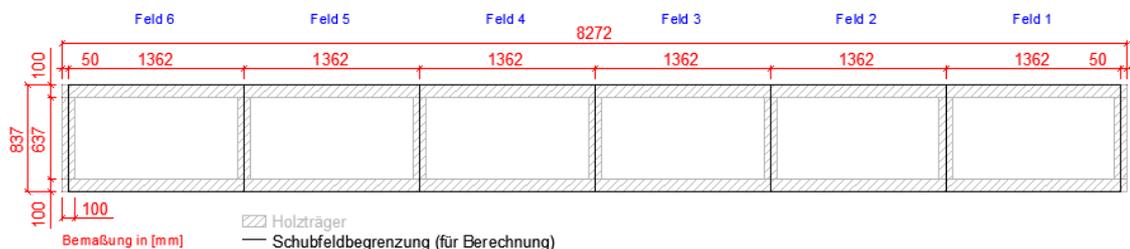


Abbildung 106: Maße und Nummerierung der Schubfelder

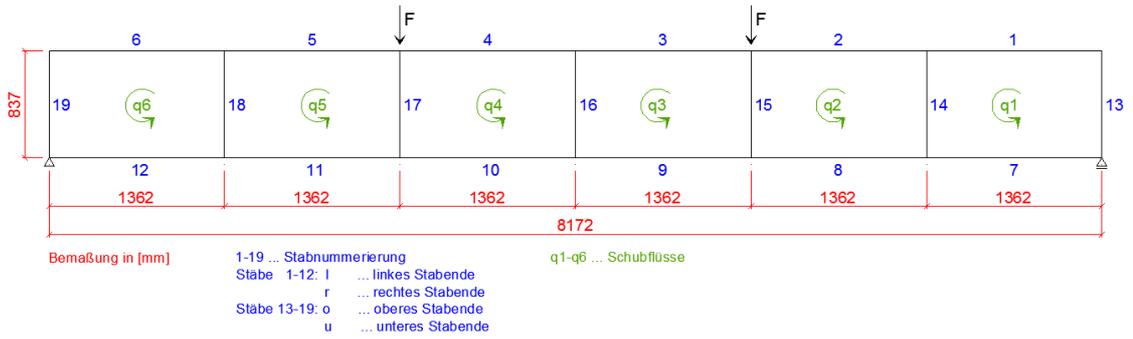


Abbildung 107: Nummerierung der Stäbe

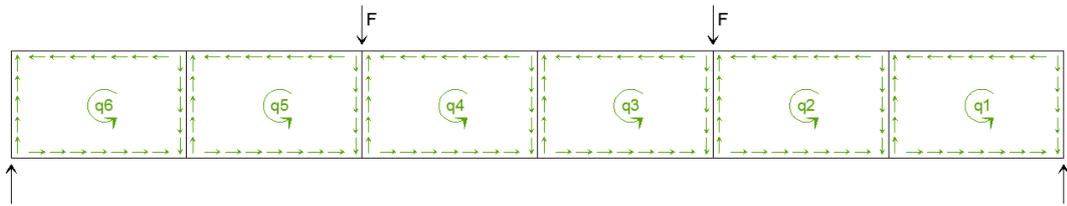


Abbildung 108: Richtung und Nummerierung der Schubflüsse

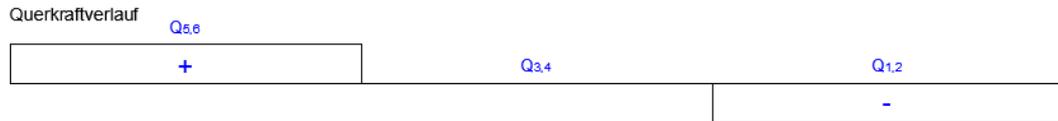


Abbildung 109: Querkraftverlauf

$$q = \frac{Q}{h_{SF}} \tag{4.29}$$

$$q_1 = q_2 = \frac{Q_{1,2}}{h_{SF}} \quad (\text{negativ})$$

$$q_3 = q_4 = \frac{Q_{3,4}}{h_{SF}} \quad (=0)$$

$$q_5 = q_6 = \frac{Q_{5,6}}{h_{SF}} \quad (\text{positiv})$$

$$N_0 + q \cdot x = N_{x,\tau} \tag{4.30}$$

$$N_{17,o} = -F$$

$$N_{17,u} = 0$$

$$N_{17,o} + q_5 \cdot h_{SF} = N_{17,u}$$

$$\Rightarrow q_5 = \frac{N_{17,u} - N_{17,o}}{h_{SF}}$$

$$N_{19,u} = -A_l = -F$$

$$N_{15,o} = -F$$

$$N_{15,u} = 0$$

$$N_{15,o} - q_2 \cdot h_{SF} = N_{15,u}$$

$$\Rightarrow q_2 = \frac{N_{15,o} - N_{15,u}}{h_{SF}}$$

$$N_{13,u} = -A_r = -F$$

$$\begin{aligned}
 N_{19,o} &= 0 & N_{13,o} &= 0 \\
 N_{19,u} + q_6 \cdot h_{SF} &= N_{19,o} & N_{13,u} - q_1 \cdot h_{SF} &= N_{13,o} \\
 \Leftrightarrow q_6 &= \frac{N_{19,o} - N_{19,u}}{h_{SF}} & \Leftrightarrow q_1 &= \frac{N_{13,u} - N_{13,o}}{h_{SF}} \\
 N_{12,l} &= 0 & N_{7,r} &= 0 \\
 N_{12,r} &= N_{12,l} + q_6 \cdot b_{SF} & N_{7,l} &= N_{7,r} - q_1 \cdot b_{SF} \\
 N_{11,l} &= N_{12,r} & N_{8,r} &= N_{7,l} \\
 N_{11,r} &= N_{11,l} + q_5 \cdot b_{SF} & N_{8,l} &= N_{8,r} - q_2 \cdot b_{SF} \\
 N_{6,l} &= 0 & N_{1,r} &= 0 \\
 N_{6,r} &= N_{6,l} - q_6 \cdot b_{SF} & N_{1,l} &= N_{1,r} + q_1 \cdot b_{SF} \\
 N_{5,l} &= N_{6,r} & N_{2,r} &= N_{1,l} \\
 N_{5,r} &= N_{5,l} - q_5 \cdot b_{SF} & N_{2,l} &= N_{2,r} + q_2 \cdot b_{SF} \\
 N_{18,u} &= 0 & N_{14,u} &= 0 \\
 N_{18,o} &= 0 & N_{14,o} &= 0 \\
 q_4 &= 0 & q_3 &= 0 \\
 N_{4,l} &= N_{5,r} & N_{3,r} &= N_{2,l} \\
 N_{4,r} &= N_{4,l} - q_4 \cdot b_{SF} & N_{3,l} &= N_{3,r} + q_3 \cdot b_{SF} \\
 N_{10,l} &= N_{11,r} & N_{9,r} &= N_{8,l} \\
 N_{10,r} &= N_{10,l} + q_4 \cdot b_{SF} & N_{9,l} &= N_{9,r} - q_3 \cdot b_{SF} \\
 N_{16,u} &= -q_3 \cdot h_{SF} = 0 \\
 N_{16,o} &= -q_4 \cdot h_{SF} = 0
 \end{aligned}$$

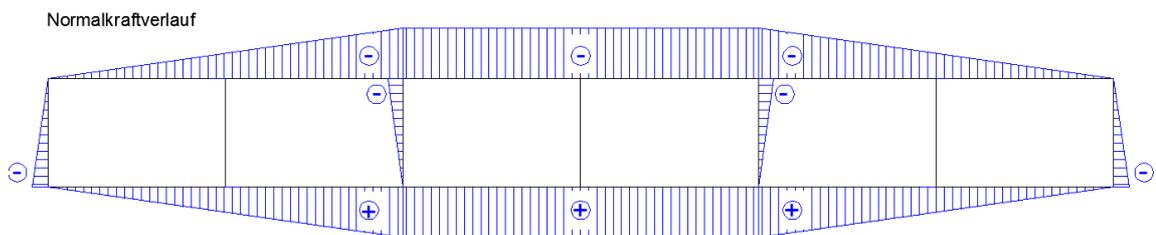


Abbildung 110: Normalkraftverlauf nach Schubfeldträger-Theorie

Auswertung der Formeln für $F = 22,5 \text{ kN}$

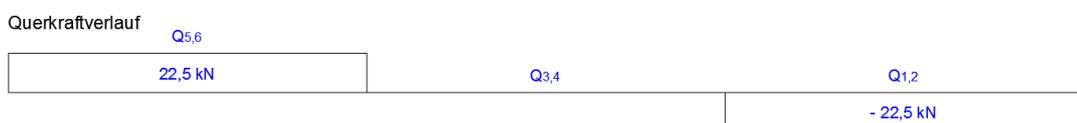


Abbildung 111: Querkraftverlauf bei einer Belastung von $F = 22,5 \text{ kN}$

- Eingangswerte:

$$h_{SF} = 0,837 \text{ m}$$

$$b_{SF} = 1,362 \text{ m}$$

$$Q_{1,2} = -22,5 \text{ kN}$$

$$Q_{3,4} = 0 \text{ kN}$$

$$Q_{5,6} = 22,5 \text{ kN}$$

- Schubflüsse:

$$q_1 = q_2 = \frac{-22,5}{0,837} = -26,88 \text{ kN/m}$$

$$q_3 = q_4 = \frac{0}{0,837} = 0 \text{ kN/m}$$

$$q_5 = q_6 = \frac{22,5}{0,837} = 26,88 \text{ kN/m}$$

- Normalkräfte:

N [kN], q [kN/m]

$$N_{17,o} = -22,5$$

$$N_{17,u} = 0$$

$$\Rightarrow q_5 = \frac{0 - (-22,5)}{0,837} = 26,88$$

$$N_{19,u} = -22,5$$

$$N_{19,o} = 0$$

$$\Rightarrow q_6 = \frac{0 - (-22,5)}{0,837} = 26,88$$

$$N_{12,l} = 0$$

$$N_{12,r} = 0 + 26,88 \cdot 1,362 = 36,61$$

$$N_{11,l} = 36,61$$

$$N_{11,r} = 36,61 + 26,88 \cdot 1,362 = 73,23$$

$$N_{6,l} = 0$$

$$N_{6,r} = 0 - 26,88 \cdot 1,362 = -36,61$$

$$N_{5,l} = -36,61$$

$$N_{5,r} = -36,61 - 26,88 \cdot 1,362 \\ = -73,23$$

$$N_{18,u} = 0$$

$$N_{18,o} = 0$$

$$q_4 = 0$$

$$N_{15,o} = -22,5$$

$$N_{15,u} = 0$$

$$\Rightarrow q_2 = \frac{-22,5 - 0}{0,837} = -26,88$$

$$N_{13,u} = -22,5$$

$$N_{13,o} = 0$$

$$\Rightarrow q_1 = \frac{-22,5 - 0}{0,837} = -26,88$$

$$N_{7,r} = 0$$

$$N_{7,l} = 0 - (-26,88) \cdot 1,362 = 36,61$$

$$N_{8,r} = 36,61$$

$$N_{8,l} = 36,61 - (-26,88) \cdot 1,362 \\ = 73,23$$

$$N_{1,r} = 0$$

$$N_{1,l} = 0 + (-26,88) \cdot 1,362 = -36,61$$

$$N_{2,r} = -36,61$$

$$N_{2,l} = -36,61 + (-26,88) \cdot 1,362 \\ = -73,23$$

$$N_{14,u} = 0$$

$$N_{14,o} = 0$$

$$q_3 = 0$$

$$\begin{aligned}
 N_{4,l} &= -73,23 & N_{3,r} &= -73,23 \\
 N_{4,r} &= -73,23 - 0 \cdot 1,362 = -73,23 & N_{3,l} &= -73,23 - 0 \cdot 1,362 = -73,23 \\
 N_{10,l} &= 73,23 & N_{9,r} &= 73,23 \\
 N_{10,r} &= 73,23 + 0 \cdot 1,362 = 73,23 & N_{9,l} &= 73,23 + 0 \cdot 1,362 = 73,23 \\
 N_{16,u} &= -0 \cdot 0,837 = 0 \\
 N_{16,o} &= -0 \cdot 0,837 = 0
 \end{aligned}$$

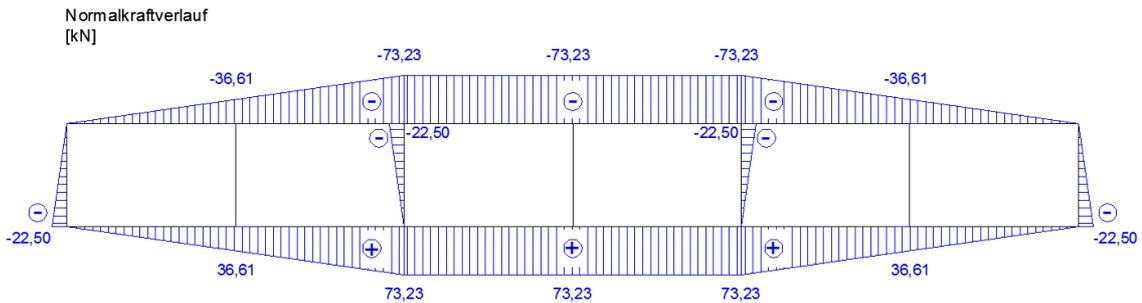


Abbildung 112: Normalkraftverlauf nach Schubfeldträger-Theorie bei $F = 22,5$ kN

4.3.3 Formeln zur Berechnung der Normalkraft $N_{x,BL}$ im Ober- und Untergurt infolge der Biegetheorie

$$N_{x,BL} = \frac{M_x}{H} \tag{4.31}$$

mit:
 $N_{x,BL}$ Gurtnormalkraft an der Stelle x infolge der Biegetheorie
 M_x Biegemoment an der Stelle x
 H Trägerhöhe

Mit dieser Formel erhält man mit wenig Aufwand die Normalkräfte in Ober- und Untergurt. Die Normalkräfte in den vertikalen Pfosten und die Schubflüsse können anschließend mit der Formel (4.30) $N_0 + q \cdot x = N_{x,\tau}$ berechnet werden.

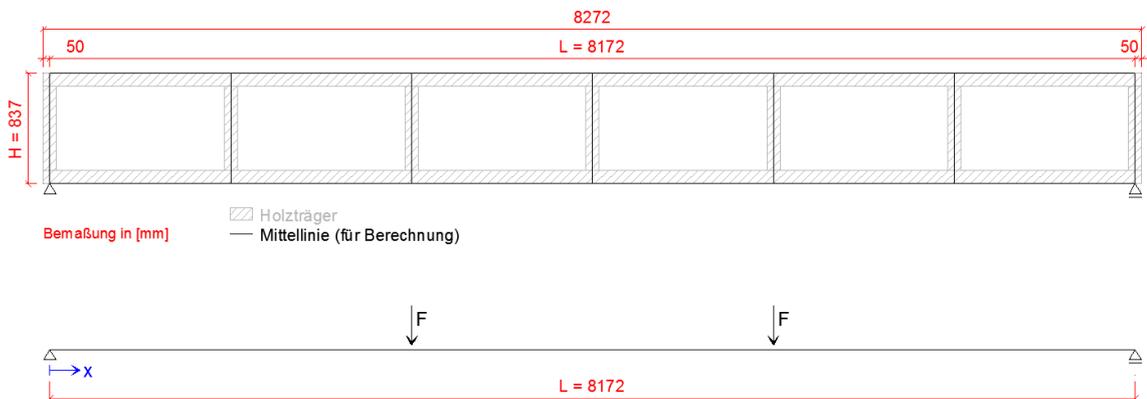


Abbildung 113: Abmessungen zur Berechnung des Momentenverlaufs und der Gurtnormalkräfte an der Stelle x infolge der Biegetheorie

Momentenverlauf

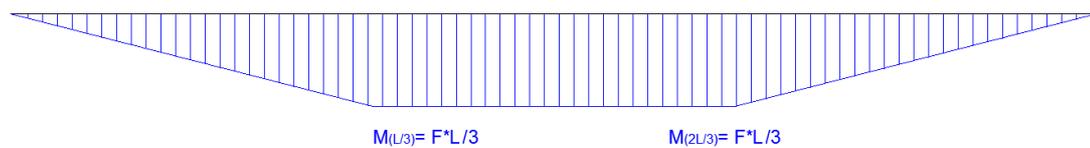


Abbildung 114: Momentenverlauf zufolge der Kraft F

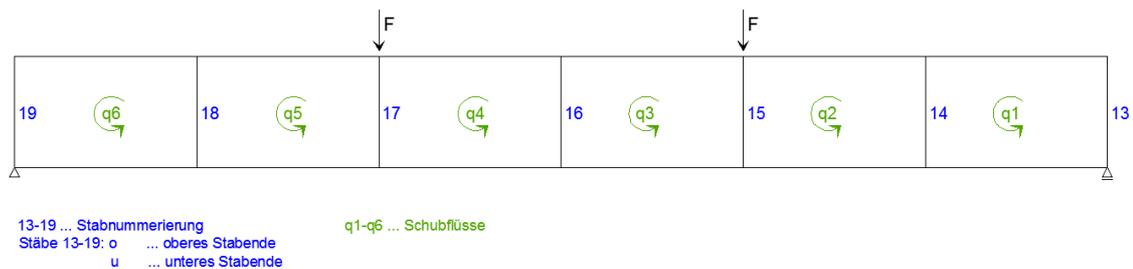


Abbildung 115: Nummerierung der Pfosten und Schubflüsse

$$M_{x=\frac{L}{6}} = M_{x=\frac{5L}{6}} = \frac{F \cdot L}{6}$$

$$M_{x=\frac{L}{3}} = M_{x=\frac{L}{2}} = M_{x=\frac{2L}{3}} = \frac{F \cdot L}{3}$$

$$N_{17,o} = -F$$

$$N_{17,u} = 0$$

$$N_{17,o} + q_5 \cdot h_{SF} = N_{17,u}$$

$$\Leftrightarrow q_5 = \frac{N_{17,u} - N_{17,o}}{h_{SF}}$$

$$N_{19,u} = -A_l = -F$$

$$N_{19,o} = 0$$

$$N_{19,u} + q_6 \cdot h_{SF} = N_{19,o}$$

$$\Leftrightarrow q_6 = \frac{N_{19,o} - N_{19,u}}{h_{SF}}$$

$$N_{18,u} = 0$$

$$N_{18,o} = 0$$

$$q_4 = 0$$

$$N_{16,u} = -q_3 \cdot h_{SF} = 0$$

$$N_{16,o} = -q_4 \cdot h_{SF} = 0$$

$$N_{15,o} = -F$$

$$N_{15,u} = 0$$

$$N_{15,o} - q_2 \cdot h_{SF} = N_{15,u}$$

$$\Leftrightarrow q_2 = \frac{N_{15,o} - N_{15,u}}{h_{SF}}$$

$$N_{13,u} = -A_r = -F$$

$$N_{13,o} = 0$$

$$N_{13,u} - q_1 \cdot h_{SF} = N_{13,o}$$

$$\Leftrightarrow q_1 = \frac{N_{13,u} - N_{13,o}}{h_{SF}}$$

$$N_{14,u} = 0$$

$$N_{14,o} = 0$$

$$q_3 = 0$$

Auswertung der Formeln für F= 22,5 kN

- Eingangswerte:

$$L = 8,172 \text{ m}$$

$$H = 0,837 \text{ m}$$

- Momente in den Sechstelpunkten:

$$M_{(x=\frac{L}{6})} = M_{(x=\frac{5L}{6})} = \frac{22,5 \cdot 8,172}{6} = 30,65 \text{ kN/m}$$

$$M_{(x=\frac{L}{3})} = M_{(x=\frac{2L}{3})} = \frac{22,5 \cdot 8,172}{3} = 61,29 \text{ kN/m}$$

$$M_{(x=\frac{L}{2})} = \frac{22,5 \cdot 8,172}{3} = 61,29 \text{ kN/m}$$

- Gurtnormalkraft an der Stelle x infolge der Biegetheorie:

$$N_{(x=\frac{L}{6})} = N_{(x=\frac{5L}{6})} = \frac{30,65}{0,837} = 36,61 \text{ kN}$$

$$N_{(x=\frac{L}{3})} = N_{(x=\frac{2L}{3})} = \frac{61,29}{0,837} = 73,23 \text{ kN}$$

$$N_{(x=\frac{L}{2})} = \frac{61,29}{0,837} = 73,23 \text{ kN}$$

Dabei ist zu beachten, dass die Normalkräfte im Obergurt negativ (Druck) und im Untergurt positiv (Zug) sind.

- Normalkräfte in den Pfosten und Schubflüsse:

N [kN], q [kN/m]

$$N_{17,o} = -22,5$$

$$N_{15,o} = -22,5$$

$$N_{17,u} = 0$$

$$N_{15,u} = 0$$

$$\Leftrightarrow q_5 = \frac{0 - (-22,5)}{0,837} = 26,88$$

$$\Leftrightarrow q_2 = \frac{-22,5 - 0}{0,837} = -26,88$$

$$N_{19,u} = -22,5$$

$$N_{13,u} = -22,5$$

$$N_{19,o} = 0$$

$$N_{13,o} = 0$$

$$\Leftrightarrow q_6 = \frac{0 - (-22,5)}{0,837} = 26,88$$

$$\Leftrightarrow q_1 = \frac{-22,5 - 0}{0,837} = -26,88$$

$$N_{18,u} = 0$$

$$N_{14,u} = 0$$

$$N_{18,o} = 0$$

$$N_{14,o} = 0$$

$$q_4 = 0$$

$$q_3 = 0$$

$$N_{16,u} = -0 \cdot 0,837 = 0$$

$$N_{16,o} = -0 \cdot 0,837 = 0$$

4.3.4 Zusammenfassung der Berechnungsmöglichkeiten der Normalkräfte

Der Tragfähigkeitsnachweis kann auf zwei Arten geführt werden:

- Berechnung der Normalkräfte nach der Schubfeldträger-Theorie
- Berechnung der Normalkräfte in den Gurten nach der Biegetheorie und in den Pfosten nach der Schubfeldträger-Theorie

Beide Berechnungen liefern dieselben Ergebnisse. Dies wird auch anhand der Auswertung in den Drittelpunkten bei einer Last von 22,5 kN verdeutlicht.

5 Vergleich zwischen den Ergebnissen der Realversuche und der theoretischen Berechnungen

5.1 Gebrauchstauglichkeitsnachweis - SLS (Serviceability Limit State)

Um den Gebrauchstauglichkeitsnachweis zu führen kann mit Formel (4.6) aus Kapitel 0 die Durchbiegung berechnet werden. In den Großprobenversuchen wurde die Trägerdurchbiegung mit den induktiven Wegaufnehmern V1, V2 und V3 (siehe Abbildung 57) gemessen.

Als Beispiel wurde in Kapitel 4.2.4 die Durchbiegung bei einer Last von 22,5 kN berechnet und mit dem Realversuch verglichen. Diese Last wurde gewählt, da sich im Realversuch eine Durchbiegung von rund $L/300 = 2,724$ cm einstellte. Der Wert $L/300$ wurde gemäß (*EUROCODE 5, Tabelle 7.2*) für die maximal zulässige Durchbiegung für beidseitig aufgelagerte Biegestäbe gewählt.

Folgende Ergebnisse wurden berechnet und aus den Versuchen abgelesen:

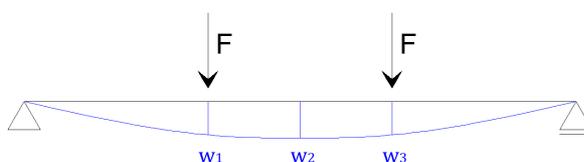


Abbildung 116: Durchbiegung des Trägers

$$\begin{aligned}
 w_{1,(x=\frac{l}{3}),\text{Berechnung}} &= 3,80 \text{ cm} > w_{1,(x=\frac{l}{3}),\text{Realversuch}} &= 2,526 \text{ cm} \\
 w_{2,(x=\frac{l}{2}),\text{Berechnung}} &= 3,91 \text{ cm} > w_{2,(x=\frac{l}{2}),\text{Realversuch}} &= 2,747 \text{ cm} \\
 w_{3,(x=\frac{l}{3}),\text{Berechnung}} &= 3,80 \text{ cm} > w_{3,(x=\frac{l}{3}),\text{Realversuch}} &= 2,526 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Die folgenden Diagramme zeigen die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den theoretischen Berechnungen und jenen aus den Realversuchen. Diese drei Diagramme zeigen die Durchbiegungen in Trägermitte, Trägerdrittelpunkt und Trägersechstelpunkt. Auf der Abszissenachse ist die auf das System wirkende Gesamtkraft dargestellt.

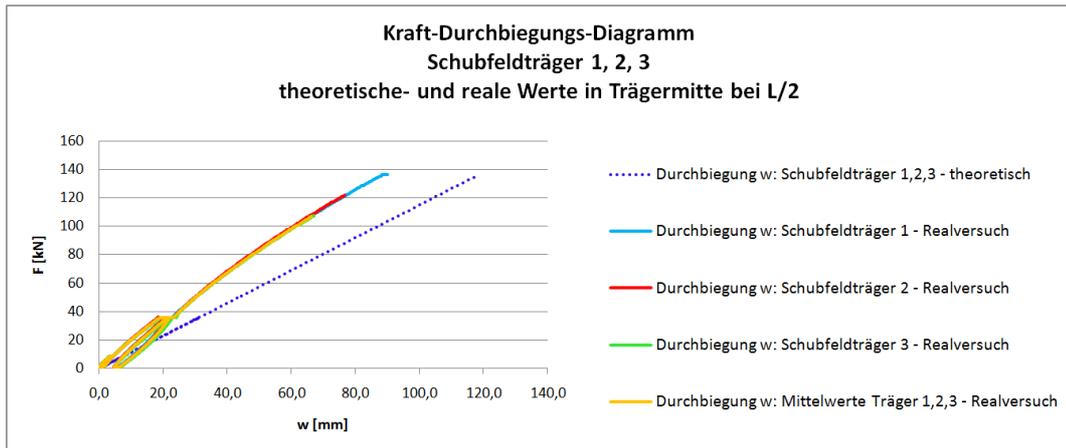


Abbildung 117: Vergleich der theoretischen und realen Durchbiegungen in Trägermitte

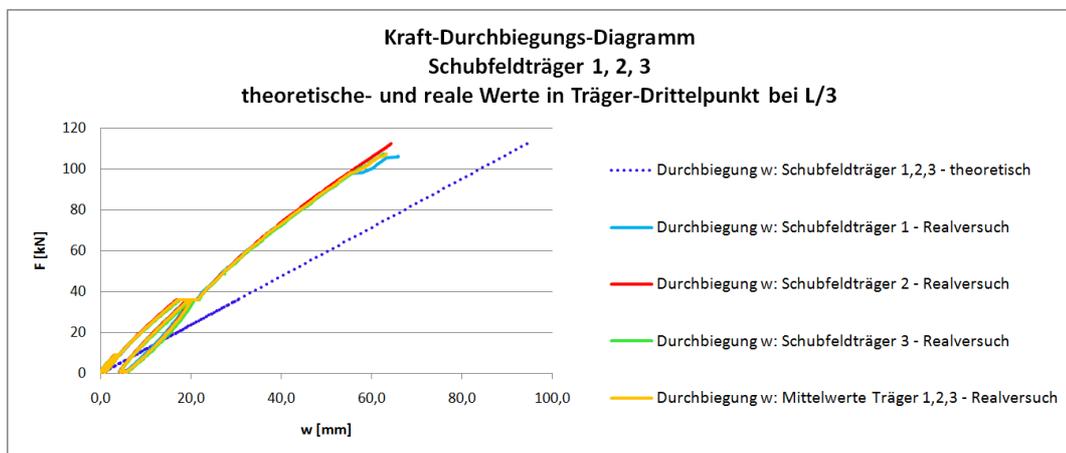


Abbildung 118: Vergleich der theoretischen und realen Durchbiegungen im Träger-Drittelpunkt

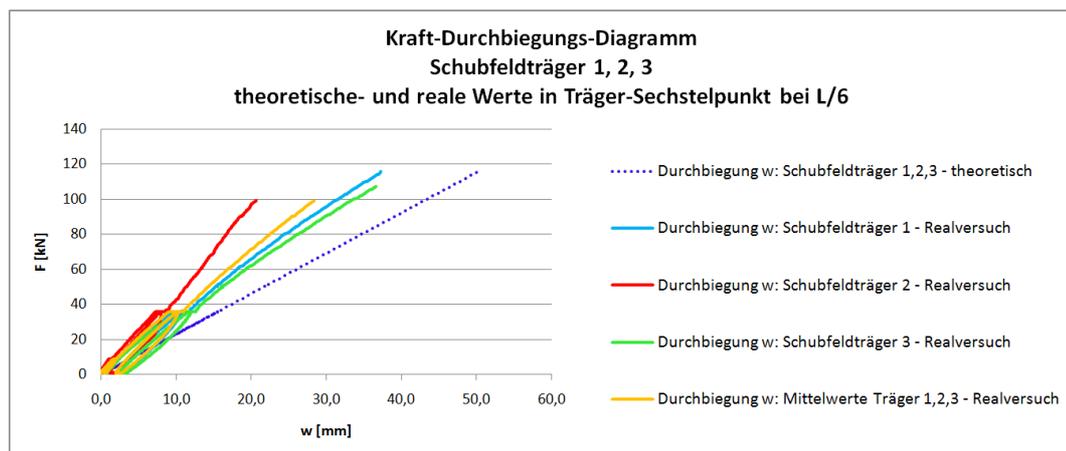


Abbildung 119: Vergleich der theoretischen und realen Durchbiegungen im Träger-Sechstelpunkt

Anhand der Diagramme wird deutlich, dass die realen Durchbiegungswerte die theoretischen Werte unterschreiten. Diese liegen auf der sicheren Seite und sind aus Sicht des Verfassers ausreichend genau. Aus diesem Grund können die Formeln für eine hinreichend exakte Berechnung der Durchbiegungen eines Holz-Glas-Verbundschubfeldträgers herangezogen werden.

5.2 Tragfähigkeitsnachweis – ULS (Ultimate Limit State)

Die für den Tragfähigkeitsnachweis benötigte Normalkraft in Ober- und Untergurt kann mit der Formel (4.28) aus Kapitel 4.3.1 berechnet werden.

Um die im Verlauf des Versuchs aufgetretenen Normalkräfte im Träger zu ermitteln, werden die Holzdehnungen des Ober- und Untergurts herangezogen. Diese wurden durch die am Rahmen angebrachten Dehnmessstreifen H1 und H2 (siehe Abbildung 57) ermittelt. In weiterer Folge werden die Spannungen in den Gurten mit der Formel

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5.1)$$

berechnet. Der E-Modul wird mit $E_{0,\text{mean}} = 1050 \text{ kN/cm}^2$ (*Finnforest Deutschland GmbH: Technische Daten, S. 10*) angesetzt. Die Gurtnormalkräfte lassen sich anschließend mit der Formel

$$N = \sigma \cdot A \quad (5.2)$$

berechnen, wobei A die Gurtquerschnittsfläche aus Kerto-Q in cm^2 angibt. Für die Spannung σ wird die maximale Spannung der Randfaser eingesetzt.

Die gesamte Gurtquerschnittsfläche aus Kerto-Q beträgt 69 cm^2 . Da der Spannungsverlauf über den Querschnitt in der Realität nicht konstant verläuft, diese Formel aber von einem konstanten Verlauf ausgeht, wird mit einer reduzierten Querschnittsfläche, dafür aber mit den maximalen Spannungen aus den Versuchen gerechnet. Dazu wird die gesamte Querschnittsfläche zur reduzierten Querschnittsfläche in dasselbe Verhältnis gesetzt wie die maximale Spannung der Randfaser zur über den Gurtquerschnitt gemittelten Spannung. Da Holzgurte und Glasscheiben nachgiebig miteinander verbunden sind, kann nicht von einem linearen Verlauf über die Höhe des Schubfeldträgers ausgegangen werden. Die in der Klebefuge auftretende Schubspannung muss deshalb mit dem Gammaverfahren berechnet werden. Aus der Schubspannung, welche der Normalspannung in der Höhe der Klebefuge entspricht, und der maximalen Normalspannung der Randfaser wird dann die gemittelte Normalspannung berechnet.

Mittelwert der maximalen Querkraft aus den drei Schubfeldträgerversuchen:

$$V_{max} = \frac{V_{max,SFT1} + V_{max,SFT2} + V_{max,SFT3}}{3}$$

$$V_{max} = \frac{68,14 + 60,90 + 53,68}{3}$$

$$V_{max} = 60,91 \text{ kN}$$

Effektive Biegesteifigkeit des Holz-Glas-Verbundträgers (siehe 4.2.2.1.3):

$$EI_{\text{eff}} = 482354179,70 \text{ kNcm}^2$$

Nachgiebigkeitsfaktor (siehe 4.2.2.1.3):

$$\gamma_1 = 0,2930$$

Dehnsteifigkeit des gesamten Gurtes:

$$E_{BFSH} = 892,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{BFSH} = 89,6 \text{ cm}^2$$

$$E_{Kerto-Q} = 1050 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{Kerto-Q} = 69 \text{ cm}^2$$

$$EA_{Gurt} = E_{BFSH} \cdot A_{BFSH} + E_{Kerto-Q} \cdot A_{Kerto-Q}$$

$$EA_{Gurt} = 892,5 \cdot 89,6 + 1050 \cdot 69$$

$$EA_{Gurt} = 152418 \text{ kN}$$

Abstand des Schwerpunktes der Gurtes zur Spannungsnulllinie (siehe 4.2.2.1.3):

$$a_1 = 35,55 \text{ cm}$$

Breite der zwei Klebefugen:

$$b_k = 2 \cdot 1,4 \text{ cm}$$

Schubspannung in der Klebefuge nach (Kreher, K. (2004), S. 29):

$$\tau_{max} = \frac{V_{max}}{EI_{eff}} \cdot \gamma_1 \cdot EA_{Gurt} \cdot a_1 \cdot \frac{1}{b_k} \quad (5.3)$$

mit:

τ_{max}	maximale Schubspannung in der Klebefuge
EI_{eff}	Effektive Biegesteifigkeit des Holz-Glas-Verbundträgers
γ_1	Nachgiebigkeitsfaktor
EA_{Gurt}	Dehnsteifigkeit des gesamten Gurtes
a_1	Abstand des Schwerpunktes des Gurtes zur Spannungsnulllinie
b_k	Breite der Klebefuge

$$\tau_{max} = \frac{60,91}{482354179,70} \cdot 0,2930 \cdot 152418 \cdot 35,55 \cdot \frac{1}{2 \cdot 1,4}$$

$$\tau_{max} = 0,07 \text{ kN/cm}^2$$

Mittelwert der Maximalspannungen der Randfasern aus den drei Schubfeldträgerversuchen:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_{max,SFT1,OG} + \sigma_{max,SFT1,UG} + \sigma_{max,SFT2,OG} + \sigma_{max,SFT2,UG} + \sigma_{max,SFT3,OG} + \sigma_{max,SFT3,UG}}{6}$$

$$\sigma_{max} = \frac{18,18 + 18,89 + 14,44 + 18,25 + 16,73 + 17,25}{6}$$

$$\sigma_{max} = 17,29 \text{ kN}$$

Gemittelte Spannung:

$$\sigma_{mittel} = \frac{\sigma_{max} + \tau_{max}}{2}$$

$$\sigma_{mittel} = \frac{17,29 + 0,07}{2}$$

$$\sigma_{mittel} = 8,68 \text{ kN/cm}^2$$

Berechnung der reduzierten Gurtquerschnittsfläche:

$$\frac{A_{Kerto-Q}}{A_{red}} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{mittel}}$$

$$A_{red} = \frac{A_{Kerto-Q} \cdot \sigma_{mittel}}{\sigma_{max}}$$

$$A_{red} = \frac{69 \cdot 8,68}{17,29}$$

$$A_{red} = 34,64 \text{ cm}^2$$

In den kommenden vier Diagrammen (Abbildung 120 bis Abbildung 123) werden die sich aus der Berechnung ergebenden theoretischen Werte der Normalkraft in Ober- und Untergurt jenen aus den Realversuchen gegenübergestellt. Dabei ist auf der Abszissenachse die im Trägerdrittelpunkt angreifende Kraft, die Hälfte der auf das Gesamtsystem wirkenden Kraft, aus dem Großprobenversuch dargestellt. Abbildung 123 stellt eine Übersicht über die Normalkraftverläufe aller drei Träger sowie deren Mittelwerte dar.

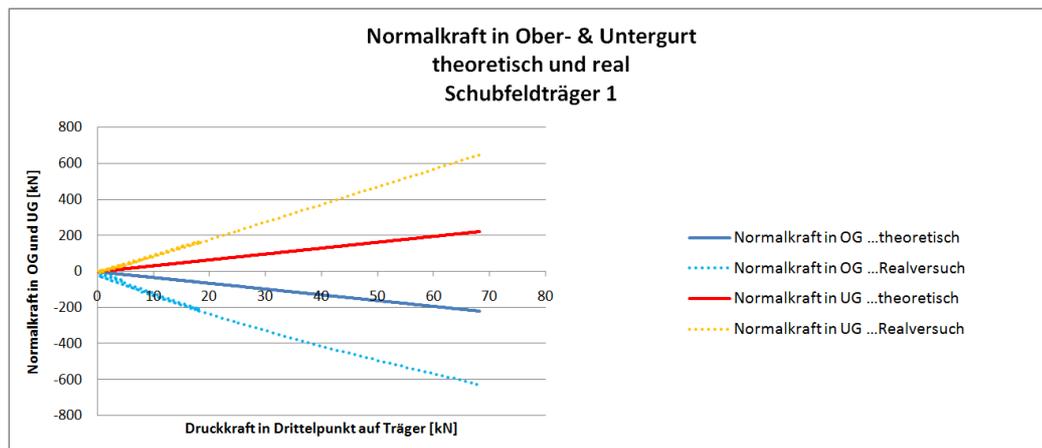


Abbildung 120: Vergleich der theoretischen und realen Normalkraft im Ober- und Untergurt (Schubfeldträger 1)

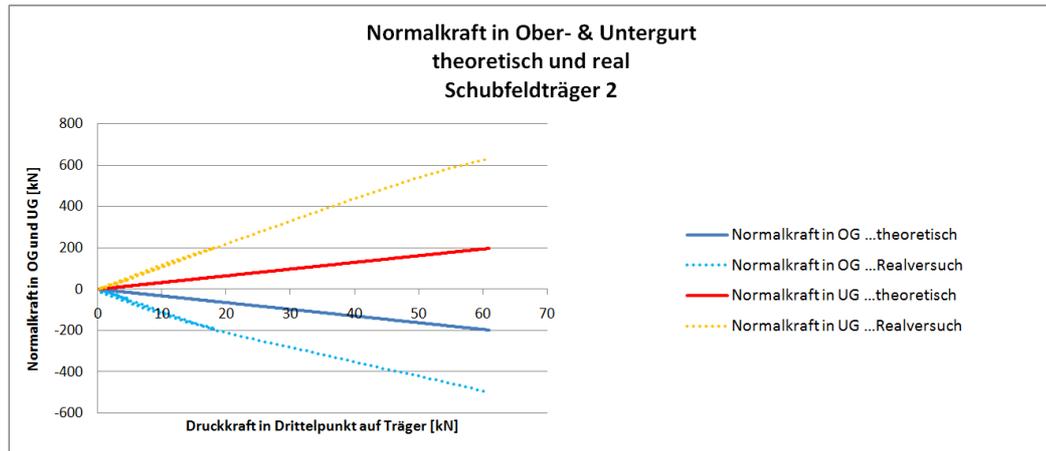


Abbildung 121: Vergleich der theoretischen und realen Normalkraft im Ober- und Untergurt (Schubfeldträger 2)

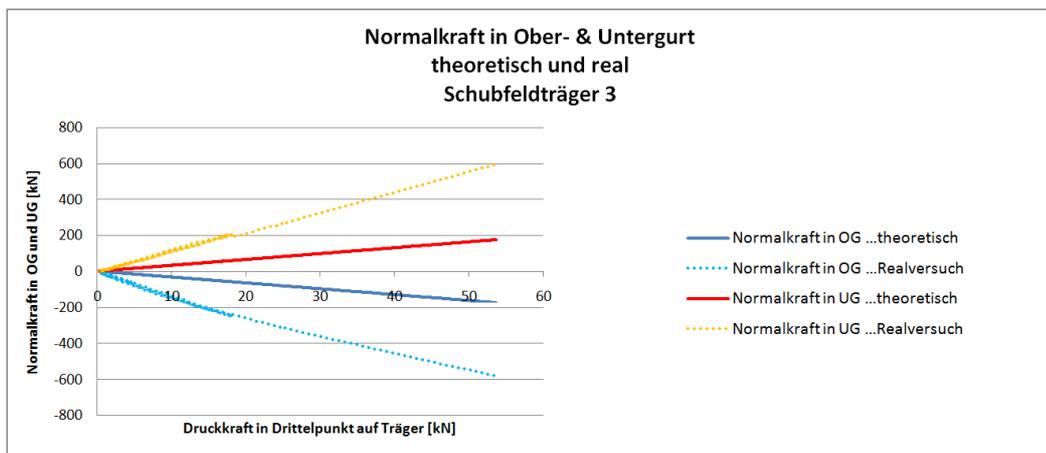


Abbildung 122: Vergleich der theoretischen und realen Normalkraft im Ober- und Untergurt (Schubfeldträger 3)

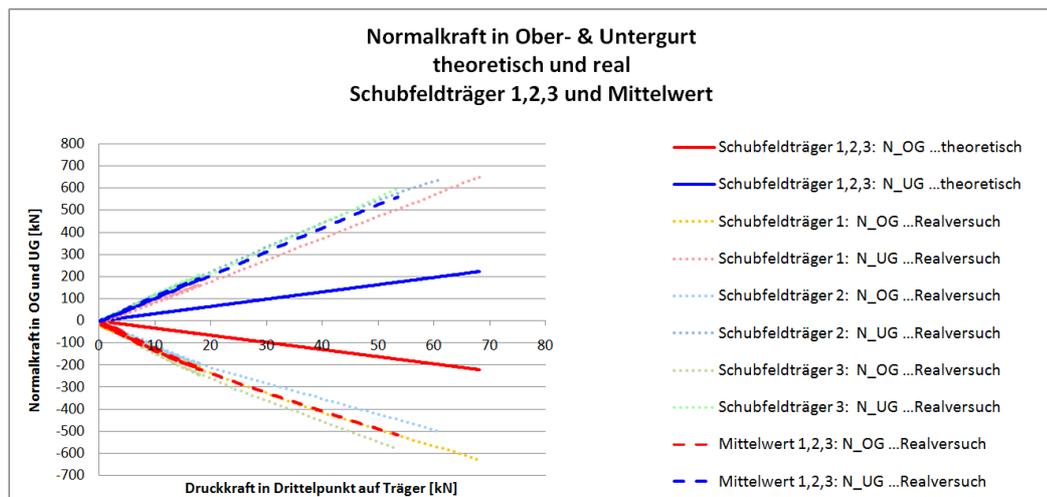


Abbildung 123: Vergleich der theoretischen und realen Normalkraft in Ober- und Untergurt von Schubfeldträger 1, 2, 3 und der Mittelwert aller drei Schubfeldträger

Bei den Diagrammen zeigt sich, dass die Berechnung der Normalkräfte in Obergurt und Untergurt scheinbar auf der unsicheren Seite liegt. In Abbildung 124 lässt sich jedoch erkennen, dass die Dehnmessstreifen, welche zur Messung der realen Dehnungen in den Gurten verwendet wurden, breiter sind als die Dicke einer Lamellenschicht des Furnierschichtholzes Kerto-Q. Daraus lässt sich vermuten, dass der Einfluss der überklebten Leimfuge die Messergebnisse verzerrte und die DMS aufgrund dessen größere Dehnungswerte lieferten, als tatsächlich im Holz auftraten. Die Ergebnisse der Dehnungsmessung werden aufgrund des inhomogenen Aufbaus des Messgrundes als nicht ausreichend zuverlässig angesehen.



Abbildung 124: DMS auf dem Obergurt des Rahmens

6 Berechnungs- und Bemessungsbeispiel eines Holz-Glas-Verbundschubfeldträgers

6.1 Annahmen für das Beispiel

1. Die Anzahl der Felder des Schubfeldträgers wurde mit sechs gewählt. Bei Abweichung von dieser Annahme sind die Berechnung der Eigenlasten, der Querkraftverlauf und die daraus folgenden Knotenlasten sowie die Formel der Durchbiegung infolge der Biegetheorie anzupassen.
2. Die Holz-Glas-Verbundelemente bestehen aus Glasscheiben welche auf einen mit „Vorholz“ benannten Holzteil der gesamten Koppelleiste geklebt werden. Diese Elemente werden anschließend beidseitig auf einen hölzernen Rahmen aus Kerto-Q, mit dem Aussehen eines Vierendeelträgers mit sechs Feldern, geschraubt.
Weicht der Aufbau des zu berechnenden Trägers von diesen Annahmen ab, so sind die Berechnungen der Volumina von Holz und Glas sowie die Formeln der Gesamtfedersteifigkeit eines Schubfeldes anzupassen.
3. Der Abstand der Verbindungsmittel an den Pfosten und Gurten ist konstant und identisch. Die Verbindungsmittel fallen in den Anwendungsbereich der EUROCODE 5 oder besitzen eine entsprechende, anzuwendende Zulassung.
4. Die in den Formeln verwendeten Einheiten können von jenen in den Annahmen variieren und müssen angepasst werden.
5. Die Schubmoduln der Schubverklebung längs und quer zur Fuge sind identisch.
6. Der Leitfaden geht davon aus, dass sich der Schubfeldträger in einem klimatisierten Raum befindet. Sollte diese Annahme nicht zutreffen sind die Deformationsbeiwerte entsprechend den zu erwartenden klimatischen Bedingungen abzuändern.
7. Für die Konstruktionshöhe h bzw. für die Konstruktionslänge l eines Schubfeldes wird die Höhe h_G bzw. die Länge l_G der Glasscheibe herangezogen.
8. Eine abgeminderte Längenänderung der aus Furniersperrholz bestehenden Koppelleiste gemäß (*Hochhauser, W. (2011)*) bleibt unberücksichtigt. Das Quellmaß längs der Deckfurniere und quer zu den Deckfurnieren ist identisch.
9. Die Bestimmung des Verschiebungsmoduls der Schrauben erfolgt nach EUROCODE 5, sofern die verwendeten Hölzer dessen Bedingungen entsprechen. Anderenfalls muss der Verschiebungsmodul durch Versuche bestimmt werden.
10. Alle Bauteilkomponenten der beplankenden HGV-Scheiben werden als in eine Ebene geschoben angenommen.
11. Die Nachweisführung bezieht sich auf die Bemessung der Klebefuge. Die verbleibenden Bauteilkomponenten müssen gesondert nachgewiesen werden.

6.2 Darstellung des angenommenen Schubfeldträgers

Für das folgende Berechnungs- und Bemessungsbeispiel wurde ein Schubfeldträger, bestehend aus sechs Feldern herangezogen. Wie in Abbildung 125 dargestellt, werden auf diesen Gleichlasten aufgebracht, welche in äquivalente Knotenlasten umgerechnet werden.

Darstellung des Schubfeldträgers:

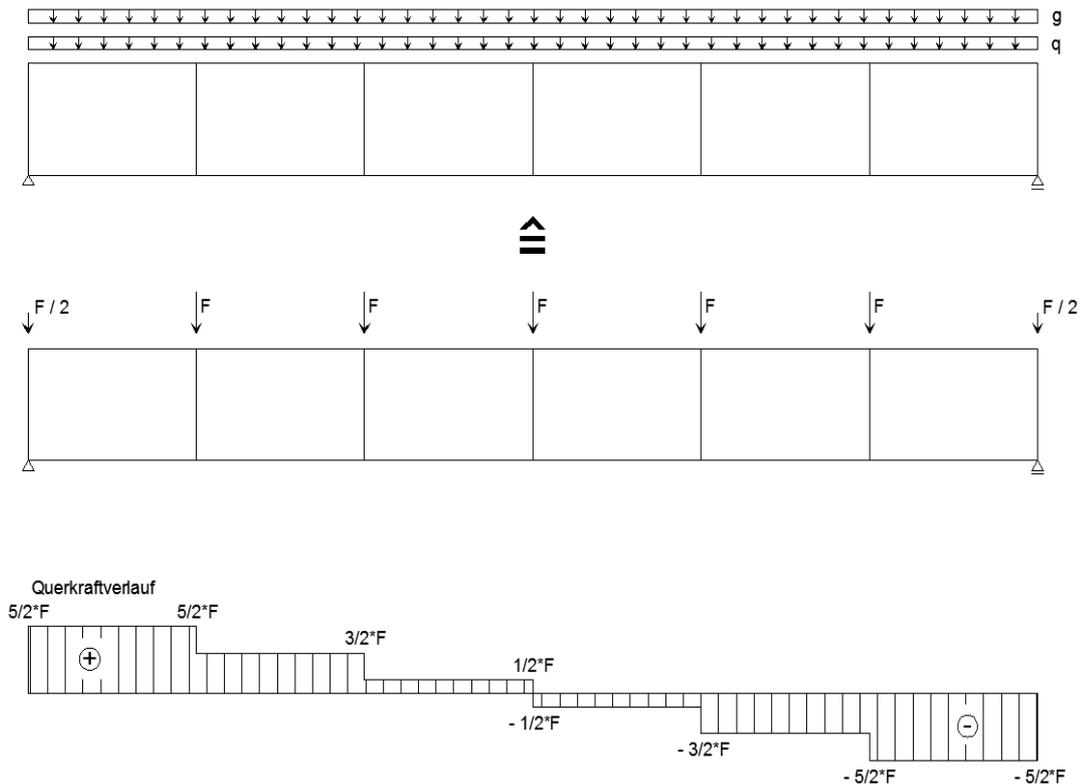


Abbildung 125: Schubfeldträger mit Gleichlasten, Schubfeldträger mit äquivalenten Knotenlasten und Querkraftverteilung infolge der äquivalenten Knotenlasten

6.3 Annahmen zu Materialien und Geometrie, Modifikations-, Teilsicherheits- und Deformationsfaktoren sowie zu Einwirkungen

6.3.1 Annahmen zu Material und Geometrie

- *Schubfeldträger:*

Gesamtträgerlänge: $L = 8,172 \text{ m}$

- *Rahmenkonstruktion: Kerto-Q*

Dichte:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Kerto-Q}} &= 509,524 \text{ kg/m}^3 \\ &= 5,09524 \cdot 10^{-6} \text{ kN/cm}^3 \end{aligned}$$

Rahmenhöhe des OG/UG:	$h_R = 10 \text{ cm}$
Rahmenbreite des OG/UG:	$b_R = 6,9 \text{ cm}$
Rahmenhöhe der Pfosten	$h_{RP} = 63,7 \text{ cm}$
Rahmenbreite der Pfosten:	$b_{RP} = 6,9 \text{ cm}$
Rahmendicke der Pfosten:	$d_{RP} = 10 \text{ cm}$
Schubmodul:	$G_R = 50 \text{ kN/cm}^2$
Elastizitätsmodul:	$E_R = 1050 \text{ kN/cm}^2$
Trägheitsmoment:	$I_R = \frac{b_R \cdot h_R^3}{12} = \frac{6,9 \cdot 10^3}{12} = 575 \text{ cm}^4$

- Koppelleiste: Birkenfurniersperrholz (BFSH)**

Dichte:	$\rho_{\text{BFSH}} = 661,364 \text{ kg/m}^3$ $= 6,61364 \cdot 10^{-6} \text{ kN/cm}^3$
Koppelleistenhöhe:	$h_{\text{KL}} = 10 \text{ cm}$
Koppelleistendicke (Breite):	$d_{\text{KL}} = 4 \text{ cm}$
Vorholzhöhe:	$h_{\text{VH}} = 2,4 \text{ cm}$
Vorholzdicke (Breite):	$d_{\text{VH}} = 2 \text{ cm}$
Vorholzlänge in einem Schubfeld:	$l_{\text{VH}} = 121,4 \text{ cm}$
Koppelleistenhöhe der Pfosten:	$h_{\text{KLP}} = 63,7 \text{ cm}$
Koppelleistenbreite der Pfosten:	$b_{\text{KLP}} = 4 \text{ cm}$
Koppelleistendicke der Pfosten:	$d_{\text{KLP}} = 10 \text{ cm}$
Vorholzhöhe der Pfosten:	$h_{\text{VHP}} = 63,7 \text{ cm}$
Vorholzbreite der Pfosten:	$b_{\text{VHP}} = 2,4 \text{ cm}$
Vorholzdicke der Pfosten:	$d_{\text{VHP}} = 2 \text{ cm}$
Schubmodul:	$G_{\text{KL}} = 18,5 \text{ kN/cm}^2$
Elastizitätsmodul:	$E_{\text{KL},40} = 892,5 \text{ kN/cm}^2$ (für eine Dicke v. 40 mm)
Wärmeausdehnungskoeffizient:	$\alpha_{\text{T,KL}} = 8 \cdot 10^{-6}$
Quellmaß:	Quellmaß = 0,01%/‰ Holzfeuchte-Änderung (längs der Deckfurniere)
Holzfeuchtewechsel:	$\Delta u = 0,1 \%$
- Glasscheibe: Teilvorgespanntes Glas (TVG)**

Dichte:	$\rho_G = 2500 \text{ kg/m}^3 = 25 \cdot 10^{-6} \text{ kN/cm}^3$
Glasscheibenlänge:	$l_G = 125 \text{ cm}$
Glasscheibenhöhe:	$h_G = 62,5 \text{ cm}$
Glasscheibendicke:	$d_G = 0,8 \text{ cm}$
Elastizitätsmodul:	$E_{\text{TVG}} = 7300 \text{ kN/cm}^2$
Schubmodul:	$G_G = 2800 \text{ kN/cm}^2$
Querdehnungszahl:	$\nu_G = 0,23$
Wärmeausdehnungskoeffizient:	$\alpha_{\text{T,G}} = 9 \cdot 10^{-6}$ (bei 20-300°C)
- Verbindungsmittel: Holzbauschrauben**

Dimension:	5 / 80 mm
Güte:	8.8
Annahme:	
Verbindungsmittelabstand:	$e_{\text{VM}} = 4 \text{ cm}$
Anzahl der VM im Gurt	$n_G = 29 \cdot 2 \text{ Reihen} = 58 \text{ Stk je HGV Element}$

Anzahl der VM im Pfosten $n_p = 13 \cdot 2$ Reihen = 26 Stk je HGV Element

- **Schubverklebung: Acrylat**

Zur Berechnung und Bemessung des Trägers unter der Annahme einer darüberliegenden Holzdecke mit üblichen Nutzlasten sowie unter der Annahme einer Spannweite entsprechend den durchgeführten Versuchen, wird für das nachfolgende Bemessungsbeispiel ein "Superklebstoff" (mit realem Deformationsbeiwert des Acrylatklebstoffs) zugrunde gelegt. Folgende Annahmen werden getroffen: Der Schubmodul des Superklebstoffs sei $2,0 \text{ kN/cm}^2$ und der 5%-Fraktilwert der aufnehmbaren Schubspannung $4,3 \text{ kN/cm}^2$

Schubmodul: $G_\tau = 2 \text{ kN/cm}^2$ (längs = quer)

Aufnehmbare charakt. Schubsp.: $\tau_{\tau,k} = 4,3 \text{ kN/cm}^2$

Verklebungsbreite: $b_\tau = 1,4 \text{ cm}$

Verklebungsdicke: $d_\tau = 0,3 \text{ cm}$

Bruchdehnung / Gleitung: $\varepsilon_{\tau,max} = 168 \%$ (aus Kleinprobenversuchen d. HFA)

Herstelltemp. der Schubverklebung: $T_{\tau,0} = 20^\circ\text{C}$

6.3.2 Annahmen zu Modifikations-, Teilsicherheits- und Deformationsbeiwerten

- **Schubverklebung: Acrylat**

Modifikationsbeiwert für kurzfristige Lasten: $k_{\tau,mod,kurz} = 0,9$

Modifikationsbeiwert für langfristige Lasten: $k_{\tau,mod,lang} = 0,2$

Teilsicherheitsbeiwert: $\gamma_{\tau,M} = 6,0$

Deformationsbeiwert (kurz, normale Temp.): $k_{\tau,def,0} = 0,00$

Deformationsbeiwert (lang, normale Temp.): $k_{\tau,def,1} = 2,88$

Deformationsbeiwert (lang, erhöhte Temp.): $k_{\tau,def,2} = 4,09$

6.3.3 Annahmen zu Einwirkungen

- **Einsatzgebiet des Trägers:** in einem klimatisierten Raum

- **Lasten**

Ständige Lasten (lang): Eigengewicht des Trägers $g_{\text{Träger}}$

Eigengewicht der Decke g_{Decke}

Veränderliche Lasten (kurz): Nutzlasten q

Einflussbreite für Eigengewicht Decke und Nutzlasten: $b_{\text{Einfluss}} = 1,5 \text{ m}$

Temperaturbelastung: $T_{\text{max}} = +20,1^\circ\text{C}$

$T_{\text{min}} = +19,9^\circ\text{C}$

Um die Gesamtheit des Nachweises darstellen zu können, werden trotz Annahme eines klimatisierten Raumes für die Temperaturschwankungen kleine Werte angenommen.

- *Teilsicherheitsbeiwerte*

Für ständige Lasten: $\gamma_G = 1,35$

Für veränderliche Lasten: $\gamma_Q = 1,5$

6.4 Ermittlung der Charakteristischen- und Design-Lasten

6.4.1 Lange Einwirkungen

6.4.1.1 Eigengewicht Träger

- Kleiseisen und Klebstoff:

Sowohl das Gewicht des verwendeten Kleiseisens, als auch des verwendeten Klebstoffs wird als vernachlässigbar klein angenommen.

- Glas:

Anzahl der Glasscheiben = Felderanzahl · 2 Seiten = $6 \cdot 2 = 12$ Stk

$$V_{\text{Glasscheiben}} = l_G \cdot h_G \cdot d_G \cdot \text{Anzahl} = 125 \cdot 62,5 \cdot 0,8 \cdot 12 = 75000 \text{ cm}^3$$

$$G_{k,\text{Glasscheiben}} = \rho_G \cdot V_G = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 75000 = 1,875 \text{ kN}$$

$$g_{k,\text{Glasscheiben}} = \frac{G_{k,\text{Glasscheiben}}}{L} = \frac{1,875}{8,172} = 0,229 \text{ kN/m}$$

- Holz:

Querschnittsteile Anzahl bei V_{OG+UG} : 1x für OG, 1x für UG \Leftrightarrow 2x

Querschnittsteile von Koppelleisten/Vorholz: Träger beidseitig beplankt \Leftrightarrow 2x

Vorholz auf Pfosten beidseitig: 2x (außer an Randpfosten \Leftrightarrow deshalb: Anzahl-1)

Pfostenanzahl: 7 Stk

$$V_{OG+UG,\text{Rahmen}} = 2 \cdot (L \cdot h_R \cdot b_R) = 2 \cdot (817,2 \cdot 10 \cdot 6,9) = 112773,6 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{Pfosten,Rahmen}} = \text{Pfostenanzahl} \cdot h_{RP} \cdot b_{RP} \cdot d_{RP} = 7 \cdot 63,7 \cdot 6,9 \cdot 10 = 30767,1 \text{ cm}^3$$

$$V_{OG+UG,\text{Koppelleisten}} = 2 \cdot (L \cdot h_{KL} \cdot d_{KL} \cdot 2) = 2 \cdot (817,2 \cdot 10 \cdot 4 \cdot 2) = 130752 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{Pfosten,Koppelleisten}} = \text{Pfostenanzahl} \cdot h_{KLP} \cdot b_{KLP} \cdot d_{KLP} \cdot 2 = 7 \cdot 63,7 \cdot 4 \cdot 10 \cdot 2 = 35672 \text{ cm}^3$$

$$V_{OG+UG,\text{Vorholz}} = 2 \cdot (\text{Anzahl} \cdot l_{VH} \cdot h_{VH} \cdot d_{VH} \cdot 2) = 2 \cdot (7 \cdot 121,4 \cdot 2,4 \cdot 2 \cdot 2) = 16316,2 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{Pfosten,Vorholz}} = (\text{Pfostenanzahl} - 1) \cdot 2 \cdot h_{VHP} \cdot b_{VHP} \cdot d_{VHP} \cdot 2 = (7 - 1) \cdot 2 \cdot 63,7 \cdot 2,4 \cdot 2 \cdot 2 = 7338,2 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{ges,Kerto-Q}} = V_{OG+UG,\text{Rahmen}} + V_{\text{Pfosten,Rahmen}} = 112773,6 + 30767,1 = 143540,7 \text{ cm}^3$$

$$V_{ges,BFSH} = V_{OG+UG,Koppelleisten} + V_{Pfoften,Koppelleisten} + V_{OG+UG,Vorholz} + V_{Pfoften,Vorholz} \\ = 130752 + 35672 + 16316,2 + 7338,2 = 190078,4 \text{ cm}^3$$

$$G_{k,Holz} = \rho_{Kerto-Q} \cdot V_{ges,Kerto-Q} + \rho_{BFSH} \cdot V_{ges,BFSH} \\ = 5,09524 \cdot 10^{-6} \cdot 143540,7 + 6,61364 \cdot 10^{-6} \cdot 190078,4 = 1,988 \text{ kN}$$

$$g_{k,Holz} = \frac{G_{k,Holz}}{L} = \frac{1,988}{8,172} = 0,243 \text{ kN/m}$$

⇒ *Gesamter Träger*

$$g_{k,Träger} = g_{k,Glasscheiben} + g_{k,Holz} = 0,229 + 0,243 = 0,473 \text{ kN/m}$$

$$g_{d,Träger} = g_{k,Träger} \cdot \gamma_G = 0,473 \cdot 1,35 = 0,638 \text{ kN/m}$$

6.4.1.2 Eigengewicht Decke

$$g_{Decke} = 2,8 \text{ kN/m}^2$$

$$b_{Einfluss} = 1,5 \text{ m}$$

$$g_{k,Decke} = g_{Decke} \cdot b_{Einfluss} = 2,8 \cdot 1,5 = 4,2 \text{ kN/m}$$

$$g_{d,Decke} = g_{k,Decke} \cdot \gamma_G = 4,2 \cdot 1,35 = 5,67 \text{ kN/m}$$

6.4.2 Kurze Einwirkungen

6.4.2.1 Nutzlast

$$q = 2 \text{ kN/m}^2$$

$$b_{Einfluss} = 1,5 \text{ m}$$

$$q_k = q \cdot b_{Einfluss} = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ kN/m}$$

$$q_d = q_k \cdot \gamma_Q = 3 \cdot 1,5 = 4,5 \text{ kN/m}$$

6.4.2.2 Thermische Beanspruchung

$$\Delta T_1 = T_{max} - T_0 = 20,1 - 20 = 0,1^\circ\text{K}$$

$$\Delta T_2 = T_{min} - T_0 = 19,9 - 20 = -0,1^\circ\text{K}$$

$$\Delta T = \max(|\Delta T_1| \vee |\Delta T_2|) = \max(|0,1| \vee |-0,1|) = 0,1^\circ\text{K}$$

6.5 Umrechnung in äquivalente Knotenlasten und Querkräfte

Für den angenommenen Träger, bestehend aus sechs Schubfeldern, werden die Querkräfte und Knotenlasten im Anschluss berechnet. Zur Veranschaulichung wurde der Träger mit dem Querkraftverlauf in Abbildung 125 dargestellt.

Knotenlasten äquivalent zur Gleichlast

$$F_{k,lang} = \frac{(g_{k,Träger} + g_{k,Decke}) \cdot L}{6} = \frac{(0,473 + 4,2) \cdot 8,172}{6} = 6,364 \text{ kN}$$

$$F_{k, \text{kurz}} = \frac{q_k \cdot L}{6} = \frac{3 \cdot 8,172}{6} = 4,086 \text{ kN}$$

$$F_{d, \text{lang}} = \frac{(g_{d, \text{Träger}} + g_{d, \text{Decke}}) \cdot L}{6} = \frac{(0,638 + 5,67) \cdot 8,172}{6} = 8,592 \text{ kN}$$

$$F_{d, \text{kurz}} = \frac{q_d \cdot L}{6} = \frac{4,5 \cdot 8,172}{6} = 6,129 \text{ kN}$$

Querkräfte infolge der Knotenlasten

$$Q_{k, \text{max, lang}} = Q_{k, \text{Auflager, lang}} = \frac{5}{2} \cdot F_{k, \text{lang}} = \frac{5}{2} \cdot 6,364 = 15,911 \text{ kN}$$

$$Q_{k, \text{max, kurz}} = Q_{k, \text{Auflager, kurz}} = \frac{5}{2} \cdot F_{k, \text{kurz}} = \frac{5}{2} \cdot 4,086 = 10,215 \text{ kN}$$

$$Q_{d, \text{max, lang}} = Q_{d, \text{Auflager, lang}} = \frac{5}{2} \cdot F_{d, \text{lang}} = \frac{5}{2} \cdot 8,592 = 21,480 \text{ kN}$$

$$Q_{d, \text{max, kurz}} = Q_{d, \text{Auflager, kurz}} = \frac{5}{2} \cdot F_{d, \text{kurz}} = \frac{5}{2} \cdot 6,129 = 15,323 \text{ kN}$$

$$Q_{k, L/6, \text{lang}} = Q_{k, i=1, \text{lang}} = \frac{5}{2} \cdot F_{k, \text{lang}} = \frac{5}{2} \cdot 6,364 = 15,911 \text{ kN}$$

$$Q_{k, L/6, \text{kurz}} = Q_{k, i=1, \text{kurz}} = \frac{5}{2} \cdot F_{k, \text{kurz}} = \frac{5}{2} \cdot 4,086 = 10,215 \text{ kN}$$

$$Q_{k, L/3, \text{lang}} = Q_{k, i=2, \text{lang}} = \frac{3}{2} \cdot F_{k, \text{lang}} = \frac{3}{2} \cdot 6,364 = 9,546 \text{ kN}$$

$$Q_{k, L/3, \text{kurz}} = Q_{k, i=2, \text{kurz}} = \frac{3}{2} \cdot F_{k, \text{kurz}} = \frac{3}{2} \cdot 4,086 = 6,129 \text{ kN}$$

$$Q_{k, L/2, \text{lang}} = Q_{k, i=3, \text{lang}} = \frac{1}{2} \cdot F_{k, \text{lang}} = \frac{1}{2} \cdot 6,364 = 3,182 \text{ kN}$$

$$Q_{k, L/2, \text{kurz}} = Q_{k, i=3, \text{kurz}} = \frac{1}{2} \cdot F_{k, \text{kurz}} = \frac{1}{2} \cdot 4,086 = 2,043 \text{ kN}$$

6.6 Vorwerte für das Berechnungsbeispiel

6.6.1 Vorwerte für kurzfristige Lasteinwirkungen

Ermittlung des äquivalenten Gesamtschubmoduls $G_{\text{äq, ges}}$ und der Systemsteifigkeit eines Schubfeldes infolge Schubverklebung K_{τ} für kurzfristige Einwirkungsdauer

Annahme: $G_{\tau, \text{längs}} = G_{\tau, \text{quer}}$

C_R : Einfluss der Rahmenkonstruktion:

Federsteifigkeit der Rahmenkonstruktion:

$$C_R = G_R \cdot \frac{h_R}{b_R} = 50 \cdot \frac{10}{6,9} = 72,464 \text{ kN/cm}^2$$

C_{VM} : Einfluss der Verbindungsmittel:

Anzahl der Verbindungsmittel in den Gurten (Riegeln):

$$n_G = 29 \cdot 2 = 58 \text{ Stk}$$

Anzahl der Verbindungsmittel in den Pfosten:

$$n_p = 13 \cdot 2 = 26 \text{ Stk}$$

Anzahl der Verbindungsmittel pro Längeneinheit in den Gurten (Riegeln):

$$\frac{n_G}{l_G} = \frac{58}{125} = 0,464 \text{ Stk/cm}$$

Anzahl der Verbindungsmittel pro Längeneinheit in den Pfosten:

$$\frac{n_P}{h_G} = \frac{26}{62,5} = 0,416 \text{ Stk/cm}$$

Verschiebungsmodul der Schrauben:

$$\text{Ermittlung durch Versuche: } K_{ser} = 8,25 \text{ kN/cm}$$

Der Verschiebungsmodul der Schrauben ist für Furniersperrholz über Versuche zu bestimmen. Bei der Verwendung von Vollholz können zur Bestimmung des Verschiebungsmoduls auch die folgenden Formeln nach EUROCODE 5 herangezogen werden.

Ermittlung für Vollholz durch Berechnung nach EUROCODE 5:

$$\text{Mittlere Rohdichte: } \rho_M = \sqrt{\rho_{BSH} \cdot \rho_{KL}}$$

Schraubendurchmesser: d_{VM}

$$\text{Verformungsmodul der Verbindungsmittel: } K_{ser} = \rho_M^{1,5} \cdot \frac{d_{VM}}{23}$$

Federsteifigkeit der Verbindungsmittel:

$$C_{VM} = K_{ser} \cdot \min\left(\frac{n_G}{l_G} \vee \frac{n_P}{h_G}\right) = 8,25 \cdot \min(0,464 \vee 0,416) = 3,432 \text{ kN/cm}^2$$

C_{KL} : Einfluss der Koppelleiste:

Federsteifigkeit der Koppelleiste:

$$C_{KL} = G_{KL} \cdot \frac{h_{KL}}{d_{KL}} = 18,5 \cdot \frac{10}{4} = 46,250 \text{ kN/cm}^2$$

C_{VH} : Einfluss des Vorholzes:

Federsteifigkeit des Vorholzes:

$$C_{VH} = G_{KL} \cdot \frac{h_{VH}}{d_{VH}} = 18,5 \cdot \frac{2,4}{2} = 22,200 \text{ kN/cm}^2$$

C_τ : Einfluss der Schubverklebung:

Federsteifigkeit der Schubverklebung:

$$C_\tau = G_\tau \cdot \frac{b_\tau}{d_\tau} = 2 \cdot \frac{1,4}{0,3} = 9,333 \text{ kN/cm}^2$$

C_G : Einfluss der Glasscheibe:

Federsteifigkeit der Glasscheibe:

$$C_G = 2 \cdot G_G \cdot \frac{d_G}{\left(\frac{h_G}{1 + \frac{h_G}{l_G}}\right)} = 2 \cdot 2800 \cdot \frac{0,8}{\left(\frac{62,5}{1 + \frac{62,5}{125}}\right)} = 107,52 \text{ kN/cm}^2$$

Gesamtfedersteifigkeit eines Schubfeldes:

$$C_{ges} = \left(\frac{1}{C_R} + \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{1}{C_{VM}} + \frac{1}{C_{KL}} + \frac{1}{C_{VH}} + \frac{1}{C_\tau} + \frac{1}{C_G} \right)^{-1}} \right)^{-1}$$

$$C_{ges} = \left(\frac{1}{72,464} + \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{1}{3,432} + \frac{1}{46,250} + \frac{1}{22,200} + \frac{1}{9,333} + \frac{1}{107,52} \right)^{-1}} \right)^{-1}$$

$$C_{ges} \approx 3,646 \text{ kN/cm}^2$$

Äquivalenter Gesamtschubmodul des Klebers:

$$G_{\ddot{a}q,ges} = C_{ges} \cdot \frac{d_\tau}{b_\tau} = 3,646 \cdot \frac{0,3}{1,4} = 0,781 \text{ kN/cm}^2$$

Schubsteifigkeit:

$$(k = k_u = k_w)$$

$$k_u = k_w = G_{\ddot{a}q,ges} \cdot \frac{b_\tau}{d_\tau} = 0,781 \cdot \frac{1,4}{0,3} = 3,646 \text{ kN/cm}^2$$

Systemsteifigkeit eines Schubfeldes infolge Schubverklebung:

$$K_\tau = \left[\frac{2}{k_u \cdot h_G} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{k_w \cdot l_G}{k_u \cdot 3 \cdot h_G}} + \frac{\frac{l_G}{h_G}}{1 + \frac{k_w \cdot h_G}{k_u \cdot 3 \cdot l_G}} \right) \right]^{-1}$$

$$K_\tau = \left[\frac{2}{3,646 \cdot 62,5} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{3,646 \cdot 125}{3,646 \cdot 3 \cdot 62,5}} + \frac{\frac{125}{62,5}}{1 + \frac{3,646 \cdot 62,5}{3,646 \cdot 3 \cdot 125}} \right) \right]^{-1}$$

$$K_\tau = 49,23 \text{ kN/cm}$$

6.6.2 Vorwerte für langfristige Lasteinwirkungen

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit müssen die Federsteifigkeiten aufgrund von unterschiedlich zeitabhängigem Materialverhalten der Bauteilkomponenten wie folgt abgemindert werden:

Federsteifigkeit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:

$$C_{i,\infty} = \frac{C_{i,0}}{1+k_{i,def}}$$

Federsteifigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit:

$$C_{i,\infty} = \frac{C_{i,0}}{1+\psi_2 \cdot k_{i,def}}$$

In der folgenden Berechnung wird zur Vereinfachung für den Beiwert ψ_2 angenommen, dass die größten Spannungen im Verhältnis zur Festigkeit durch eine ständige Einwirkung hervorgerufen werden, wodurch sich gemäß EUROCODE 0 ein Beiwert von $\psi_2=1$ ergibt. Die abgeminderten Federsteifigkeiten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit sind somit identisch.

In den Berechnungen werden folgende Deformationsbeiwerte verwendet:

- Birkenfurniersperrholz: $k_{KL,def} = 0,6$ (für Nutzungsklasse 1 nach *ÖNORM EN 1995-1-1*)
- Kerto-Q: $k_{R,def} = 0,6$ (für Nutzungsklasse 1 nach *ÖNORM EN 1995-1-1*)
- Verschraubung: $k_{VM,def} = 2 \cdot 0,6 = 1,2$ (*ÖNORM EN 1995-1-1*)
- Glas: $k_{G,def} = 0,0$
- Acrylat: $k_{\tau,def,2} = 4,09$

Gesamtfedersteifigkeit eines Schubfeldes:

$$C_{ges,lang} = \left[\frac{1}{\left(\frac{C_R}{1+k_{R,def}}\right)} + \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{1}{\left(\frac{C_{VM}}{1+k_{VM,def}}\right)} + \frac{1}{\left(\frac{C_{KL}}{1+k_{KL,def}}\right)} + \frac{1}{\left(\frac{C_{VH}}{1+k_{KL,def}}\right)} + \frac{1}{\left(\frac{C_{\tau}}{1+k_{\tau,def,2}}\right)} + \frac{1}{\left(\frac{C_G}{1+k_{G,def}}\right)} \right)} \right]^{-1}$$

$$C_{ges,lang} = \left[\frac{1}{\left(\frac{72,464}{1+0,6}\right)} + \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{1}{\left(\frac{3,434}{1+1,2}\right)} + \frac{1}{\left(\frac{46,250}{1+0,6}\right)} + \frac{1}{\left(\frac{22,200}{1+0,6}\right)} + \frac{1}{\left(\frac{9,333}{1+4,09}\right)} + \frac{1}{\left(\frac{17,920}{1+0}\right)} \right)} \right]^{-1}$$

$$C_{ges,lang} = 1,436 \text{ kN/cm}^2$$

Äquivalenter Gesamtschubmodul des Klebers:

$$G_{\text{äq,ges,lang}} = C_{\text{ges,lang}} \cdot \frac{d_{\tau}}{b_{\tau}} = 1,436 \cdot \frac{0,3}{1,4} = 0,308 \text{ kN/cm}^2$$

Schubsteifigkeit:

$$(k = k_{u,lang} = k_{w,lang})$$

$$k_{u,lang} = k_{w,lang} = G_{\text{äq,ges,lang}} \cdot \frac{b_{\tau}}{d_{\tau}} = 0,308 \cdot \frac{1,4}{0,3} = 1,436 \text{ kN/cm}^2$$

Systemsteifigkeit eines Schubfeldes infolge Schubverklebung:

$$K_{\tau,lang} = \left[\frac{2}{k_{u,lang} \cdot h_G} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{k_{w,lang} \cdot l_G}{k_{u,lang} \cdot 3 \cdot h_G}} + \frac{\frac{l_G}{h_G}}{1 + \frac{k_{w,lang} \cdot h_G}{k_{u,lang} \cdot 3 \cdot l_G}} \right) \right]^{-1}$$

$$K_{\tau,lang} = \left[\frac{2}{1,436 \cdot 62,5} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{1,436 \cdot 125}{1,436 \cdot 3 \cdot 62,5}} + \frac{\frac{125}{62,5}}{1 + \frac{1,436 \cdot 62,5}{1,436 \cdot 3 \cdot 125}} \right) \right]^{-1}$$

$$K_{\tau,lang} = 19,387 \text{ kN/cm}$$

6.7 Tragfähigkeitsnachweis der Schubverklebung

6.7.1 Maximale Spannung in der Schubverklebung

Widerstand unter kurzfristiger Last:

$$R_{d,kurz} = \tau_{\text{max,kurz}} = \frac{k_{\tau,\text{mod,kurz}} \cdot \tau_k}{\gamma_{\tau,M}} = \frac{0,9 \cdot 4,3}{6} = 0,6450 \text{ kN/cm}^2$$

Widerstand unter Dauerlast:

$$R_{d,lang} = \tau_{\text{max,lang}} = \frac{k_{\tau,\text{mod,lang}} \cdot \tau_k}{\gamma_{\tau,M}} = \frac{0,2 \cdot 4,3}{6} = 0,1433 \text{ kN/cm}^2$$

6.7.2 Vorhandene Spannung in der Schubverklebung

Die maximale Querkraft wird durch 2 geteilt, da sich die Last gleichmäßig auf beide Seiten der Beplankung, bestehend aus Holz-Glas-Verbundelementen, verteilt.

6.7.2.1 Vorhandene Spannung unter kurzer Last

$$S_{d,kurz} = \frac{\left(\frac{Q_{d,\text{max,kurz}}}{2} \right)}{h \cdot b_{\tau}} = \frac{\left(\frac{15,323}{2} \right)}{62,5 \cdot 1,4} = 0,08756 \text{ kN/cm}^2$$

(maximale Klebstoffspannung in der Glasecke)

(Division der Querkraft durch zwei aufgrund *beidseitiger* Beplankung des Rahmens mit Holz-Glas-Verbundelementen)

$$\Delta l_{max,temp} = (\alpha_{T,G} - \alpha_{T,KL}) \cdot \Delta T \cdot \frac{l_G}{2} = (9 - 8) \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot \frac{125}{2} = 0,000006 \text{ cm}$$

$$\Delta l_{max,HF} = \text{Quellmaß} \cdot \Delta u \cdot \frac{l_G}{2} = \left(\frac{0,01}{100}\right) \cdot 0,1 \cdot \frac{125}{2} = 0,000625 \text{ cm}$$

$$\Delta l_{max,Zug,UG} = \frac{\frac{Q_{d,max,kurz} \cdot l_G}{h_G}}{E_R} \cdot \frac{l_G}{2} = \frac{l_G^2 \cdot Q_{d,max,kurz}}{4 \cdot b_R \cdot h_R \cdot E_R \cdot h_G} = \frac{125^2 \cdot 15,323}{4 \cdot 6,9 \cdot 10 \cdot 1050 \cdot 62,5} = 0,0132 \text{ cm}$$

$$\Delta l_{max} = \Delta l_{max,temp} + \Delta l_{max,HF} + \Delta l_{max,Zug,UG} = 0,000006 + 0,000625 + 0,0132 = 0,01385 \text{ cm}$$

(Infolge Verbundwirkung zwischen Glas, Koppelleiste und Unterkonstruktion kann die ungehinderte Längenänderung Δl_{max} zu Δl_{VB} verringert werden. Das Vorgehen zur Bestimmung der abgeminderten Längenänderung Δl_{VB} , welche von Δl_{max} abhängig ist, wurde in (Hochhauser, W. (2011)) publiziert. Die Verringerung der ungehinderten Längenänderung Δl_{max} zu Δl_{VB} führt dazu, dass Klebefuge, Glasscheibe, Verbindungsmittel und Unterkonstruktion eine zusätzliche Beanspruchung erfahren. Diese sind analog zu bestimmen)

Zur Veranschaulichung wird Nachfolgendes beispielhaft angenommen:

$$\Delta l_{VB} = \frac{\Delta l_{max}}{8}$$

$$\text{Gleitung: } \gamma = \frac{\Delta l_{VB}}{d_\tau} = \frac{\frac{\Delta l_{max}}{8}}{d_\tau} = \frac{0,01385}{8 \cdot 0,3} = 0,00577$$

$$S_{d,Zwang} = \gamma \cdot G_{\ddot{a}q,ges} = 0,00577 \cdot 0,781 = 0,0045 \text{ kN/cm}^2$$

$$S_{d,kurz,gesamt} = S_{d,kurz} + S_{d,Zwang} = 0,08756 + 0,0045 = 0,09207 \text{ kN/cm}^2$$

6.7.2 Vorhandene Spannung unter Dauerlast

$$S_{d,lang,gesamt} = S_{d,lang} = \frac{\left(\frac{Q_{d,max,lang}}{2}\right)}{h \cdot b_\tau} = \frac{\left(\frac{21,480}{2}\right)}{62,5 \cdot 1,4} = 0,12274 \text{ kN/cm}^2$$

(maximale Klebstoffspannung in der Glasecke)

(Division der Querkraft durch zwei aufgrund *beidseitiger* Beplankung des Rahmens mit Holz-Glas-Verbundelementen)

6.7.3 Nachweis

$$\frac{S_{d,lang,gesamt}}{R_{d,lang}} + \frac{S_{d,kurz,gesamt}}{R_{d,kurz}} = \frac{0,12274}{0,1433} + \frac{0,09207}{0,6450} = 0,999 \leq 1$$

→ Nachweis erfüllt

6.8 Gebrauchstauglichkeitsnachweis: Durchbiegung des Trägers

6.8.1 Maximale Durchbiegung

$$w_{zul} = \frac{l_{Träger}}{300} = \frac{817,2}{300} = 2,724 \text{ cm}$$

6.8.2 Vorhandene Durchbiegung

6.8.2.1 Vorhandene Durchbiegung zufolge kurzfristiger Lasten

Annahme: EI_{eff} des Trägers wurde mittels des Gamma Verfahrens bereits bestimmt.

$$EI_{eff} = 482.354.179,70 \text{ kNcm}^2$$

$$w_{vorh,x} = \{w_{x,BL}\} + \left\{ \frac{1}{K_{\tau}} \cdot \sum_{i=1}^x Q_i \right\}$$

$$w_{vorh,x=l/2} = \left\{ \frac{5 \cdot n \cdot F \cdot L^3}{384 \cdot EI} \cdot \left(1 - \frac{0,8}{n^2} - \frac{0,2}{n^4} \right) \right\} + \left\{ \frac{1}{K_{\tau}} \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3) \right\}$$

mit:

Anzahl der Kräfte im Feld: $n = 5$

Kräfte in Knotenpunkten: $F = F_{k,kurz}$ [kN]

Länge des Trägers: L [cm]

Systemsteifigkeit eines Schubfeldes infolge Schubverklebung: $K_{\tau,kurz} = K_{\tau}$ [kN/cm]

Querkräfte in Knotenpunkten: $Q_1 = Q_{k,i=1,kurz}$, $Q_2 = Q_{k,i=2,kurz}$, $Q_3 = Q_{k,i=3,kurz}$ [kN]

$$w_{vorh,kurz,x=l/2} = \left\{ \frac{5 \cdot 5 \cdot 4,086 \cdot 817,2^3}{384 \cdot 482354179,7} \cdot \left(1 - \frac{0,8}{5^2} - \frac{0,2}{5^4} \right) \right\} + \left\{ \frac{1}{49,23} \cdot (10,215 + 6,129 + 2,043) \right\} = 0,665 \text{ cm}$$

(Formel für die Durchbiegung infolge der Biegetheorie nach (Schneider, K. J., Goris, A. (2008), S. 4.2))

6.8.2.2 Vorhandene Durchbiegung zufolge langfristiger Lasten

Annahme: $EI_{eff,lang}$ des Trägers wurde mittels des Gamma Verfahrens bereits bestimmt.

$$EI_{eff} = 400.000.000 \text{ kNcm}^2$$

Zur Bestimmung der Langzeitbiegesteifigkeit $EI_{eff,lang}$ müssen die Elastizitätsmoduln E , der Schubmodul G und der Verschiebungsmodul K_{ser} mittels einer Division durch $(1+k_{def})$ abgemindert werden, wobei k_{def} dem Material entsprechend eingesetzt werden muss.

$$w_{vorh,x} = \{w_{x,BL}\} + \left\{ \frac{1}{K_{\tau}} \cdot \sum_{i=1}^x Q_i \right\}$$

$$w_{vorh,x=l/2} = \left\{ \frac{5 \cdot n \cdot F \cdot L^3}{384 \cdot EI} \cdot \left(1 - \frac{0,8}{n^2} - \frac{0,2}{n^4} \right) \right\} + \left\{ \frac{1}{K_{\tau}} \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3) \right\}$$

mit:

Anzahl der Kräfte im Feld: $n = 5$

Kräfte in Knotenpunkten: $F = F_{k,lang}$ [kN]

Länge des Trägers: L [cm]

Systemsteifigkeit eines Schubfeldes infolge Schubverklebung: $K_{\tau,lang}$ [kN/cm]

Querkraften in Knotenpunkten: $Q_1 = Q_{k,i=1,lang}$, $Q_2 = Q_{k,i=2,lang}$, $Q_3 = Q_{k,i=3,lang}$ [kN]

$$w_{vorh,lang,x=l/2} = \left\{ \frac{5 \cdot 5 \cdot 6,364 \cdot 817,2^3}{384 \cdot 400000000} \cdot \left(1 - \frac{0,8}{5^2} - \frac{0,2}{5^4} \right) \right\} + \left\{ \frac{1}{19,39} \cdot (15,911 + 9,546 + 3,182) \right\} = 2,024 \text{ cm}$$

(Formel für die Durchbiegung infolge der Biegetheorie nach (Schneider, K. J., Goris, A. (2008), S. 4.2))

6.8.3 Nachweis

$$\frac{w_{vorh, kurz, x=l/2} + w_{vorh, lang, x=l/2}}{w_{zul}} = \frac{(0,665 + 2,024)}{2,724} = 0,987 \leq 1$$

→ Nachweis erfüllt!

6.9 Gebrauchstauglichkeitsnachweis: Klebstoffverformung der Schubverklebung infolge Last

Die maximale Querkraft wird durch 2 geteilt, da sich die Last gleichmäßig auf beide Seiten der Beplankung, bestehend aus Holz-Glas-Verbundelementen, verteilt.

$$\varepsilon_{\tau, max} = \gamma_{max} = 168 \%$$

$$u_{Klebung, zul} = \gamma_{max} \cdot d_{\tau} = 168 \% \cdot 0,3 = 1,68 \cdot 0,3 = 0,504 \text{ cm}$$

6.9.1 Klebstoffverformung infolge Dauerlast

$$\tau_{k, lang} = \frac{\frac{Q_{k, max, lang}}{2}}{h_G \cdot b_{\tau}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{h_G}{3 \cdot l_G}} = \frac{\frac{15,911}{2}}{62,5 \cdot 1,4} \cdot \frac{1}{1 + \frac{62,5}{3 \cdot 125}} = 0,0779 \text{ kN/cm}^2$$

(Division der Querkraft durch zwei aufgrund *beidseitiger* Beplankung des Rahmens mit Holz-Glas-Verbundelementen)

$$u_{Klebung, inst} = \frac{\tau_{k, lang}}{G_{\tau}} \cdot d_{\tau} = \frac{0,078}{2} \cdot 0,3 = 0,0117 \text{ cm}$$

Aufgrund der Annahme eines klimatisierten Raumes ist in dieser Rechnung $k_{\tau, def} = k_{\tau, def, 1}$ gewählt worden. Bei Abweichung von dieser Annahme ist der Modifikationsbeiwert $k_{\tau, def}$ entsprechend anzupassen

$$u_{Klebung, fin} = u_{Klebung, lang} = u_{Klebung, inst} \cdot (1 + k_{\tau, def}) \\ = u_{Klebung, inst} \cdot (1 + k_{\tau, def, 1}) = 0,0117 \cdot (1 + 2,88) = 0,0454 \text{ cm}$$

6.9.2 Klebstoffverformung infolge kurzfristiger Last

$$\tau_{k, kurz} = \frac{\frac{Q_{k, max, kurz}}{2}}{h_G \cdot b_\tau} \cdot \frac{1}{1 + \frac{h_G}{3 \cdot l_G}} = \frac{\frac{10,215}{2}}{62,5 \cdot 1,4} \cdot \frac{1}{1 + \frac{62,5}{3 \cdot 125}} = 0,0500 \text{ kN/cm}^2$$

(Division der Querkraft durch zwei aufgrund *beidseitiger* Beplankung des Rahmens mit Holz-Glas-Verbundelementen)

$$u_{Klebung, inst} = u_{Klebung, kurz} = \frac{\tau_{k, kurz}}{G_\tau} \cdot d_\tau = \frac{0,05}{2} \cdot 0,3 = 0,0075 \text{ cm}$$

6.9.3 Nachweis: Klebstoffverformung infolge Gesamtlast (kurz und lang)

$$u_{Klebung, gesamt} = u_{Klebung, lang} + u_{Klebung, kurz} = 0,0454 + 0,0075 = 0,053 \text{ cm}$$

$\frac{u_{Klebung, gesamt}}{u_{Klebung, zul}} = \frac{0,053}{0,504} = 0,105 \leq 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt!}$
--

7 Einfluss der Durchlaufträgerwirkung von Ober- und Untergurt auf den Gebrauchstauglichkeitsnachweis

Im Zuge der Behandlung des Gebrauchstauglichkeitsnachweises in Kapitel 4.2 wird für die Berechnung der Durchbiegung des Holz-Glas-Verbundschubfeldträgers Formel (4.6) angegeben. Bei deren Auswertung fließen sowohl die Durchbiegung infolge der Biegetheorie als auch die Durchbiegung infolge der Schubfeldträger-Theorie ein. Die Durchlaufträgerwirkung der Gurte sowie die Vierendeelwirkung des Trägers werden als latente Tragmechanismen angesehen.

Anschließend soll nun gezeigt werden, dass die Erhöhung der Trägersteifigkeit zufolge der Durchlaufträgerwirkung nur einen minimalen Einfluss auf die Durchbiegung des Holz-Glas-Verbundträgers hat.

Nachweisführung

Um die Systemsteifigkeit infolge der Durchlaufträgerwirkung von Ober- und Untergurt zu erhalten, muss die Durchbiegung des Trägers ermittelt werden. Aus der so erhaltenen Vertikalverschiebung in Trägermitte wird mit der Formel

$$c = \frac{F}{w} \quad (7.1)$$

die Systemsteifigkeit berechnet.

mit:

c	Systemsteifigkeit [kN/cm]
F	Auf das System wirkende Kraft [kN]
w	Durch die Kraft hervorgerufene Verschiebung bzw. Durchbiegung [cm]

Die Berechnung der Durchbiegung nach Theorie I. Ordnung erfolgt mit Hilfe des Programmes RSTAB 5.15, einer Software für Statik und Dynamik der *Ingenieur-Software Dlubal GmbH*.

Die Maße des für die Eingabe in RSTAB verwendeten Systems werden identisch zu jenen der Mittellinien des für den Holz-Glas-Verbundschubfeldträger verwendeten Rahmens aus Kerto-Q gewählt (siehe Abbildung 126). Der Träger hat eine Gesamtlänge von 817,2 cm und eine Höhe von 73,7 cm. In den Sechstelpunkten angebrachte Pfosten teilen den Träger in sechs gleiche Felder mit einer Länge von je 136,2 cm.

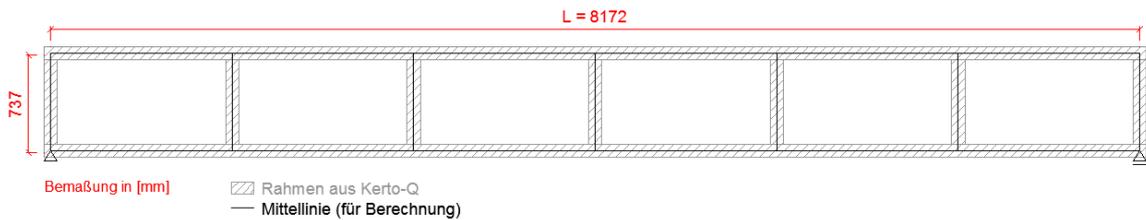


Abbildung 126: Maße der Mittellinie des Rahmens aus Kerto-Q

Abbildung 127 zeigt den zweidimensional modellierten Aufbau des mittels RSTAB berechneten Systems. Der Träger besitzt äquivalent zum Rahmen einen durchlaufenden Ober- und Untergurt, welche durch gelenkig angeschlossene vertikale Fachwerkstäbe, entsprechend der Pfosten des Rahmens, miteinander verbunden sind. Die Stabquerschnitte von Obergurt, Untergurt und Pfosten werden entsprechend den Rahmenquerschnitten mit einer Höhe von 10 cm, einer Breite von 6,9 cm und einem E-Modul $E_{\text{Kerto-Q}} = 1050 \text{ kN/cm}^2$ gewählt.

Zur horizontalen Stabilisierung des Trägers werden beidseitig vertikal verschiebliche Auflager angebracht. Wie bei den Vier-Punkt-Biegeversuchen, welche an den Holz-Glas-Verbundschubfeldträgern durchgeführt wurden, wird das RSTAB Modell an den Enden gelenkig gelagert und in den Drittelpunkten belastet. Da in Kapitel 4.2 die Berechnung der Trägerdurchbiegung bei einer Kraft von 22,5 kN erfolgt, wird die Durchbiegung durch RSTAB ebenfalls bei einer Last von 22,5 kN ermittelt.

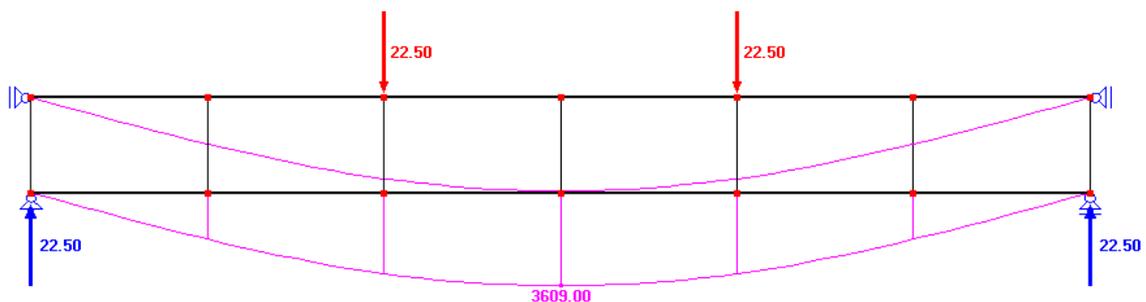


Abbildung 127: Durchbiegung von Ober- und Untergurt bei einer Belastung von $F = 22,5 \text{ kN}$ in den Drittelpunkten (Kräfte in kN und Durchbiegung in mm)

Durchbiegungen in Trägermitte:

$$w_{BL,OG+UG,(x=\frac{l}{2})} = 360,90 \text{ cm (Ermittlung durch RSTAB)}$$

$$w_{BL,(x=\frac{l}{2})} = 0,90 \text{ cm (vgl. Kapitel 4.2.2.2)}$$

$$w_{SFTT,(x=\frac{l}{2})} = 3,01 \text{ cm (vgl. Kapitel 4.2.3.3.4)}$$

Berechnung der Systemsteifigkeiten aus der Durchbiegung:

$$C_{BL,OG+UG,(x=\frac{l}{2})} = \frac{F_{ges}}{w_{BL,OG+UG}} = \frac{2 \cdot 22,5}{360,90} = 0,12 \text{ kN/cm}$$

$$c_{BL,(x=\frac{l}{2})} = \frac{F_{ges}}{w_{BL,(x=\frac{l}{2})}} = \frac{2 \cdot 22,5}{0,90} = 49,80 \text{ kN/cm}$$

$$c_{SFTT,(x=\frac{l}{2})} = \frac{F_{ges}}{w_{SFTT,(x=\frac{l}{2})}} = \frac{2 \cdot 22,5}{3,01} = 14,97 \text{ kN/cm}$$

Berechnung der Gesamtsystemsteifigkeit aus Biege- und Schubfeldträger-Theorie:

$$c_{BL+SFTT,(x=\frac{l}{2})} = c_{BL,(x=\frac{l}{2})} + c_{SFTT,(x=\frac{l}{2})} = 49,80 + 14,97 = 64,77 \text{ kN/cm}$$

mit:

$w_{x,BL,OG+UG}$	Durchbiegung an der Stelle x des gekoppelten Ober- und Untergurts nach RSTAB [cm]
$w_{x,BL}$	Durchbiegung an der Stelle x infolge der Biegetheorie [cm]
$w_{x,SFTT}$	Durchbiegung an der Stelle x infolge der Schubfeldträger-Theorie [cm]
F_{ges}	Gesamte auf das System wirkende Kraft [kN]
$c_{BL,OG+UG}$	Systemsteifigkeit zufolge der Durchlaufträgerwirkung [kN/cm]
c_{BL}	Systemsteifigkeit zufolge der Biegetheorie [kN/cm]
c_{SFTT}	Systemsteifigkeit zufolge der Schubfeldträger-Theorie [kN/cm]
$c_{BL+SFTT}$	Gesamtsystemsteifigkeit aus der Biege- und Schubfeldträger-Theorie [kN/cm]

Aus diesen Berechnungen folgt, dass die Systemsteifigkeit $c_{BL,OG+UG}$, welche sich aus der Durchlaufträgerwirkung von Ober- und Untergurt ergibt, lediglich 1,93 ‰ der Systemsteifigkeit $c_{BL+SFTT}$, aus der Biege- und der Schubfeldträger-Theorie, beträgt und sich diese dadurch nur minimal auf die Durchbiegung des Holz-Glas-Verbundträgers auswirkt. Somit ist eine explizite Berücksichtigung der Durchlaufträgerwirkung im Formelapparat nicht ergebnisrelevant.

8 Zusammenfassung

Transparente, helle Gebäude, die dem Betrachter den Eindruck von Leichtigkeit vermitteln, erfreuen sich heutzutage immer größerer Beliebtheit. Durch diese Tatsache ergibt sich das Anliegen tragende Gebäudeteile aus Stahl, Beton, Holz und anderen intransparenten Baustoffen zu reduzieren und an deren Stelle Glaselemente zu setzen, welche ebenfalls zur Lastabtragung herangezogen werden können. Daraus entsteht die Notwendigkeit der Erforschung, wie Glas optimal zur Lastableitung eingesetzt werden kann. Da Glas eine hohe Druckfestigkeit besitzt, ist es sinnvoll, Verbundkonstruktionen zu entwickeln, welche genau diese Eigenschaft ausnützen. Bei solchen Elementen ist darauf zu achten, weder Zug noch punktuell konzentrierte Spannungen in das Glas einzuleiten.

Diese Diplomarbeit soll einen Beitrag zur Erforschung von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen liefern. Zu diesem Thema haben in diversen Teilbereichen unter anderem bereits Kreuzinger, Niedermaier, Kreher und Edl Arbeiten verfasst. Manche der in diesen Werken gewonnenen Erkenntnisse wurden in dieser Diplomarbeit aufgegriffen und verwendet.

Thema dieser Arbeit sind experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Holz-Glas-Verbundträgern. Um Formeln, welche am Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, der TU Wien entwickelt wurden, zu überprüfen, wurden Groß- und Kleinprobenversuche durchgeführt. Im Zuge eines Forschungsprojekts der TU Wien an der Holzforschung Austria wurden Vier-Punkt-Biegeversuche an drei Schubfeldträgern durchgeführt.

Zunächst wurden die in den Großproben verwendeten Konstruktionselemente wie der Klebstoff Acrylat und die Schrauben in Kleinprobenversuchen untersucht. Dabei wurden die Abscherfestigkeit des Acrylats und der Verschiebungsmodul der Schrauben in mehreren Versuchen ermittelt. Die gewonnenen Daten aus diesen Kleinprobenversuchen flossen in die weiteren Berechnungen der Großproben ein.

Bei der Produktion der Großproben wurden in einem ersten Arbeitsschritt Holz-Glas-Verbundelemente hergestellt. Dabei wurde eine Glasscheibe durch eine 3 mm dünne Acrylatschicht mit Koppelleisten aus Holz verbunden. Anschließend wurden diese Holz-Glas-Verbundelemente beidseitig auf einen Holzrahmen mit sechs rechteckigen Feldern geschraubt. Für die Versuche wurden diese Träger an beiden Enden gelenkig gelagert sowie an den Enden und in der Mitte gegen seitliches Ausweichen gesichert. In Vier-Punkt-Biegeversuchen wurden die Großproben mit zwei Druckzylindern in den Drittelpunkten belastet und die aufgebrachte Last bis zum Versagen gesteigert.

Mittels an den Holz-Glas-Verbundträgern angebrachten Dehnmessstreifen und induktiven Wegaufnehmern wurden Verzerrungen und Verschiebungen erfasst und anschließend mit den Werten aus den Berechnungen verglichen. Durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Versuchen mit jenen aus den Kalkulationen konnte die Anwendbarkeit der Formeln zur Berechnung der Trägerdurchbiegung für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis und zur Berechnung der Normalkräfte in den Gurten und Pfosten für den Tragfähigkeitsnachweis bestätigt werden.

Anschließend an die Erläuterungen der Berechnungsmethoden und der Vergleiche zwischen den Ergebnissen der Realversuche und der theoretischen Nachweise wird ein Beispiel zu einem Holz-Glas-Verbundträger durchgerechnet. Anhand dieses Berechnungsbeispiels wird ersichtlich, dass zur Erfüllung der Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise ein hoch belastbarer Klebstoff notwendig ist. Durch die Annahme realistischer Nutzlasten und Eigengewichte sowie der Einrechnung von Teilsicherheitsbeiwerten ergibt sich eine hohe Beanspruchung für den Klebstoff. Beim Einsetzen des realen Schubmoduls und der realen aufnehmbaren charakteristischen Schubspannung des Acrylats könnten die Nachweise nicht erfüllt werden.

Daraus wird die Notwendigkeit weiterer Forschung in diesem Bereich ersichtlich. Die Weiterentwicklung zuverlässiger Klebstoffe und die Reduktion von Teilsicherheitsbeiwerten wäre wünschenswert. Dabei sollte nicht nur ein Augenmerk auf die Belastbarkeit bei kurzzeitigen Lasten gelegt werden, sondern vor allem auch auf eine Verbesserung der Langzeiteigenschaften von Klebstoffen.

9 Anhang

Ermittlung des Umrechnungsfaktors für die bei den Großprobenversuchen verwendeten DMS:

Diese Berechnung wurde von Herrn DI Thomas Seidl von der Holzforschung Austria zur Verfügung gestellt.

Ermittlung des Korrekturfaktors einer Viertelbrückenschaltung

Eine eingeprägte Dehnung

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = 0,001 \frac{m}{m}$$

Erzeugt in einem DMS (k-Faktor = 2,07) eine relative Widerstandsänderung von

$$\frac{\Delta R}{R_0} = 0,00207 \frac{\Omega}{\Omega}$$

Dadurch entsteht am Ausgang der Wheatstoneschen Brückenschaltung (Viertelbrücke) eine relative Ausgangsspannung von

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} * k = 0,0005175 \frac{V}{V}$$

U_A ... Brückenausgangsspannung

U_B ... Brückenspeisespannung ... hier ist $U_B = 5$ Volt

Gleichsetzen der folgenden Gleichungen

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k * \varepsilon \quad \frac{\Delta R}{R_0} = 4 * \frac{U_A}{U_B}$$

liefert

$$k * \varepsilon = 4 * \frac{U_A}{U_B}$$

Durch Umstellen ergibt sich folgender Ausdruck

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} * \varepsilon$$

Eine Änderung der Brückenausgangsspannung U_A von 1 mV bei einer Brückenspeisespannung von U_B gleich 5 V führt somit zu einer Dehnung am DMS (mit $k = 2,07$) von:

$$\frac{1 \text{ mV}}{5 \text{ V}} = \frac{2,07}{4} * \varepsilon \quad \rightarrow \quad \varepsilon = 0,0003864734 \frac{m}{m} = 386,473 \frac{\mu m}{m}$$

Literaturverzeichnis

Bücher und Schriften

Achenbach, E. (1995): Glas: Moderner Werkstoff für Fenster und Fassade. Tamm: Wegra Verlag

Ambrozy, H.G., Giertlová, Z. (2005): Planungshandbuch Holzwerkstoffe: Technologie, Konstruktion, Anwendung. Wien: Springer-Verlag

Edl, T. (2008): Entwicklung von wandartigen verklebten Holz-Glas-Verbundelementen und Beurteilung des Tragverhaltens als Aussteifungsscheibe. Dissertation am Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, TU Wien

Fuchs, M. (2011): Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Holz-Glas-Verbundplatten. Diplomarbeit am Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, TU Wien

Habenicht, G. (1997): Kleben: Grundlagen Technologie Anwendungen. 3. Auflage, Berlin: Springer-Verlag

Winter, W., Hollinsky, K. H., Weinlinger, T. (2010): Holzbau 1: Konstruktion und Bemessung. Ausgabe 03/2010, Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, TU Wien

Hochhauser, W., et al (2011): Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: State of the Art, Forschungsbericht, Studentische Arbeiten. TU Wien

Hochhauser, W. (2011): Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundscheiben. Dissertation am Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, TU Wien

Holzmann, G., Meyer, H., Schumpich, G. (1983): Technische Mechanik: Teil 3 Festigkeitslehre. 5. Auflage, Stuttgart: B. G. Teubner

Kreher, K. (2004): Tragverhalten und Bemessung von Holz-Glas-Verbundträgern unter Berücksichtigung der Eigenspannungen im Glas. Dissertation auf dem Institut: Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, École Polytechnique Fédérale (EPFL) de Lausanne

Kreuzinger, H., Niedermaier, P. (2005): Glas als Schubfeld: Tagungsband Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage

- Petzold, A., Marusch, H., Schramm, B. (1990):* Der Baustoff Glas: Grundlagen, Eigenschaften, Erzeugnisse, Glasbauelemente, Anwendungen. 3. Auflage, Verlag für Bauwesen, Verlag Karl Hofmann
- Rammerstorfer, F. G. (1992):* Repetitorium Leichtbau. Wien/München: Oldenbourg Verlag
- Renno, D., Hübscher, M. (2000):* Glas-Werkstoffkunde. 2. Auflage, Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
- Schneider, K. J., Goris, A. (2008):* Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 18. Auflage, Werner Verlag
- Schultes, R. (2010):* Glas Kleben. Bachelorarbeit, Wahlseminar Konstruktiver Glasbau, Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, TU Wien
- Wagner, E. (2008):* Glasschäden, Oberflächenbeschädigungen, Glasbrüche in Theorie und Praxis. 3. Auflage, Schorndorf: Hofmann-Verlag

Normen

- EUROCODE 0:* Grundlagen der Tragwerksplanung - Teil 1: Hochbau- Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1990, Ausgabe: 2004-05-01
- EUROCODE 1:* Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewichte, Nutzlasten im Hochbau - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-1 und nationale Ergänzungen, Ausgabe 2006-01-01
- EUROCODE 5:* Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, EN 1995-1-1-2004, Ausgabe 2006-01-01
- ÖNORM EN 1380:* Holzbauwerke – Prüfverfahren – Tragende Verbindungen mit Nägeln, Schrauben, Stabdübeln und Bolzen, Ausgabe: 2009-06-15
- ÖNORM EN 26 891:* Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln, Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens. Ausgabe 1991-08-01
- DIN EN 595:* Holzbauwerke - Prüfverfahren - Prüfung von Fachwerkträgern zur Bestimmung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens
- DIN EN 594:* Holzbauwerke - Prüfverfahren - Wandscheiben-Tragfähigkeit und - Steifigkeit von Wandelementen in Holztafelbauart

Quellen aus dem Internet

Finnforest Deutschland GmbH: Kerto® - Die stabile Leichtigkeit des Bauens

<http://www.kerto.de/Furnierschichtholz/Produkte.php>

(Abrufdatum: 2010-11-04)

Finnforest Deutschland GmbH: Technische Daten

<http://www.finnforest.de/produkte/kerto/Documents/Kerto%20Image%2006.2010.pdf>

(Abrufdatum: 2010-11-18)

Finnforest Deutschland GmbH: Birkensperrholz – Hochwertiges finnisches Sperrholz

<http://www.finnforest.at/produkte/sperrholz/birken/Pages/Default.aspx>

(Abrufdatum: 2010-11-18)

Howebo GmbH: Birke

<http://www.howebo.de/sperrholz>

(Abrufdatum: 2010-11-04)

Verband der finnischen Forstindustrie: Handbuch über finnisches Sperrholz

[http://w3.upm-kymmene.com/upm/internet/cms/upmma.nsf/lupgraphics/Handbuch%20%C3%BCber%20finnisches%20Sperrholz.pdf/\\$file/Handbuch%20%C3%BCber%20finnisches%20Sperrholz.pdf](http://w3.upm-kymmene.com/upm/internet/cms/upmma.nsf/lupgraphics/Handbuch%20%C3%BCber%20finnisches%20Sperrholz.pdf/$file/Handbuch%20%C3%BCber%20finnisches%20Sperrholz.pdf)

(Abrufdatum: 2011-01-09)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vom Rohstoff zum Werkstoff Glas (Petzold, A., Marusch, H., Schramm, B. (1990), S. 13).....	14
Abbildung 2: Zum Werkstoff Glas gehörende bzw. aus ihm herstellbare Erzeugnisgruppen (Petzold, A., Marusch, H., Schramm, B. (1990), S. 13)	15
Abbildung 3: Einteilung der Bauglaserzeugnisse (Petzold, A., Marusch, H., Schramm, B. (1990), S. 14).....	15
Abbildung 4: Einteilung der Klebstoffe nach der chemischen Basis (Habenicht, G. (1997), S. 7).....	16
Abbildung 5: Einteilung nach dem Abbindemechanismus (Habenicht, G. (1997), S. 8)	17
Abbildung 6: Versuchskörperaufbau für die Abscherversuche	20
Abbildung 7: Fünf Probekörper	20
Abbildung 8: Schrägansicht des Versuchskörpers in der Prüfmaschine	21
Abbildung 9: Seitenansicht des Versuchskörpers in der Prüfmaschine.....	21
Abbildung 10: Schrägansicht eines belasteten Versuchskörpers in der Prüfmaschine	21
Abbildung 11: Schrägansicht eines bis zum Versagen belasteten Versuchskörpers	21
Abbildung 12: Holzfeuchtemessung.....	22
Abbildung 13: Aufkleben der Teflonfolie auf die Probenteile	22
Abbildung 14: Mit Teflonfolie beklebtes und unklebtes Probenteil.....	22
Abbildung 15: Schematische Darstellung einer dreiteiligen Verbindung mit einschnittig belasteten Schrauben von jeder Seite nach (ÖNORM EN1380, S. 7).....	23
Abbildung 16: Grundriss und Ansicht der Probekörper zur Veranschaulichung des Schraubenbildes und der Maße.....	24
Abbildung 17: Belastungsverfahren (ÖNORM EN 26 891, S. 3)	25
Abbildung 18: Idealisierte Last-Verschiebungskurve und Messwerte (ÖNORM EN 26 891, S. 3).....	25
Abbildung 19: Kraft-Weg Diagramm der Messwerte.....	26
Abbildung 20: Probekörper in der Prüfmaschine.....	27
Abbildung 21: Ein bis zum Versagen belasteter Probekörper.....	27
Abbildung 22: Nahaufnahme verformter Schrauben	27
Abbildung 23: Mögliche Versagensmechanismen der Schrauben.....	27
Abbildung 24: Spannungsverlauf im teilvorgespannten Glas (Wagner, E. (2008), S. 85)	30
Abbildung 25: Zweikomponenten Acrylatklebstoff	30
Abbildung 26: Reinigungsmittel	31

Abbildung 27: DuploCOLL Montageklebeband	31
Abbildung 28: Arbeitstisch mit Holzklötzchen zur Ausrichtung der Elemente	32
Abbildung 29: Gurt-Koppelleiste (an OG und UG) mit gelbem Montageklebeband	32
Abbildung 30: Pfosten-Koppelleiste mit gelbem Montageklebeband (innerhalb des Trägers)	32
Abbildung 31: Randpfosten-Koppelleiste mit gelbem Montageklebeband (am Rand des Trägers).....	32
Abbildung 32: Bemaßung der Koppelleisten.....	33
Abbildung 33: Glasscheibe mit Koppelleisten und Abstandhaltern, bereit zur Positionierung	34
Abbildung 34: Um die Glasscheibe mit Klebeband angeordnete und bereits fixierte Koppelleisten, bereit zum Verpressen der Klebefugen	34
Abbildung 35: Butterfly Test	34
Abbildung 36: Druckluftpistole	34
Abbildung 37: Verfüllung der Schubklebefuge mit Acrylat.....	35
Abbildung 38: Entfernung des überschüssigen Acrylats mit einer Spachtel	35
Abbildung 39: Darstellung der zusammengefügtten Koppelleisten, ohne Glasscheibe	35
Abbildung 40: Ansicht eines Holz-Glas-Verbundelements eines Träger-Randfeldes	36
Abbildung 41: Ansicht und Schnitt eines Holz-Glas-Verbundelements eines Träger-Mittelfeldes.....	36
Abbildung 42: Detail einer Rahmenecke des Holz-Glas-Verbundschubfeldträgers (Bemaßung in mm)	37
Abbildung 43: Detail eines Schnitts durch die Koppelleiste und anschließende Teile (Bemaßung in mm)	37
Abbildung 44: Fehlstelle in der Schubverklebung (Montageklebeband in gelb, Acrylat in grau).....	37
Abbildung 45: Anbohren der Schubverklebung	37
Abbildung 46: Verpressen der Fehlstellen in der Schubverklebung	37
Abbildung 47: Ansicht und Schnitte des Rahmens.....	38
Abbildung 48: Fünf übereinandergestapelte Rahmen für Versuchsträger, die untersten drei davon für Schubfeldträger.....	38
Abbildung 49: Anordnung der Schrauben in Feld 1 und Feld 2 (Randfelder) (Zeichnung: Weinlinger, T.).....	39
Abbildung 50: Anordnung der Schrauben in Feld 3 und Feld 4 (Mittelfelder) (Zeichnung: Weinlinger, T.).....	39
Abbildung 51: Anordnung der Schrauben in Feld 5 und Feld 6 (Randfelder) (Zeichnung: Weinlinger, T.).....	39
Abbildung 52: Auflegen der Holz-Glas-Verbundelemente auf den Rahmen	40
Abbildung 53: Arbeitsvorgang der Verschraubung	40
Abbildung 54: Zwei fertige Schubfeldträger	40
Abbildung 55: Maße des Holz-Glas-Verbundträgers (Schubfeldträger)	40

Abbildung 56: Schnitt durch den Holz-Glas-Verbundträger (Schubfeldträger)	41
Abbildung 57: Nummerierung der Felder und Messmittelanordnung am Schubfeldträger, angebracht am halben System	42
Abbildung 58: Lastzyklus der für die Schubfeldträger – Versuche angewendet wurde $F_{ges,max,est} = 45 \text{ kN}$ 10 % von $F_{ges,max,est} = 4,5 \text{ kN}$ 40 % von $F_{ges,max,est} = 18 \text{ kN}$ $v_{zykl} = 100 \text{ N/sec}$ $v_{Bruch} = 200 \text{ N/sec}$ (Hochhauser, W., et al (2011))	43
Abbildung 59: Stahldreiecke am Auflager zur Sicherung gegen Kippen	43
Abbildung 60: Bewegliches Auflager	43
Abbildung 61: Holzkonstruktion in der Trägermitte zur Sicherung gegen Kippen	44
Abbildung 62: Druckzylinder, angreifend im Drittelpunkt auf den Träger	44
Abbildung 63: Messmittel (IWA und DMS)	44
Abbildung 64: Versagen des Trägers im Drittelpunkt	44
Abbildung 65: Messmittel im Randfeld	44
Abbildung 66: Gesamter Versuchsaufbau	45
Abbildung 67: Durchbiegung des Trägers im Halbierungs-, Drittel- und Sechstelpunkt (Schubfeldträger 1)	46
Abbildung 68: Durchbiegung des Trägers im Halbierungs-, Drittel- und Sechstelpunkt (Schubfeldträger 2)	46
Abbildung 69: Durchbiegung des Trägers im Halbierungs-, Drittel- und Sechstelpunkt (Schubfeldträger 3)	47
Abbildung 70: Mittelwerte der Durchbiegungen im Halbierungs-, Drittel- und Sechstelpunkt	47
Abbildung 71: Relativverschiebung zwischen den Koppelleisten (Schubfeldträger 1)	48
Abbildung 72: Relativverschiebung zwischen den Koppelleisten (Schubfeldträger 2)	48
Abbildung 73: Relativverschiebung zwischen den Koppelleisten (Schubfeldträger 3)	48
Abbildung 74: Verschiebungen zwischen Koppelleisten und Glasscheibe in Feld 1, Feld 2 und Feld 3 (Schubfeldträger 1)	49
Abbildung 75: Verschiebungen zwischen Koppelleisten und Glasscheibe in Feld 1, Feld 2 und Feld 3 (Schubfeldträger 2)	49
Abbildung 76: Verschiebungen zwischen Koppelleisten und Glasscheibe in Feld 1, Feld 2 und Feld 3 (Schubfeldträger 3)	50
Abbildung 77: Dehnungen und Stauchungen des Ober- und Untergurts (Schubfeldträger 1)	50
Abbildung 78: Dehnungen und Stauchungen des Ober- und Untergurts (Schubfeldträger 2)	51
Abbildung 79: Dehnungen und Stauchungen des Ober- und Untergurts (Schubfeldträger 3)	51
Abbildung 80: Glasdehnung der Scheiben in Feld 1 und Feld 2 (Schubfeldträger 1)	52
Abbildung 81: Glasdehnung der Scheiben in Feld 1 und Feld 2 (Schubfeldträger 2)	52

Abbildung 82: Glasdehnung der Scheiben in Feld 1 und Feld 2 (Schubfeldträger 3)	52
Abbildung 83: Durchbiegungsdarstellungen bei maximaler Last der Schubfeldträger 1, 2 und 3 sowie aller drei Schubfeldträger	53
Abbildung 84: Durchbiegungsdarstellungen der Schubfeldträger 1, 2 und 3 sowie aller drei Schubfeldträger, bei der in der Trägermitte $w = L/300 = 27,6$ mm erreicht bzw. überschritten wurde.....	54
Abbildung 85: Rechteckiges Schubfeld (<i>Rammerstorfer, F. G. (1992), S.49</i>).....	56
Abbildung 86: Einfließende Komponenten in die gesamte Durchbiegung.....	58
Abbildung 87: Allgemeiner Träger der Länge l , für den die Durchbiegung berechnet werden soll (M steht für die Mitte des Trägers).....	59
Abbildung 88: Träger mit gerader Anzahl an Schubfeldern (oben) und Träger mit ungerader Anzahl an Schubfeldern (unten) (M steht für die Mitte des Trägers).....	59
Abbildung 89: Schubfeldträger mit gerader Anzahl an Feldern mit dazugehörigem Querkraftverlauf (M steht für die Mitte des Trägers)	59
Abbildung 90: Schubfeldträger mit ungerader Anzahl an Feldern mit dazugehörigem Querkraftverlauf (M steht für die Mitte des Trägers)	59
Abbildung 91: Biegelinie eines Durchlaufträgers mit zwei Einzellasten (<i>Holzmann, G., Meyer, H., Schumpich, G. (1983), S.105</i>)	60
Abbildung 92: Ansicht des Holz-Glas-Verbundträgers	60
Abbildung 93: Querschnitt des Holz-Glas-Verbundträgers.....	61
Abbildung 94: Aufteilung des Holzteils nach dem Gamma-Verfahren in Teil 1,2,3.....	63
Abbildung 95: Aufteilung des HGV-Trägers nach dem Gamma-Verfahren in Teil 1,2,3	65
Abbildung 96: Holz-Glas-Verbundträger mit $EI = EI_{\text{eff,HGV}} = 482.354.179,70 \text{ kNcm}^2$; $l = 817,2 \text{ cm}$; $a = l/3 = 272,4 \text{ cm}$ (M steht für die Mitte des Trägers).....	67
Abbildung 97: Schubverformung des Rahmens	68
Abbildung 98: Schubverformung der Schrauben	69
Abbildung 99: Schubverformung der Koppelleiste	69
Abbildung 100: Schubverformung des Vorholzes	69
Abbildung 101: Schubverformung der Klebefuge	69
Abbildung 102: Schubverformung der Glasscheibe	70
Abbildung 103: zugehöriges Federmodell für die Berechnung von C_{ges} nach Hochhauser	70
Abbildung 104: Holz-Glas-Verbundträger mit Querkraftverlauf bei einer Belastung von $F = 22,5 \text{ kN}$ (M steht für die Mitte des Trägers)	73
Abbildung 105: Durchbiegung des Trägers	74
Abbildung 106: Maße und Nummerierung der Schubfelder	75
Abbildung 107: Nummerierung der Stäbe	76
Abbildung 108: Richtung und Nummerierung der Schubflüsse.....	76
Abbildung 109: Querkraftverlauf	76
Abbildung 110: Normalkraftverlauf nach Schubfeldträger-Theorie	77

Abbildung 111: Querkraftverlauf bei einer Belastung von $F= 22,5 \text{ kN}$	77
Abbildung 112: Normalkraftverlauf nach Schubfeldträger-Theorie bei $F= 22,5 \text{ kN}$	79
Abbildung 113: Abmessungen zur Berechnung des Momentenverlaufs und der Gurtnormalkräfte an der Stelle x infolge der Biegetheorie	79
Abbildung 114: Momentenverlauf zufolge der Kraft F	80
Abbildung 115: Nummerierung der Pfosten und Schubflüsse	80
Abbildung 116: Durchbiegung des Trägers	83
Abbildung 117: Vergleich der theoretischen und realen Durchbiegungen in Trägermitte	84
Abbildung 118: Vergleich der theoretischen und realen Durchbiegungen im Träger-Drittelpunkt	84
Abbildung 119: Vergleich der theoretischen und realen Durchbiegungen im Träger-Sechstelpunkt	84
Abbildung 120: Vergleich der theoretischen und realen Normalkraft im Ober- und Untergurt (Schubfeldträger 1)	87
Abbildung 121: Vergleich der theoretischen und realen Normalkraft im Ober- und Untergurt (Schubfeldträger 2)	88
Abbildung 122: Vergleich der theoretischen und realen Normalkraft im Ober- und Untergurt (Schubfeldträger 3)	88
Abbildung 123: Vergleich der theoretischen und realen Normalkraft in Ober- und Untergurt von Schubfeldträger 1, 2, 3 und der Mittelwert aller drei Schubfeldträger	88
Abbildung 124: DMS auf dem Obergurt des Rahmens	89
Abbildung 125: Schubfeldträger mit Gleichlasten, Schubfeldträger mit äquivalenten Knotenlasten und Querkraftverteilung infolge der äquivalenten Knotenlasten	91
Abbildung 126: Maße der Mittellinie des Rahmens aus Kerto-Q	106
Abbildung 127: Durchbiegung von Ober- und Untergurt bei einer Belastung von $F=$ $22,5 \text{ kN}$ in den Drittelpunkten (Kräfte in kN und Durchbiegung in mm)	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Probenzusammensetzung	24
Tabelle 2: Messwerte aus den Abscherversuchen	26
Tabelle 3: Gemessene Werte der Probestücke	28

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift