



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Master Thesis

**Experimentelle und theoretische
Untersuchungen zu
Holz-Glas-Verbundplatten**

ausgeführt am Institut für
Architekturwissenschaften, Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau
der Technischen Universität Wien

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

unter der Anleitung von
o. Univ. Prof. DDI Wolfgang Winter

von
MICHAEL FUCHS
Braunhirschengasse 5/13
1150 Wien

Wien, am 11. März 2012

Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus anderen Quellen entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Wien, am 10. Mai 2012

Michael Fuchs

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „Holz-Glas-verbundkonstruktionen: Berechnung und Bemessungskonzept“ [HWK11] am Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau.

Für die Begutachtung dieser Arbeit und die fachliche Betreuung bedanke ich mich bei Herrn o. Univ. Prof. DDI Wolfgang Winter.

Besonderer Dank gilt DI Dr. Werner Hochhauser für die intensive Betreuung und kompetente Beratung zu jeder Zeit während der Erstellung dieser Arbeit.

Meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden bin ich für große Unterstützung jeglicher Art während des gesamten Studiums zu großem Dank verpflichtet.

Kurzfassung

Diese Arbeit behandelt das Trag- und Verformungsverhalten von Plattenbalken in Holz-Glas-Verbundbauweise (HGV) und den Vergleich zu bekannten Rechenmodellen.

In den Arbeiten von [Kre04] und [Ham99] wurden die theoretischen Modelle bereits vorgestellt und diskutiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden das Gamma-Verfahren (sh. auch ÖNORM EN 1995-1-1 [EN106], Anhang B) und das Schubanalogie-Verfahren (sh. auch DIN 1052 [DIN04], Anhang D) näher untersucht. Für ersteres spricht vor allem die einfache Anwendbarkeit, für letzteres die hohe Flexibilität bei geringer Komplexität des Verfahrens.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden anhand von Kleinproben die für den Verbund wesentlichen Materialeigenschaften des Klebstoffes (Schubmodul G_k , Schubfestigkeit τ_k) ermittelt.

Die Großproben (HGV-Plattenbalken) dienten der Verifizierung der Berechnungsmethoden, die auf den oben erwähnten Verfahren beruhen. Folgende Materialien kamen zum Einsatz:

Platte 8mm Floatglasplatte mit gebrochenen Kanten, $l \times b = 250 \times 125$ cm

Klebstoff Zweikomponenten-Klebstoff auf Acrylat-Basis, Klebefugendicke 3 mm, -breite 30 mm

Rippen BSH GL24h, Querschnitt $h \times b = 10 \times 4$ cm

In Abbildung 0.1 wird der Probekörper dargestellt.

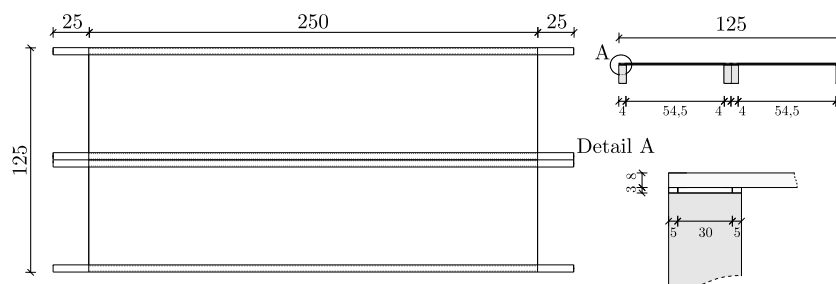


Abbildung 0.1.: Skizze des Versuchskörpers

Nach der Herstellung von fünf Probekörpern wurden diese mit Messmitteln versehen (DMS, induktive Wegaufnehmer und Kraftmessdosen) und in einem Statikprüffeld der Holzforschung-Austria (1030 Wien) geprüft. Das statische System war ein Drei-Punkt-Biegeversuch.

Das Versagen trat im Allgemeinen in den auf Zug beanspruchten Holzstreben auf. Bei weiterer Belastung brach das Glas entlang der Ausbreitungslinie der mitwirkenden Plattenbreite.

Mit den Messergebnissen aus diesen Versuchen wurden die Ergebnisse der Berechnungen verglichen. Dabei konnte eine gute Übereinstimmung bis zum Versagen der Platte festgestellt werden. Überprüft wurden im Detail die Durchbiegung in Feldmitte, die maximalen bzw. minimalen Normalspannungen der Teilquerschnitte in Feldmitte und die oberen Randspannungen im Mittelquerschnitt (und damit die mitwirkende Breite auf Basis des Spannungsvergleiches).

In weiterer Folge wurden die Materialsicherheits- und Modifikationsbeiwerte für bei Plattenbalken eingesetzte Adhäsive abgeleitet.

Diese Arbeit enthält auch ein Berechnungsbeispiel für das Gamma- und das Schubanalogie-Verfahren und einen Leitfaden zur Bemessung von HGV-Plattenbalken.

Abstract

This thesis deals with the load bearing behaviour of timber-glass-composite ribbed plates and the comparison to the well established calculation methods, the Gamma-method (see ÖNORM EN 1995-1-1 [EN106], Appendix B) and the shear analogy method (see DIN 1052 [DIN04], Appendix D).

The introduction to these methods and their analysis is already subject matter of the doctoral theses of [Kre04] and [Ham99]. The main advantage of the Gamma-method is its simplicity. The shear analogy method on the other hand is very flexible and still easy to handle.

Experiments with small and big samples were carried out. The purpose of the former was the determination of the most important material parameters of the used two compound-acrylate adhesive — the modulus of shear G_k and the critical shear stress τ_k .

The load bearing behaviour of the latter ones was compared with the results of the theoretical models mentioned above. The following materials were used:

Plate 8mm Floatglass with broken edges, $l \times b = 250 \times 125$ cm

Adhesive A two-component adhesive based on acrylates, joint thickness $t_k = 3$ mm, width $b_k = 30$ mm

Ribs BSH GL24h, cross section dimensions $h \times b = 10 \times 4$ cm

Five specimens (see Fig. 0.1 for sketch) were produced and, after the application of measuring equipment, tested in the test rig at the Holzforschung Austria. The tests were carried out as three point bending tests.

The most common failure appeared in the ribs due to tension. On further increase of load, the glass broke along the edges of the load distribution (contributive width).

After the analysis of the measurement results, the results were compared with calculations of the theoretical models. Both results were comparable. The deflection, the maximum and minimum normal stress of the parts of the cross section and the upper edge stress in the midsection have been checked in detail. Latter were also used for the calculation of the contributive width of the plate.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Kurzfassung	IV
Abstract	VI
Symbole und Variablen	1
1. Einleitung	4
1.1. Problemstellung	4
1.2. Zielsetzung	4
2. Verbundtheorie	5
2.1. Einführung	5
2.2. Mitwirkende Plattenbreite	6
2.3. Gamma-Verfahren	7
2.3.1. Parameterstudie	9
2.3.1.1. Einfluss des Nachgiebigkeitsfaktors γ auf die effektive Biegesteifigkeit EI_{eff}	9
2.3.1.2. Einfluss der Schubsteifigkeit des Klebers G_k auf die Biegesteifigkeit EI_{eff}	9
2.3.1.3. Einfluss der Schubsteifigkeit des Klebers G_k und der Trägerlänge l auf den Nachgiebigkeitsfaktor γ	10
2.3.1.4. Einfluss der mitwirkenden Plattenbreite b_{eff} auf die effektive Biegesteifigkeit EI_{eff} und die Randspannungen σ_r	11
2.4. Schubanalogie-Verfahren	14
2.5. Beispiel	16
2.5.1. Gamma-Verfahren	18
2.5.2. Schubanalogie-Verfahren	18
2.5.3. Vergleich der Verfahren	20
3. Experimentelle Untersuchungen	22
3.1. Aufgabenstellung	22
3.2. Kleinproben	22
3.2.1. Aufbau des Versuchskörpers	22
3.2.2. Durchführung der Versuche	22
3.2.3. Auswertung und Ergebnisse	24
3.3. Großproben - HGV-Platten	27
3.3.1. Aufbau des Versuchskörpers	27
3.3.2. Voruntersuchungen	27
3.3.3. Herstellung der Probekörper	29
3.3.4. Verwendete Messmittel und deren Anordnung	34

3.3.5.	Versuchsdurchführung und Versagensarten	37
3.3.5.1.	Lagerung und Krafteinleitung	37
3.3.5.2.	Versuchsabläufe	39
3.3.5.3.	Versagensarten	43
3.3.6.	Auswertung der Experimente	48
3.3.6.1.	Durchbiegung und Kraft	48
3.3.6.2.	Lastumlagerung zwischen Streben	48
3.3.6.3.	Dehnungen im Glas in Feldmitte	49
3.3.6.4.	Dehnungen im Holz in Feldmitte	49
3.3.6.5.	Relativverschiebung Glas-Holz	53
4.	Vergleich der Experimente mit den Berechnungsmodellen	56
4.1.	Durchbiegung w und Biegesteifigkeit des Systems	56
4.2.	Spannungen	57
4.3.	Mitwirkende Plattenbreite	58
4.3.1.	Korrektur der mitwirkenden Breite	59
4.4.	Conclusio	60
5.	Berechnung und Bemessung von Holz-Glas-Verbundplattenbalken	61
5.1.	Material, Geometrie und Einwirkungen	61
5.1.1.	Abmessungen des Plattenbalkens	61
5.1.2.	Material und Geometrie	62
5.1.3.	Annahmen zu Modifikations-, Teilsicherheits- und Verformungsbeiwerten	63
5.1.4.	Einwirkungen	64
5.2.	Ermittlung der charakteristischen und der Design-Lasten	64
5.2.1.	Lange Einwirkungen	64
5.2.2.	Kurze Einwirkungen	65
5.3.	Schnittgrößen	65
5.4.	Vorwerte für weitere Berechnungen	66
5.4.1.	Vorwerte für kurzfristige Lasteinwirkungen	66
5.4.2.	Vorwerte für langfristige Lasteinwirkungen	66
5.4.2.1.	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	67
5.4.2.2.	Grenzzustand der Tragfähigkeit	67
5.5.	Tragfähigkeitsnachweis der Schubverklebung	68
5.5.1.	Schubwiderstand der Schubverklebung	68
5.5.2.	Tragsicherheitsnachweis - Schubspannung in der Verklebung	68
5.5.2.1.	Spannungen zufolge kurzfristiger Einwirkung	68
5.5.2.2.	Spannungen zufolge Dauerlast	69
5.5.3.	Nachweis der Schubspannungen in der Verklebung	69
5.6.	Gebrauchstauglichkeitsnachweis: Durchbiegung des Plattenbalkens	69
5.6.1.	Zulässige Durchbiegung	69
5.6.2.	Durchbiegung	69
5.6.2.1.	Durchbiegung kurzfristiger Lasten	69
5.6.2.2.	Durchbiegung Dauerlasten	69
5.6.3.	Nachweis der Durchbiegung	70
5.7.	Gebrauchstauglichkeitsnachweis: Relativverschiebung in Klebefuge	70
5.7.1.	Zulässige Relativverschiebung	70
5.7.2.	vorhandene Relativverschiebung	70
5.7.2.1.	Relativverschiebung zufolge kurzzeitiger Einwirkungen	70

5.7.2.2. Relativverschiebung zufolge Dauerlasten	70
5.7.3. Nachweis der Relativverschiebung	71
6. Zusammenfassung	72
A. Gamma-Verfahren	73
B. Leitfaden zur Berechnung und Bemessung	74
B.1. Annahmen für den Leitfaden	74
B.2. Material, Geometrie und Einwirkungen	75
B.2.1. Abmessungen des Plattenbalkens	75
B.2.2. Material und Geometrie	75
B.2.3. Modifikations-, Teilsicherheits- und Verformungsbeiwerte	76
B.2.4. Einwirkungen	77
B.3. Ermittlung der charakteristischen und der Design-Lasten	78
B.3.1. Lange Einwirkungen	78
B.3.2. Kurze Einwirkungen	78
B.4. Schnittgrößen	79
B.5. Vorwerte für weitere Berechnungen	79
B.5.1. Vorwerte für kurzfristige Lasteinwirkungen	79
B.5.2. Vorwerte für langfristige Lasteinwirkungen	80
B.5.2.1. Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	80
B.5.2.2. Grenzzustand der Tragfähigkeit	81
B.6. Tragfähigkeitsnachweis der Schubverklebung	81
B.6.1. Schubwiderstand der Schubverklebung	81
B.6.2. Tragsicherheitsnachweis - Schubspannung in der Verklebung	81
B.6.2.1. Spannungen zufolge kurzfristiger Einwirkung	81
B.6.2.2. Spannungen zufolge Dauerlast	82
B.6.3. Nachweis der Schubspannungen in der Verklebung	82
B.7. Gebrauchstauglichkeitsnachweis: Durchbiegung des Plattenbalkens	82
B.7.1. Zulässige Durchbiegung	82
B.7.2. Durchbiegung	83
B.7.2.1. Durchbiegung kurzfristiger Lasten	83
B.7.2.2. Durchbiegung Dauerlasten	83
B.7.3. Nachweis der Durchbiegung	83
B.8. Gebrauchstauglichkeitsnachweis: Relativverschiebung in Klebefuge	83
B.8.1. Zulässige Relativverschiebung	83
B.8.2. vorhandene Relativverschiebung	84
B.8.2.1. Relativverschiebung zufolge kurzzeitiger Einwirkungen	84
B.8.2.2. Relativverschiebung zufolge Dauerlasten	84
B.8.3. Nachweis der Relativverschiebung	84
Abbildungsverzeichnis	85
Tabellenverzeichnis	87

Symbole und Variablen

Lateinische Großbuchstaben

A Querschnittsfläche

E Elastizitätsmodul

EI Biegesteifigkeit

EA Dehnsteifigkeit

F Punktlast

G Schubmodul

I Flächenträgheitsmoment

M Moment

N Normalkraft

T Temperatur

V Querkraft

Lateinische Kleinbuchstaben

a Schwerelinienabstand der Einzelquerschnitte eines Verbundquerschnitts

b Breite des Querschnitts

c Fugensteifigkeit

g Eigengewicht

h Höhe des Querschnitts

k Deformationsbeiwert, Steigung

l (System)länge

q Veränderliche Last

t Dicke der Schicht, Schubfluss, Zeit

u Relativverschiebung Glas-Holz, Holzfeuchte

w Durchbiegung

Griechische Buchstaben

α Wärmedehnzahl, Quellmaß

γ Nachgiebigkeitsfaktor, Gleitung

η Verbundeffizienz

ν Querdehnzahl

σ Normalspannung, Standardabweichung

τ Schubspannung

Indizes

1, 2 auf den Querschnitt 1 (Glas) bzw. 2 (Holz) bezogen

F Feuchtigkeit

G Glas

H Holz

K Kleber, Deformationsbeiwert

M zufolge Moment

N zufolge Normalkraft

R Widerstand

S Einwirkung

cal Rechenwert

d design (Lasten)

def Deformation

dyn dynamisch

eff effektiv

g ständig (Lasten)

glo global

init Anfangswert

i auf einen Querschnitt (Holz/Glas) bezogen

k charakteristisch (Lasten)

kurz Kurzzeit (Deformationsbeiwert)

lang Langzeit (Deformationsbeiwert)

max maximal

min minimal

q veränderlich (Lasten)

r Randspannung

zyl Messgrößen

zul zulässig

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

Glas hat in der Architektur in den letzten Jahrzehnten eine immer größere Bedeutung erlangt. Die Konstruktionen werden immer filigraner und lichtdurchlässiger. Dieser Trend legt nahe, Glas stärker in die lastabtragende Konstruktion einzubeziehen. Für vertikale Lasten stehen beispielsweise Plattenbalken und Träger zur Verfügung, als aussteifende Elemente können Scheiben verwendet werden.

Durch den Verbund mit Holz soll die negative Materialeigenschaft der vergleichsweise geringen Zugfestigkeit — bedingt durch die Rissanfälligkeit zufolge Fehlstellen wie Mikroanrissen, Moleküleinschlüssen oder Kerben [Kre04] — vermindert und die positive Eigenschaft der hohen Druckfestigkeit hervorgehoben werden. Weitere Vor- und Nachteile des Holz-Glas-Verbundbaus und der einzelnen Werkstoffe findet man in den grundlegenden Arbeiten [Kre04] und [Ham99].

1.2. Zielsetzung

Um Holz-Glas-Verbundbauteile effizient anzuwenden ist unter anderem ein zuverlässiges und einfaches Bemessungsverfahren notwendig. Daher sollen in dieser Arbeit für den Anwendungsfall des Plattenbalkens ausgewählte Berechnungsmodelle und ein semiprobabilistisches Bemessungskonzept vorgestellt und mittels theoretischer und experimenteller Untersuchungen verifiziert werden.

Für den Plattenbalken stehen dafür mehrere Berechnungsverfahren zur Verfügung. Aus dem Holzbau sind vor allem das Gamma-Verfahren und weiters auch das Schubanalogie-Verfahren bekannt. In [Ham99] wird außerdem das Verfahren nach Natterer/Hoeft vorgestellt, das aber hier nicht behandelt wird.

2. Verbundtheorie

2.1. Einführung

Der Querschnitt eines *Verbundträgers* setzt sich aus zwei oder mehreren *Teilquerschnitten* zusammen. Die Verbindungsmittel stellen einen mehr oder weniger steifen Verbund zwischen den Teilquerschnitten her und beeinflussen somit das Tragverhalten des Biegeträgers.

Die folgenden Berechnungsmodelle setzen voraus, dass sich die Teilquerschnitte nur in horizontaler Richtung gegeneinander verschieben und somit die Einzelträger eine gleiche Biegelinie aufweisen. Daraus folgt des weiteren, dass das Verhältnis der Biegemomente der Einzelquerschnitte zur Steifigkeit derselben konstant ist. Über die Verbundfuge werden Schubkräfte zwischen den Schichten übertragen. Diese stehen mit den Normalkräften der Einzelquerschnitte im Gleichgewicht. (Abbildung 2.1)

Die beiden Grenzzustände der Verbundwirkung sind *kein Verbund* und *starrer Verbund*.

Im ersten Fall ergibt sich die Steifigkeit des Gesamtquerschnitts aus der Summe der Steifigkeiten der Einzelquerschnitte. Es werden keine Schubkräfte in der Schicht zwischen den Trägern übertragen. Im zweiten Fall kommen außerdem die *Steineranteile* hinzu. Zwischen diesen beiden Grenzwerten der Biegesteifigkeit liegt der Bereich des *teilweisen Verbundes*. Je stärker der Verbund zwischen den Trägern, desto höher werden die Normalkräfte und desto niedriger werden die Biegemomente in den Einzelquerschnitten.

In den folgenden Abschnitten werden zum Vergleich der *Berechnungsverfahren* untereinander und mit den experimentellen Untersuchungen die Berechnungs- und Messergebnisse bei einer Durchbiegung von $w = l/300$ verwendet. Das Gebrauchstauglichkeitskriterium für eine Durchbiegung von $l/300$ wurde in Anlehnung an die Durchbiegung von Biegestäben gem. EC5 Tab. 7.2 ([EN106]) gewählt.

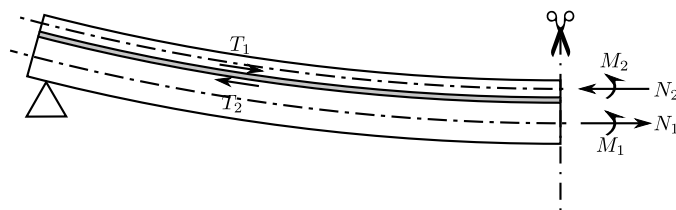


Abbildung 2.1.: Schnittgrößen eines Verbundträgers (aus [Ham99])

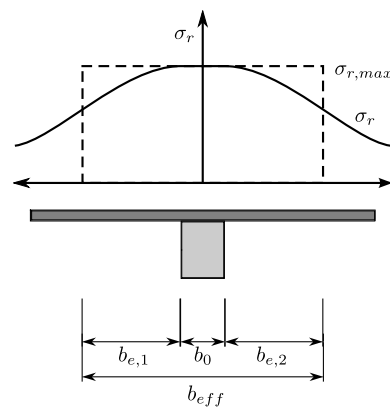


Abbildung 2.2.: Mitwirkende Plattenbreite (aus [Joh05])

2.2. Mitwirkende Plattenbreite

Der Plattenbalken hat eine komplexe räumliche Tragwirkung. Dieses Problem soll auf ein einfaches zweidimensionales Modell eines Biegeträgers abgebildet werden, der den Voraussetzungen der Stabwerkstheorie genügt. Dazu werden die mitwirkenden Anteile der Platte an der Gesamtsteifigkeit des realen Systems auf die Biegesteifigkeit eines Systems mit einem Plattenstreifen der Breite b_{eff} — der *mitwirkenden Plattenbreite* — umgelegt.

Zur Bestimmung der mitwirkenden Plattenbreite b_{eff} können verschiedene Kriterien herangezogen werden. In [ENB05] wird als mitwirkende Breite die Breite einer Fläche bezeichnet, deren Höhe die maximale auftretende Randspannung ist und die gleich groß ist wie die Fläche unter der Kurve des Randspannungsverlaufs am realen Plattenbalken. Es kann aber auch z.B. die Durchbiegung zwischen Rechenmodell und „Realität“ verglichen werden. [Joh05]

Bezogen auf einen Querschnitt in Abbildung 2.2 kann die mitwirkende Plattenbreite als

$$b_{eff} = \sum b_{e,i} + b_0 \quad (2.1)$$

mit

b_0 Breite der Rippe

b_e mittragende Breite der Teilgurte beiderseits des Trägersteges (hier der Rippe)

angeschrieben werden.

Die mitwirkende Plattenbreite wurde für die ersten Abschätzungen analog zum Stahl-Beton-Verbund (siehe [ENB05] 5.4.1.2(5)) mit $b_e = l_0/8$ angenommen, wobei l_0 den Abstand der Momentennullpunkte beschreibt.

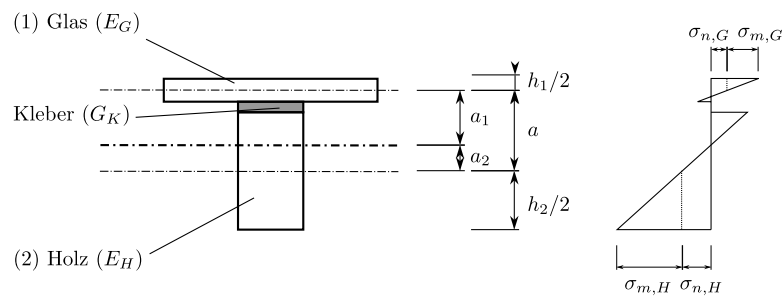


Abbildung 2.3.: Verbundquerschnitt und Spannungsverlauf im Querschnitt

2.3. Gamma-Verfahren

Das Gamma-Verfahren ist im Holzbau das gebräuchlichste Verfahren zur Berechnung von Biegeträgern mit mehrteiligem Querschnitt. Es wurde von Möhler entwickelt und ist Teil des EC5 [EN106]. Die Steifigkeit der Verbindungsmittel (in diesem Fall der Kleber) wird dabei über den *Nachgiebigkeitsfaktor* γ berücksichtigt. Dieser Faktor bestimmt den Einfluß der Steineranteile auf die Biegesteifigkeit des Gesamtquerschnitts - die *effektive* oder *wirksame* Biegesteifigkeit. Er stellt das Verhältnis der Schwerpunktsdehnung eines nachgiebig verbundenen Verbundträgers zu einem Träger mit starrem Verbund dar und nimmt daher Werte zwischen 0 (kein Verbund) und 1 (starrer Verbund) an. [KS04]

Das Berechnungsmodell ist nur für Einfeldbiegeträger unter sinns-förmiger Belastung geeignet. Bei anderen statischen Systemen ist die Bestimmung der Momentennullpunkte erforderlich und deren Abstand als Trägerlänge l_0 anzusetzen. Für Belastungen aus Einzel- und Gleichlasten halten sich laut einer Vergleichsberechnung in [Ham99] die Abweichungen für HGV-Platten in praktikablen Grenzen.

Im folgenden werden die Formeln für einen zweiteiligen Träger dargestellt.

Die *Fugensteifigkeit* errechnet sich aus dem Schubmodul des Klebers und den Querschnittsabmessungen der Verbundfuge.

$$c = \frac{G_K \cdot b_K}{t_K} \quad (2.2)$$

Der *Nachgiebigkeitsfaktor* γ_1 dient der Reduktion der Steineranteile des Querschnitts 1 (hier die Glasplatte) und geht in die Berechnung der Spannungsnullebenen und der effektiven Biegesteifigkeit ein. γ_2 wird gleich 1 gesetzt.

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot EA_G}{l^2 \cdot c}}; \quad \gamma_2 = 1 \quad (2.3)$$

Abstand der Schwerachsen der Teilquerschnitte.

$$a = \frac{h_G + h_H}{2} + t_K \quad (2.4)$$

Lage der Spannungsnullebenen (Abbildung 2.3) der Einzelquerschnitte bei Teilverbund (siehe auch Anhang A):

Analog zu [Ham99] wird bei der Berechnung von a_2 im Zähler a angesetzt. [EN106] setzt hier $(h_1 + h_2)/2$ ein, da die Fuge bei der Verwendung von mechanischen Verbindungsmitteln meist keine Dicke hat.

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot EA_G \cdot a}{\gamma_1 \cdot EA_G + EA_H} \quad (2.5)$$

$$a_1 = a - a_2 \quad (2.6)$$

Wirksame Biegesteifigkeit

$$EI_{eff} = \sum EI_i + \sum EA_i \cdot \gamma_i \cdot a_i^2 = EI_G + EI_H + \frac{a^2 \cdot \gamma_1 \cdot EA_G \cdot EA_H}{\gamma_1 \cdot EA_G + EA_H} \quad (2.7)$$

Die Spannungen zufolge Verbundwirkung sind ein Resultat der in den Teilquerschnitten wirkenden Normalkräfte (Abbildung 2.1).

$$\sigma_{N,i} = \frac{M}{EI_{eff}} \cdot \gamma_i \cdot a_i \cdot E_i \quad (2.8)$$

Aus dem Moment zufolge Eigenbiegung des Teilquerschnitts ergeben sich die Spannungen zufolge Eigenbiegung .

$$\sigma_{M,i} = \frac{M}{EI_{eff}} \cdot \frac{h_i}{2} \cdot E_i \quad (2.9)$$

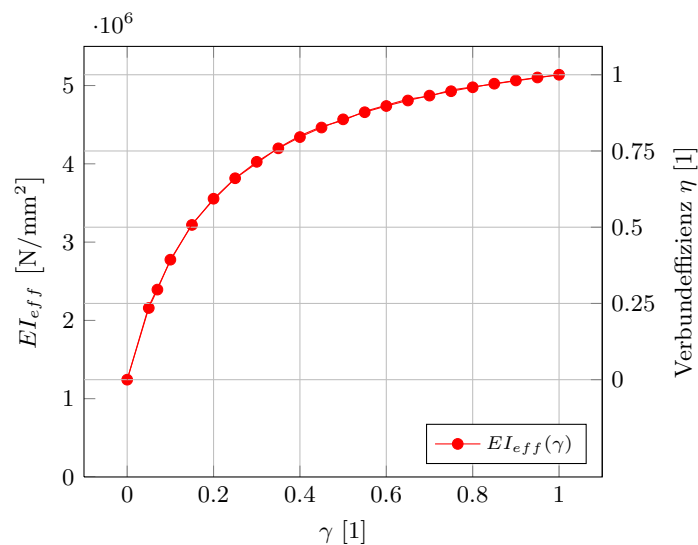
Maximale Schubspannung τ_K und Gleitung γ_k in der Verbundfuge:

$$\tau_{max} = \frac{V_{max}}{EI_{eff}} \cdot \gamma_1 \cdot EA_G \cdot a_1 \cdot \frac{1}{b_k} \quad (2.10)$$

$$\gamma_k = \frac{\tau}{G_k} \quad (2.11)$$

Die Durchbiegung w berechnet sich analog zu einem Biegeträger mit nicht zusammengesetzten Querschnitt, dessen Biegesteifigkeit der effektiven Biegesteifigkeit des zusammengesetzten Querschnitts entspricht.

$$w_{max} = \frac{1}{48} \cdot \frac{F \cdot l^3}{EI_{eff}} \quad (2.12)$$

Abbildung 2.4.: Zusammenhang γ und EI_{eff}

2.3.1. Parameterstudie

2.3.1.1. Einfluss des Nachgiebigkeitsfaktors γ auf die effektive Biegesteifigkeit EI_{eff}

Abbildung 2.4 stellt die effektive Biegesteifigkeit EI_{eff} in Abhängigkeit des Nachgiebigkeitsfaktors γ dar. Auf der rechten Ordinate ist der Steineranteil an der effektiven Biegesteifigkeit im Verhältnis zum Steineranteil bei vollem Verbund — also die *Verbundeffizienz* — aufgetragen.

Die Verbundeffizienz lässt sich folgendermaßen darstellen.

$$\eta = \frac{\sum EA_i \cdot \gamma_i \cdot a_i^2}{\sum EA_i \cdot a_i^2} \quad (2.13)$$

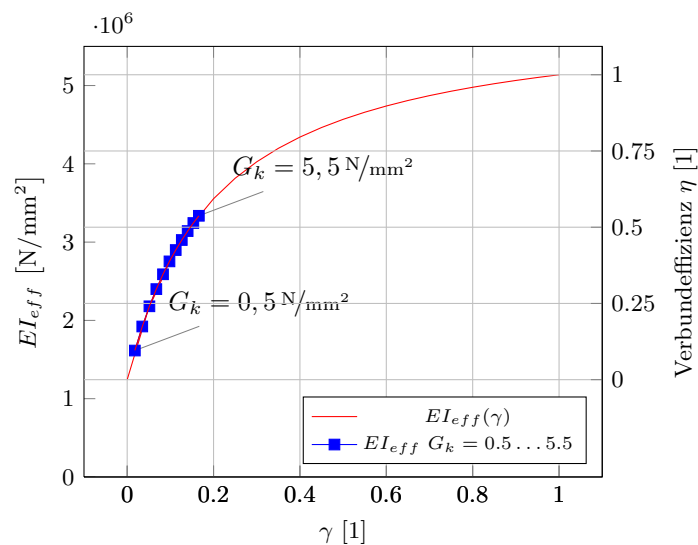
Es ist zu erkennen, dass kein linearer Zusammenhang besteht, da γ nicht nur als Faktor für den Steineranteil dient (Glg. 2.7), sondern auch in die Berechnung der Lage der Schwerlinien a_i (Glg. 2.5) eingeht. Deutlicher wird dies durch die zweite Formulierung der effektiven Biegesteifigkeit EI_{eff} in Glg. 2.7.¹

2.3.1.2. Einfluss der Schubsteifigkeit des Klebers G_k auf die Biegesteifigkeit EI_{eff}

Zwischen dem Schubmodul des Klebers G_k und dem Nachgiebigkeitsfaktor γ besteht für die berechneten Werte in Tabelle 2.1 annähernd eine lineare Relation.

In Abbildung 2.5 ist ähnlich zum Diagramm des vorigen Kapitels der Zusammenhang zwischen γ und EI_{eff} aufgetragen. Die Markierungen zeigen Werte der effektiven Biegesteifigkeit EI_{eff} für die Wert $G_k =$

¹Vgl. dazu [Ham99] S. 45ff.

Abbildung 2.5.: Zusammenhang γ und EI_{eff} — für $G_k = 0,5 \dots 5,5$

0,5 N/mm² bis 5,5 N/mm², wie sie auch in Tabelle 2.1 berechnet sind.

Es ergibt sich, dass eine Änderung von G_k eine große Auswirkung auf die Steifigkeit des Systems hat. So erreicht man mit einem Schubmodul von $G_k = 2,0$ N/mm² bereits eine Verbundeffizienz von 30%.

Tabelle 2.1.: Zusammenhang G_k , γ , EI_{eff}

G_k N/mm ²	γ —	EI_{eff} kNcm ²	Steiner kNcm ²	Verbundeff. η %
0,50	0,0178	1,61E+6	3,72E+5	10
1,00	0,0349	1,92E+6	6,79E+5	17
1,50	0,0515	2,18E+6	9,37E+5	24
2,00	0,0675	2,40E+6	1,16E+6	30
2,50	0,0830	2,59E+6	1,35E+6	35
3,00	0,0979	2,75E+6	1,51E+6	39
3,50	0,1124	2,90E+6	1,66E+6	43
4,00	0,1264	3,03E+6	1,78E+6	46
4,50	0,1400	3,14E+6	1,90E+6	49
5,00	0,1532	3,24E+6	2,00E+6	51
5,50	0,1660	3,34E+6	2,09E+6	54

2.3.1.3. Einfluss der Schubsteifigkeit des Klebers G_k und der Trägerlänge l auf den Nachgiebigkeitsfaktor γ

Außer dem Schubmodul G_K findet auch die Trägerlänge l Eingang in die Berechnung des Nachgiebigkeitsfaktors γ (Glg. 2.3). In Tabelle 2.2 wird dieser Einfluss für G_k zwischen 0,5 N/mm² und 5,5 N/mm² jeweils für die Trägerlängen 125 cm, 250 cm und 500 cm dargestellt.

Tabelle 2.2.: Zusammenhang γ und G_k bzw. l — für $G_k = 0,5 \dots 5,5$

G_k N/mm ²	γ		
	$l = 125$ cm	$l = 250$ cm	$l = 500$ cm
0,5	0,0045	0,0178	0,0675
1,0	0,0090	0,0349	0,1264
1,5	0,0134	0,0515	0,1784
2,0	0,0178	0,0675	0,2245
2,5	0,0221	0,0830	0,2657
3,0	0,0264	0,0979	0,3028
3,5	0,0307	0,1124	0,3363
4,0	0,0349	0,1264	0,3667
4,5	0,0391	0,1400	0,3944
5,0	0,0433	0,1532	0,4199
5,5	0,0474	0,1660	0,4432

Abbildung 2.6 zeigt den Einfluss der Trägerlänge l und des Schubmoduls G_k auf den Nachgiebigkeitsfaktor γ . Je Länger der Träger, desto empfindlicher reagiert γ auf eine Veränderung des Schubmoduls G_k .

2.3.1.4. Einfluss der mitwirkenden Plattenbreite b_{eff} auf die effektive Biegesteifigkeit EI_{eff} und die Randspannungen σ_r

Für die Untersuchung der Auswirkung einer Änderung der *mitwirkenden Plattenbreite* auf die Bemessung wird diese zwischen $b_{e,i} = 20$ cm und 40 cm variiert. Das entspricht einem Verhältnis zur Trägerlänge von $l_0/12,5$ bis $l_0/6,25$ (Tabelle 2.3).

Im Diagramm in Abbildung 2.7 wird als erste Kurve die effektive Biegesteifigkeit EI_{eff} dargestellt, die Ordinate wurde dabei gegenüber Abbildung 2.5 nicht verändert, um die Änderungen in Relation zur Verbundeffizienz bei $b_e = l_0/8$ zu setzen. Aus dem selben Grund wurden für die beiden anderen Kurven — Zugspannung im Holz σ_{max} , Druckspannung im Glas σ_{min} — die Werte für losen und volle Verbund aufgetragen.

Es ist zu sehen, dass im Anwendungsfall der HGV-Platte die Änderung der mitwirkenden Plattenbreite auf die Biegesteifigkeit — und damit auf die Durchbiegung — und die unteren Randspannungen im Holz keine wesentliche Auswirkung hat.

Die oberen Randspannungen im Glas sind jedoch direkt von der Wahl der Plattenbreite betroffen, da mit geringerer Plattenbreite naturgemäß weniger Material zur Verfügung steht, um die Normalkräfte aufzunehmen.

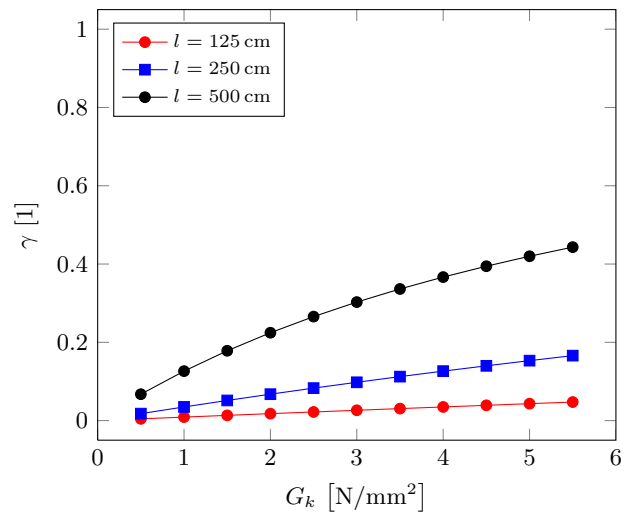


Abbildung 2.6.: Zusammenhang γ und G_k bzw. l — für $G_k = 0,5 \dots 5,5$

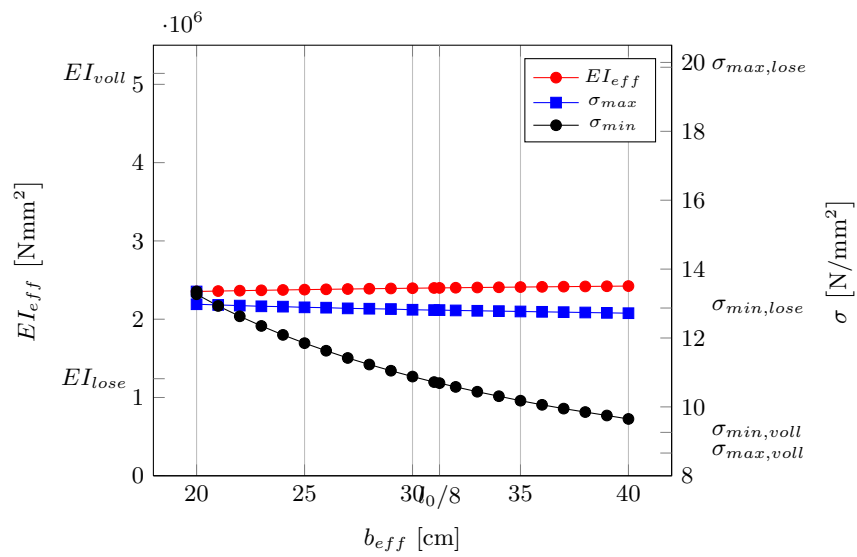


Abbildung 2.7.: Zusammenhang b_{eff} und EI_{eff} , σ_{max} , σ_{min}

Tabelle 2.3.: Auswirkung der Variation von b_{eff} auf EI_{eff} , σ_{min} (Glas), σ_{max} (Holz)

$b_{e,i}$	$\frac{l_0}{b_{e,i}}$	b_{eff}	EI_{eff}	w	σ_{max}	σ_{min}
cm	-	cm	kNcm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²
20	12,50	80	2,35E+06	11,75	12,98	-13,27
21	11,90	84	2,36E+06	11,73	12,96	-12,93
22	11,36	88	2,36E+06	11,70	12,94	-12,63
23	10,87	92	2,37E+06	11,68	12,92	-12,35
24	10,42	96	2,37E+06	11,66	12,91	-12,09
25	10,00	100	2,38E+06	11,64	12,89	-11,85
26	9,62	104	2,38E+06	11,62	12,88	-11,63
27	9,26	108	2,39E+06	11,60	12,86	-11,42
28	8,93	112	2,39E+06	11,58	12,85	-11,23
29	8,62	116	2,39E+06	11,56	12,84	-11,05
30	8,33	120	2,40E+06	11,55	12,82	-10,88
31	8,06	124	2,40E+06	11,53	12,81	-10,72
31,25	8,00	125	2,40E+06	11,53	12,81	-10,69
32	7,81	128	2,40E+06	11,52	12,80	-10,58
33	7,58	132	2,41E+06	11,50	12,79	-10,44
34	7,35	136	2,41E+06	11,49	12,78	-10,31
35	7,14	140	2,41E+06	11,48	12,77	-10,18
36	6,94	144	2,41E+06	11,47	12,76	-10,06
37	6,76	148	2,42E+06	11,45	12,75	-9,95
38	6,58	152	2,42E+06	11,44	12,74	-9,85
39	6,41	156	2,42E+06	11,43	12,73	-9,75
40	6,25	160	2,42E+06	11,42	12,72	-9,65

2.4. Schubanalogie-Verfahren

Hier werden die Anteile an der gesamten Biege- und Schubsteifigkeit des Verbundträgers auf zwei *Ersatzträger* — die Summe der beiden Einzelträger einerseits und die Verbundwirkung andererseits — A und B (Abb. 2.8) aufgeteilt. Die beiden Ersatzträger sind über dehnstarre Pendelstäbe gekoppelt. Damit weisen die Träger unter Belastung die gleiche Biegelinie auf.

Die Steifigkeit des Trägers A EI_A errechnet sich also aus der Summe der Steifigkeiten der Einzelquerschnitte und Träger B erhält eine *Ersatzschubsteifigkeit* GA_B , die sich aus der Fugensteifigkeit c und den Schubsteifigkeiten der Einzelquerschnitte ergibt, und eine Biegesteifigkeit EI_B aus der Summe der Steiner-Glieder.

Die Dehn- und die Schubsteifigkeit der Einzelquerschnitte werden voll Träger A zugewiesen.

Der *Schwerlinienabstand* der beiden Ersatzträger entspricht dem Schwerlinienabstand der beiden Teilquerschnitte.

$$a = \frac{h_1 + h_2}{2} + t_k \quad (2.14)$$

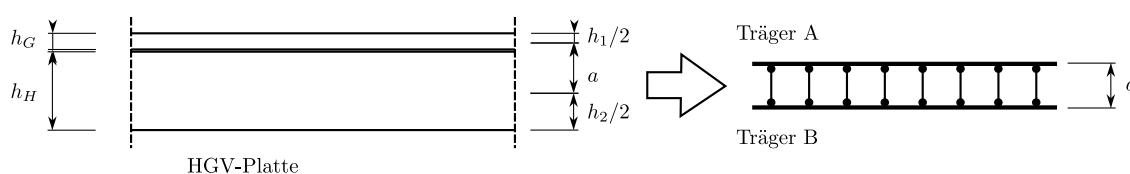


Abbildung 2.8.: Analogiemodell (aus [KS04])

Fugensteifigkeit

$$c_F = \frac{G_K}{t_K} \quad (2.15)$$

Träger A *Biegesteifigkeit* aus Summe der Biegesteifigkeiten der Einzelquerschnitte

$$EI_A = EI_G + EI_H \quad (2.16)$$

Träger B *Biegesteifigkeit* aus Steineranteilen

$$EI_B = a^2 \cdot \frac{EA_G \cdot EA_H}{EA_G + EA_H} \quad (2.17)$$

Die *Ersatzschubsteifigkeit* repräsentiert die Fugensteifigkeit.

$$GA_B = S = \left[\frac{1}{a^2 \cdot b_K} \left(\frac{1}{c_F} + \frac{d_G}{2 \cdot G_G} + \frac{d_H}{2 \cdot G_H} \right) \right]^{-1} \quad (2.18)$$

Im Anwendungsfall der HGV-Platte könnten die Terme mit G_G und G_H auch entfallen, da sie einen geringen Anteil an der Ersatzschubsteifigkeit haben. Damit reduziert sich Glg. 2.18 zu

$$GA_B = a^2 \cdot b_K \cdot c_F. \quad (2.19)$$

Zu beachten ist, dass sich durch diese Vereinfachung das System versteift, die Berechnung erfolgt auf der „unsicherer Seite“. Der Unterschied zwischen Formel 2.18 und 2.19 beträgt jedoch in der Beispielrechnung (sh. Abschnitt 2.5) vernachlässigbare 5%.

Die Schnittgrößen (M, Q) des Ersatzsystems können mit einem Stabwerksprogramm berechnet werden. Über die folgenden Zusammenhänge bestimmt man aus den Ergebnissen die Schnittgrößen der Teilquerschnitte.

Das *Biegemoment* der Teilquerschnitte M_i errechnet sich aus dem Biegemoment des Trägers A M_A .

$$M_i = M_A \cdot \frac{EI_i}{EI_A} \quad (2.20)$$

Die *Normalkraft* der Teilquerschnitte N_G und N_H ergibt sich aus dem Biegemoment des Trägers B M_B .

$$N_G = \frac{-M_B}{a}, \quad N_H = \frac{M_B}{a} \quad (2.21)$$

Die *Querkraft* wird folgendermaßen auf die Teilquerschnitte aufgeteilt:

$$Q_i = Q_A \cdot \frac{EI_i}{EI_A} + Q_B \cdot \frac{e_i}{a} \quad (2.22)$$

Worin

$$e_i = (h_i + t_K)/2 \quad (2.23)$$

den Abstand des Schwerpunkts des Teilquerschnitts (Glas bzw. Holz) zum Schwerpunkt der Verbundfuge darstellt.

Der Schub in der Verbundfuge ergibt sich zu [KS04]:

$$t_0 = \frac{Q_B}{a} \quad (2.24)$$

$$\tau_{max} = \frac{t_{max}}{b_k} = \frac{Q_{max}}{a \cdot b_k} \quad (2.25)$$

Dieses Verfahren hat keine Einschränkung bezüglich Belastungsform und Lagerung von Platten oder Balken. Es können auch — was für diesen Anwendungsfall nicht relevant ist — beliebig viele Schichten in die Berechnung eingehen.

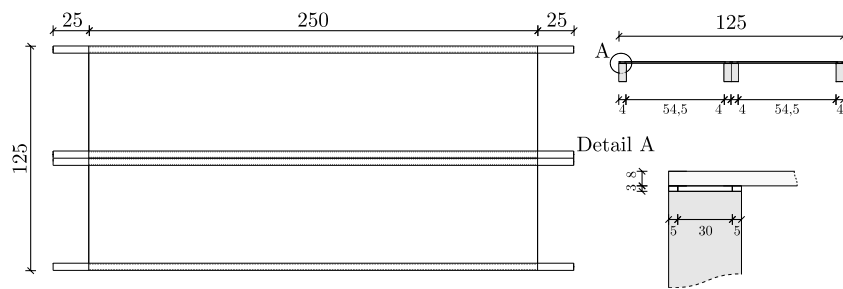


Abbildung 2.9.: Skizze des Versuchskörpers

2.5. Beispiel

Als Beispiel für die Demonstration der Berechnungsmodelle dient der Versuchskörper des Kapitels 3.3 (Abb. 2.9).

Als Platte dient eine Glasplatte aus Floatglas mit einer Dicke von 8 mm. Die Rippen bestehen aus vier Kanthölzern 4×10 cm aus BSH GL24h; zwei Stück mittig, jeweils eine Rippe am Längsrand.

Der Plattenbalken ist am Anfang und am Ende gelenkig gelagert, als Belastung wird eine Einzellast in der Mitte der Platte gewählt. Somit ergibt sich als statisches System ein Einfeldträger mit mittiger Einzelkraft (Abbildung 2.10).

Die folgenden Berechnungen wird mit charakteristischen Werten durchgeführt, um den Vergleich mit den Versuchsergebnissen in Kapitel 4 zu veranschaulichen. Die Bemessung erfolgt in Kapitel 5.

Glasplatte Materialeigenschaften und Abmessungen

$$E_G = 70000 \text{ N/mm}^2$$

$$b_G = 125 \text{ cm}$$

$$t_G = 8 \text{ mm}$$

$$A_G = 125 * 0,8 = 100 \text{ cm}^2$$

$$I_G = 125 * 0,8^3 / 12 = 5,33 \text{ cm}^4$$

$$EA_G = 7000 * 100 = 700000 \text{ kN}$$

$$EI_G = 7000 * 5,33 = 37333 \text{ kNcm}^2$$

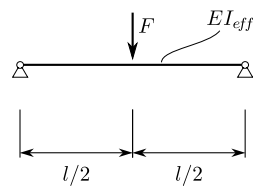


Abbildung 2.10.: statisches System

Holz Materialeigenschaften und Abmessungen

$$E_H = 9041 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{vgl. Tabelle 3.4})$$

$$b_H = 4 * 4,0 = 16 \text{ cm} \quad (\text{Gesamtbreite aller vier Holzrippen})$$

$$h_H = 10 \text{ cm}$$

$$A_H = 10 * 16 = 160 \text{ cm}^2$$

$$I_H = 16 * 10^3 / 12 = 1333 \text{ cm}^4$$

$$EA_H = 904,1 * 160 = 144656 \text{ kN}$$

$$EI_H = 904,1 * 1333 = 1205467 \text{ kNcm}^2$$

Klebefuge Materialeigenschaften und Abmessungen

$$G_K = 2,0 \text{ N/mm}^2 \quad \text{sh. [Neu11]}$$

$$b_K = 4 * 3,0 = 12 \text{ cm}$$

$$t_K = 3 \text{ mm} \quad (\text{Dicke der Klebefuge})$$

$$h_{tot} = 0,8 + 0,3 + 10,0 = 11,1 \text{ cm}$$

$$a = h_{tot} - h_G/2 - h_H/2 = 5,7 \text{ cm}$$

Einwirkende Kraft und Schnittgrößen

$$F = 8,5 \text{ kN}$$

$$M_{max} = F * l/4 = 8,5 * 2,5/4 = 5,31 \text{ kNm}$$

$$V_{max} = F/2 = 8,5/2 = 4,25 \text{ kN} \quad (\text{entspricht Auflagerkraft})$$

2.5.1. Gamma-Verfahren

$$c = 2,0 * 12 / 0,3 = 80 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma = (1 + \pi^2 * 700000 / (250^2 * 8))^{-1} = 0,0675$$

$$a_H = 0,0675 * 700000 * 5,7 / (0,0675 * 700000 + 144656) = 1,40 \text{ cm}$$

$$a_G = 5,7 - 1,4 = 4,30 \text{ cm}$$

$$EI_{eff} = 37333 + 1205467$$

$$+ 5,7^2 * 0,0675 * 700000 * 144656 / (0,0675 * 700000 + 144656)$$

$$= 2399976 \text{ kNcm}^2$$

Normalspannungen

$$\sigma_{N,G} = -531 / 2399976 * 0,0675 * 4,3 * 70000 = -4,50 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{N,H} = 531 / 2399976 * 1,4 * 9041 = 2,80 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{M,G} = 531 / 2399976 * 0,8 / 2 * 70000 = \pm 6,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{M,H} = 531 / 2399976 * 10 / 2 * 9041 = \pm 10,00 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{max} = 2,80 + 10,00 = 12,80 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{min} = -4,50 - 6,20 = -10,70 \text{ N/mm}^2$$

Schubspannung in der Verbundfuge

$$\tau_{max} = 4,25 / 2399976 * 0,0675 * 70000 * 100 * 4,3 / 12 = 0,300 \text{ N/mm}^2$$

Durchbiegung

$$w_{max} = 1 / 48 * 8,5 * 250^3 / 2399976 = 1,15 \text{ cm}$$

2.5.2. Schubanalogie-Verfahren

Abstand der Schwerelinien (siehe Gamma-Verfahren)

$$a = 5,70 \text{ cm}$$

Fugensteifigkeit

$$c = 2,0 / 3 = 0,667 \text{ N/mm}^3$$

Gewählte Materialeigenschaften für Berechnung der Schnittgrößen am Ersatzsystem im Stabwerksprogramm (hier R-Stab® der Firma Dlubal)

$$E_{cal} = 10000 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{cal} = 7000 \text{ N/mm}^2$$

Die Querschnittswerte (I_A , I_B , G_B) werden dann an das gewählte Material angepasst.

Träger A: Biegesteifigkeit und Querschnittswert

$$EI_A = 37333 + 1205467 = 1242800 \text{ kNcm}^2$$

$$I_A = EI_A/E_{cal} = 1242800/10000 = 1243 \text{ cm}^4$$

Träger B: Biegesteifigkeit, Ersatzschubsteifigkeit und Querschnittswerte

$$EI_B = 5,7^2 * 700000 * 144656 / (700000 + 144656) = 3894972 \text{ kNcm}^2$$

$$I_B = EI_B/E_{cal} = 3894972/10000 = 3895 \text{ cm}^4$$

$$GA_B = (1/(5,7^2 * 12) * (1/0,667 + 0,8/(2 * 2800) + 10/(2 * 62)))^{-1} = 246,8 \text{ kN}$$

$$A_B = 246,8/700 = 0,353 \text{ cm}^2$$

Die mit dem Stabwerksprogramm RStab® berechneten Schnittgrößen sind in der Tabelle 2.4 und den Abbildungen 2.11 und 2.12 dargestellt.

Tabelle 2.4.: Ergebnisse der Berechnungen im Stabwerksprogramm

	$M(x = l/2)$ kNm	$Q(x = 0)$ kN	w_{max} mm
Träger A	3,21	1,87	11,89
Träger B	2,10	2,38	11,89

ERGEBNISSE

LF 2 - Einzellast
Schnittgrößen M-2

Entgegen der Y-Richtung

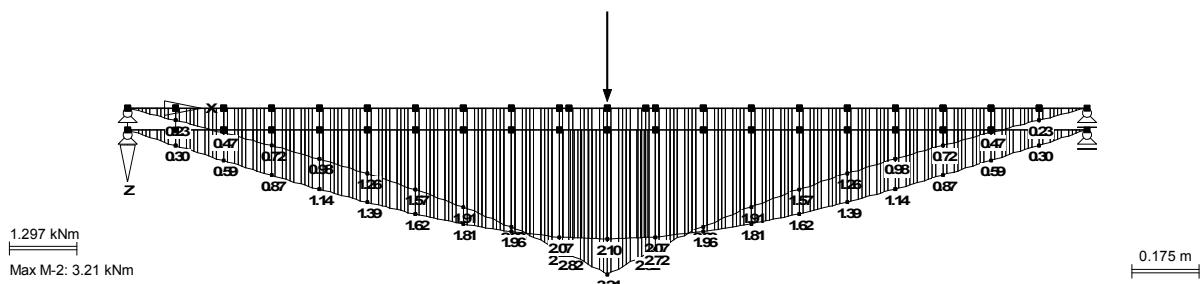


Abbildung 2.11.: Verlauf des Biegemoments (Ausdruck aus Dlubal RSTAB 5)

ERGEBNISSE

LF 2 - Einzellast
Schnittgrößen Q-3

Entgegen der Y-Richtung

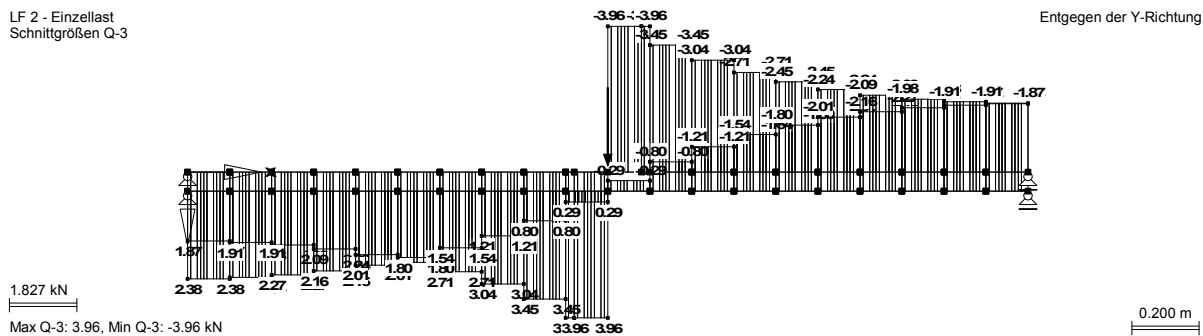


Abbildung 2.12.: Verlauf der Querkraft (Ausdruck aus Dlubal RSTAB 5)

$$M_G = 3,21 * 37333/1242800 = 0,096 \text{ kNm}$$

$$M_H = 3,21 * 1205467/1242800 = 3,114 \text{ kNm}$$

$$N_G = -2,10/0,057 = -36,84 \text{ kN}$$

$$N_H = 36,84 \text{ kN}$$

Normalspannungen

$$\sigma_{min} = -36,84/100 - 0,0907 * 100/5,33 * 0,8/2 = -1,05 \text{ kN/cm}^2 = -10,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{max} = 36,84/160 + 2,929 * 100/1333 * 10/2 = 1,33 \text{ kN/cm}^2 = 13,3 \text{ N/mm}^2$$

Schubspannung in der Verbundfuge

$$\tau_{max} = 2,38/(5,70 * 12,0) = 0,0348 \text{ kN/cm}^2 = 0,348 \text{ N/mm}^2$$

Durchbiegung in Feldmitte

$$w_{max} = 1,19 \text{ cm}$$

2.5.3. Vergleich der Verfahren

Die durchgängig einfache Anwendbarkeit des Gamma-Verfahrens ist sein größter Vorteil. Obwohl das Verfahren nur für einen Anwendungsfall (Einfeldträger mit sinusförmiger Belastung) exakte Ergebnisse liefert, sind die Abweichungen für andere Lastfälle in praktikablen Grenzen (siehe [Ham99] S. 91).

Die Anwendung des Schubanalyse-Verfahrens ist bis auf die Berechnung der Schnittgrößen mittels eines Stabwerksprogramms auch sehr einfach. Die große Flexibilität des Verfahrens kann sich hier jedoch nicht

Tabelle 2.5.: Vergleich der Ergebnisse des Gamma-Verfahrens und des Schubanalgie-Verfahrens (Sa.)

	σ_{max} N/mm ²	σ_{min} N/mm ²	τ_{max} N/mm ²	w_{max} mm	N_i kN	M_1 kNm	M_2 kNm
Gamma	12,82	-10,69	0,300	11,53	44,94	8,26	266,85
Sa.	13,98	-10,92	0,348	11,89	36,84	9,64	311,36

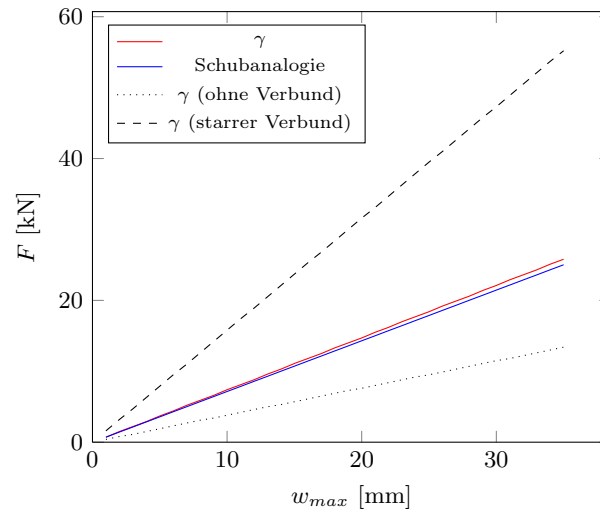


Abbildung 2.13.: Vergleich Gamma- und Schubanalgie-Verfahren

entfalten, da der HGV-Plattenbalken auf zwei Schichten beschränkt ist und als Lagerungsfall bislang nur Einfeldträger untersucht wurden.

In Tabelle 2.5 und Abbildung 2.13 sieht man, dass sich die Ergebnisse kaum unterscheiden.

Gamma-Verfahren als geeignete Berechnungsmethode Trotz der für das Rechenmodell ungünstigen Belastungssituation (Einzellast vs. sinusförmige Lastverteilung) unterscheiden sich die Ergebnisse der Berechnungen nicht wesentlich vom exakteren Modell des Schubanalgie-Verfahrens. Da in der Anwendung das System vorwiegend als Einfeldträger ausgeführt werden wird und das Gamma-Verfahren durch seine Einfachheit besticht, empfiehlt der Author das Gamma-Verfahren als Bemessungsmodell anzuwenden.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1. Aufgabenstellung

In diesem Abschnitt werden die durchgeführten experimentellen Untersuchungen erläutert und interpretiert.

Kleinproben Um die wesentlichen Materialparameter des Klebstoffes zu überprüfen wurden Kleinproben angefertigt, abgedrückt und ausgewertet. Die angegebenen Werte für den Schubmodul und die Schubfestigkeit konnten im Vergleich zu [Neu11] bestätigt werden.

Großproben Bei diesen Untersuchungen wurde das Verbundverhalten von Glas und Holz als Plattenbalken und die Übereinstimmung der Messergebnisse mit den oben vorgestellten Bemessungsverfahren überprüft.

3.2. Kleinproben

Die Versuche an den *Kleinproben* dienten der Ermittlung bzw. Verifizierung (vgl. [Neu11]) des Schubmoduls und der Schubfestigkeit des verwendeten Klebstoffes.

3.2.1. Aufbau des Versuchskörpers

In Abbildung 3.1 ist der Aufbau der Versuchskörper dargestellt. Über eine Fläche von 3×5 cm wurden ein Holzstück und eine kleine Glasscheibe verklebt.

3.2.2. Durchführung der Versuche

Der Probekörper wurde mittels Aluschienen und Gewindestangen im Prüfstand fixiert und so ausgerichtet, dass der Stahlstempel auf die Kante der Glasscheibe drücken konnte. Um keine zusätzliche Verformung ins System zu induzieren, wurde auf eine glasschonende Zwischnelage zwischen Stahl und Glas verzichtet.

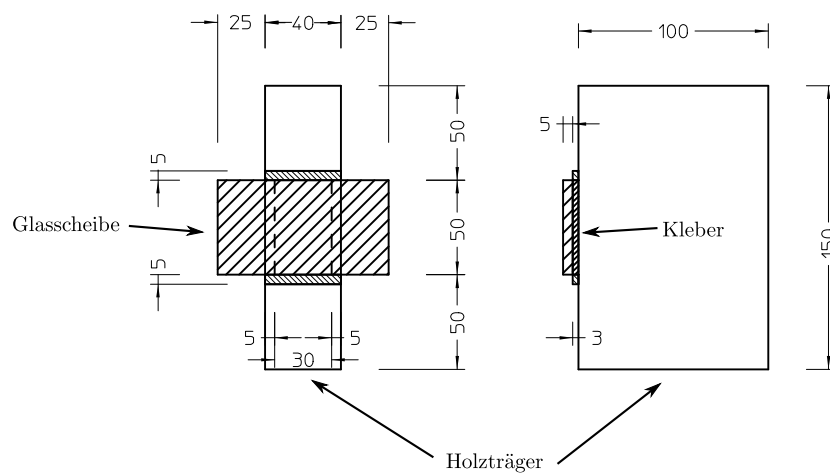


Abbildung 3.1.: Kleinproben - Probekörper



Abbildung 3.2.: Kleinproben - Probekörper (a) und Versuchsanordnung (b)

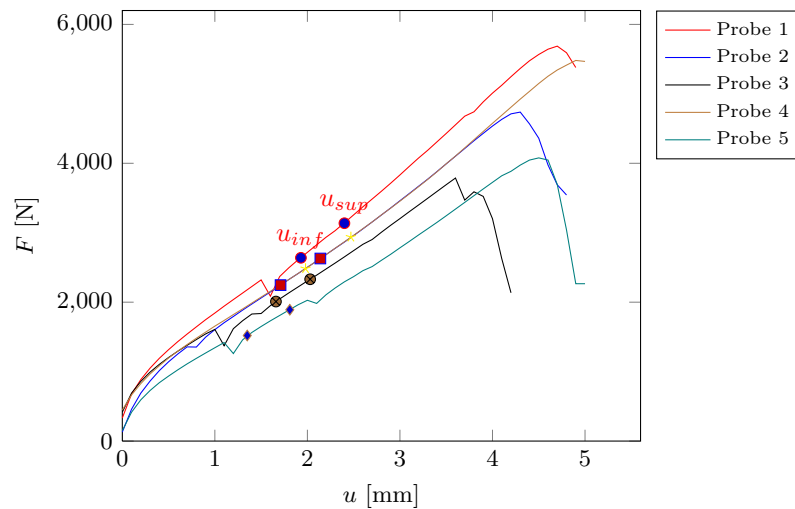


Abbildung 3.3.: Versuchsablauf Kleinproben im Kraft-Weg-Diagramm

Der Versuch wurde weggesteuert durchgeführt. Als Bruchkriterium wurde ein deutlicher Lastabfall festgelegt (z.B. nach Überschreiten der Festigkeit des Klebstoffs, Versagen der Glasscheibe).

3.2.3. Auswertung und Ergebnisse

Bei der Versuchsdurchführung entstanden wie erwartet (vgl. 3.2.2) durch die Lastaufbringung über die starre Stahlplatte lokale Spannungsspitzen in der Glasscheibe. Dies führte zum Bruch der Glasscheiben, wobei sich dreiecksförmige Stücke ablösten (Abbildung 3.4). Vor der Auswertung der Versuche wurde deshalb die verbliebene Kontaktfläche der Glasscheibe mit dem Klebstoff A_{net} ermittelt.

Die maximale Schubspannung wurde wie folgt ermittelt:

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{A_{net}}$$

Die Ermittlung des *Schubmoduls* G erfolgte über die Berechnung des Sekantenmoduls. Der Bereich für die Bestimmung der Steigung der Kurve wurde in der Nähe von $u_{inf} \approx 0,4 * u_{max}$ bzw. $u_{sup} \approx 0,5 * u_{max}$ gewählt, wobei der dazwischenliegende Verlauf möglichst störungsfrei — also ohne Glasbrüche — sein und eine Länge von $0,1 * u_{max}$ haben sollte. Die gewählten Punkte sind in Abb. 3.3 dargestellt.

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta u}$$

$$G = \frac{k \cdot d}{A_{net}}$$

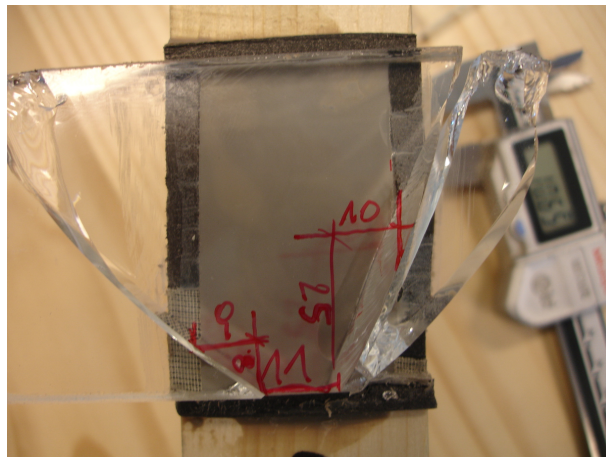


Abbildung 3.4.: Kleinproben - Bestimmung von A_{net}

Tabelle 3.1.: Maximale Schubspannung

Probe	A_{net} mm ²	F_{max} N	$u(F_{max})$ mm	τ_{max} N/mm ²
1	1423	5688	4,7	4,00
2	1464	4741	4,3	3,24
3	1339	3862	3,7	2,88
4	1500	5501	4,9	3,67
5	1472	4082	4,5	2,77
Mittelwert				3,31
Standardabweichung				0,52

Von der Fläche $A = 3 \times 5$ mm wurden die Flächen der weggebrochenen Glasteile abgezogen.

u Verschiebung der Glasplatte

k Steigung der Sekante

d Dicke der Glasplatte

Die Ergebnisse der Versuche (Tabelle 3.2) bestätigen den für die Vorbemessungen angenommenen Wert für den Schubmodul $G = 2,0 \text{ N/mm}^2$.

HGV Plattenbalken - Probekörper

M 1:25

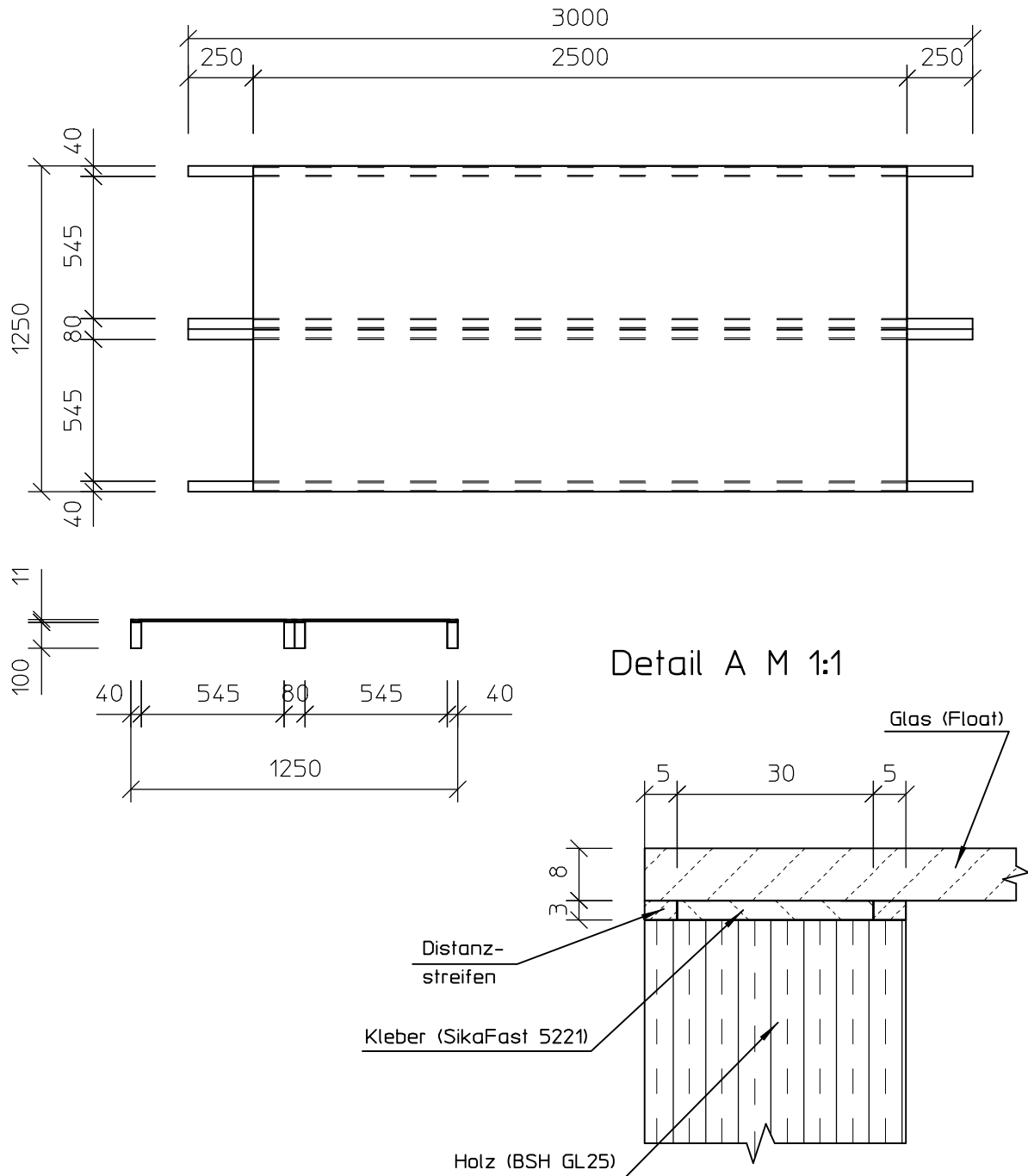


Abbildung 3.5.: Zeichnung des Probekörpers im Maßstab 1:25 und das Anschlussdetail im Maßstab 1:1

Tabelle 3.2.: Berechnung des Schubmoduls

Probe	A_{net} mm ²	$\frac{u_{inf}}{u_{max}}$ %	$\frac{u_{sup}}{u_{max}}$ %	u_{inf} mm	u_{sup} mm	$F(u_{inf})$ N	$F(u_{sup})$ N	$\Delta F/\Delta u$ N/mm	G N/mm ²
1	1423	41	51	1,93	2,40	2639	3137	1060,77	2,24
2	1464	40	50	1,71	2,14	2246	2629	895,7	1,84
3	1339	45	55	1,66	2,03	2009	2330	870,64	1,95
4	1500	40	50	1,98	2,47	2484	2938	916,55	1,83
5	1472	30	40	1,35	1,81	1520	1891	822,33	1,68
								Mittelwert	1,91
								Standardabweichung	0,21

3.3. Großproben - HGV-Platten

3.3.1. Aufbau des Versuchskörpers

Glas Die *Glasscheibe* für die Probekörper war eine Scheibe aus Floatglas (8 mm) mit gebrochenen Kanten und den Abmessungen 250 × 125 cm (Abbildung 3.5).

Holz Aus einer ersten Abschätzung der mitwirkenden Plattenbreite analog zum Stahl-Beton-Verbundbau (Abschnitt 2.2)

$$b_{e,i} = l_0/8 = 250/8 = 31,25 \text{ cm}$$

ergab sich die Anordnung der *Holzrippen*. Gewählt wurden zwei einzelne Randrippen ($b \times h = 4 \times 10$ cm) und eine doppelte Rippe in Plattenmitte ($2 * 4 \times 10$ cm). Um die gesamte Länge der Glasplatte statisch nutzen zu können, wurden Rippen der Länge $l_h = 3$ m gewählt. Durch die Vorholzlänge von 25 cm konnte die Platte einerseits leichter aufgelagert werden, andererseits diente dieser Teil als "Vorschubbewehrung,,", um die Schubkräfte abzuleiten. Das verwendete Holz für die Rippen war BSH GL24h. Aus Holzstücken mit den Abmessungen $b \times h = 10 \times 10$ cm wurden die oben angegebenen Rippen geschnitten und die Schnittflächen glatt gehobelt.

Klebstoff Zur Herstellung der Klebefuge wurde ein Zweikomponenten-Acrylatklebstoff verwendet. Auf das Holz aufgebrachte Distanzstreifen aus Schaumstoff stellten einerseits eine Mindestdicke der Klebefuge von 3 mm sicher und verhinderten andererseits das seitliche Auslaufen des Klebstoffes (sh. Abbildung 3.11).

3.3.2. Voruntersuchungen

Bestimmung des E-Moduls der Holzrippen Der E-Modul der Holzrippen wurde bestimmt, um das Verformungsverhalten der Platten besser interpretieren zu können und für die einzelnen Versuchskörper Rippen ähnlicher Steifigkeit zusammenzufassen.



Abbildung 3.6.: Zweikomponentenkleber und Reinigungsmittel

Zur Bestimmung des E-Moduls wurde das Verfahren der Laser-Interferometrie angewandt ([Neu07]). Damit lässt sich der dynamische E-Modul sehr rasch bestimmen. Bei diesem Verfahren misst der Laser die Eigenlängsschwingung des Probekörpers, woraus sich der *dynamische E-Modul* berechnen lässt.

Laser-Interferometrie Die Dichte wurde bestimmt, indem der Balken vermessen und gewogen wurde. Anschließend wurde der Feuchtegehalt gemessen (Holzfeuchte Messer FMD, Abbildung 3.8 (b)).

Für die Messung der Eigenfrequenz musste die Probe so gelagert werden, dass die Eigenschwingung möglichst ungestört zugelassen wird. Hier wurde das mit Schaumstoff umwickelten Holzständern erreicht (Abbildung 3.8 (a)). Die Probe wurde mit einem Schlag auf das Hirnholz in Längsschwingung versetzt, welche dann von einem auf dieselbe Fläche gerichteten Laser (Polytec IVS-300, Digital Laser Vibrometer, Abbildung 3.9 (a)) gemessen wurde. [Neu07]

Mit folgender Formel wird der dynamische E-Modul bestimmt.

$$E_{dyn} = 4 \cdot f^2 \cdot l^2 \cdot \rho \quad (3.1)$$

ρ Rohdichte der Probe

f Eigenfrequenz aus Laser-Messung

l Länge der Probe

Je nach Feuchtegehalt des Holzes muss dieser Wert noch korrigiert werden. Je Prozent Abweichung vom Referenzwert von 12% muss der E-Modul um 2% korrigiert werden. [DIN08]

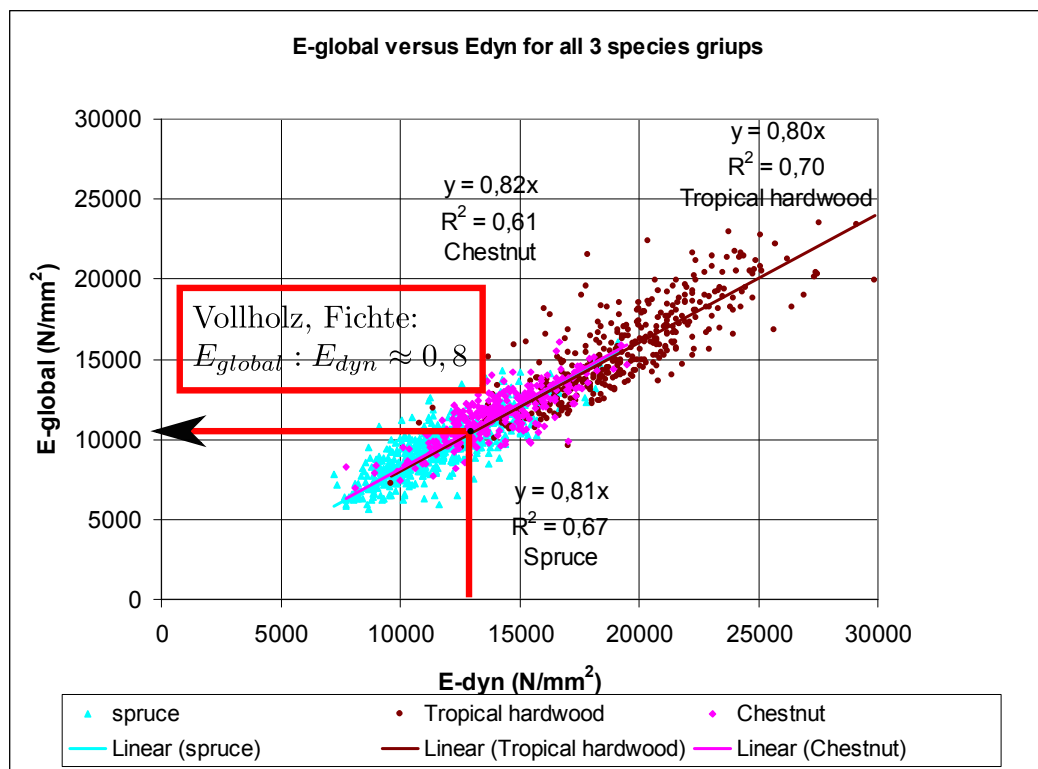


Abbildung 3.7.: Verhältnis von E_{dyn} zu E_{global} nach [RK09]

In Tabelle 3.3 wurden die Ergebnisse der Messungen zusammengefasst.

In [RK09] (Abbildung 3.7) wird das Verhältnis zwischen E_{dyn} und E_{global} für Fichtenholz mit

$$E_{global} = 0,81 \cdot E_{dyn} \tag{3.2}$$

angegeben.

Im Vorfeld der Herstellung der Probekörper wurden die Holzbalken optisch hinsichtlich Fehlstellen und ungünstiger Lage von Astlöchern aussortiert und in Gruppen mit ähnlich großem E-Modul zusammengefasst (Abbildung 3.9 (b)). Damit sollten Verdrehungen und ungleiche Lastverteilungen durch unterschiedliche Steifigkeiten im Plattenbalken vermieden werden. Tabelle 3.4 stellt die durchschnittlichen E-Moduln je Platte und die Abweichungen vom Durchschnitt über alle Rippen dar.

3.3.3. Herstellung der Probekörper

Im folgenden werden die wichtigsten Arbeitsschritte zur Herstellung der Probekörper (HGV-Plattenbalken) beschrieben.

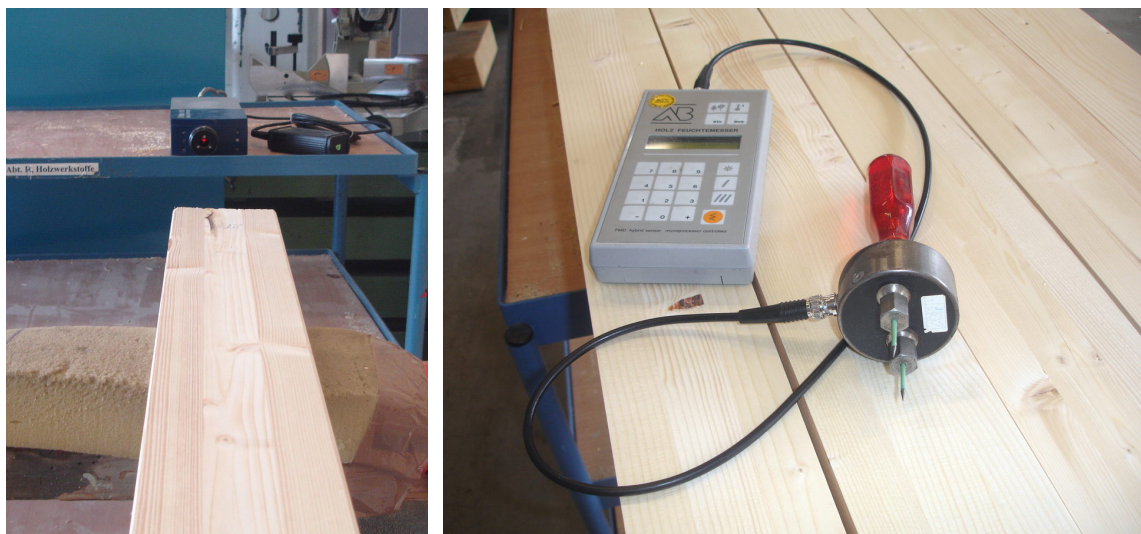


Abbildung 3.8.: Bestimmung von $E_{0,dyn}$ mittels Laser-Interferometrie (a) und Feuchtigkeitsmessgerät (b)

Tabelle 3.3.: Messergebnisse des Laser-Interferometers

Rippe Nr.	l mm	m g	ρ kg/m ³	F %	f Hz	E_{dyn} N/mm ²	Platte Nr.
1	2990	5135	429	12	936	13451	1
23	3005	5765	480	11	848	12458	1
13	3005	5450	453	11	856	12000	1
2	2988	4975	416	13	893	11854	1
12	3005	5795	482	13	806	11313	2
15	2990	4975	416	12	870	11259	2
26	3007	5375	447	12	833	11215	2
18	3005	5265	438	13	836	11057	2
21	3000	5235	436	12	839	11055	3
16	2991	5240	438	12	839	11032	3
25	2997	4965	414	12	859	10980	3
24	3000	4790	399	12	863	10702	3
5	3004	4960	413	11	842	10563	4
17	3005	5375	447	12	808	10545	4
27	3000	4725	394	12	852	10290	4
6	3005	5545	461	13	781	10164	4
9	2995	4985	416	11	825	10162	5
10	3005	4900	408	11	830	10144	5
19	3005	5375	447	14	792	10131	5
20	2987	5080	425	11	817	10128	5

Tabelle 3.4.: Mittelwerte und Standardabweichungen der E-Moduln für jede Platte und alle Rippen

Platte Nr.	E_{dyn}	E_{glo}	Std-Abw	$\frac{E_i - \overline{E_{glo}}}{\overline{E_{glo}}}$
	N/mm ²	N/mm ²		N/mm ²
I	12441	10201	721	12,84
II	11211	9193	110	1,69
III	10942	8973	163	-0,75
IV	10391	8520	196	-5,76
V	10141	8316	15	-8,02
Alle	11025	9041	880	0

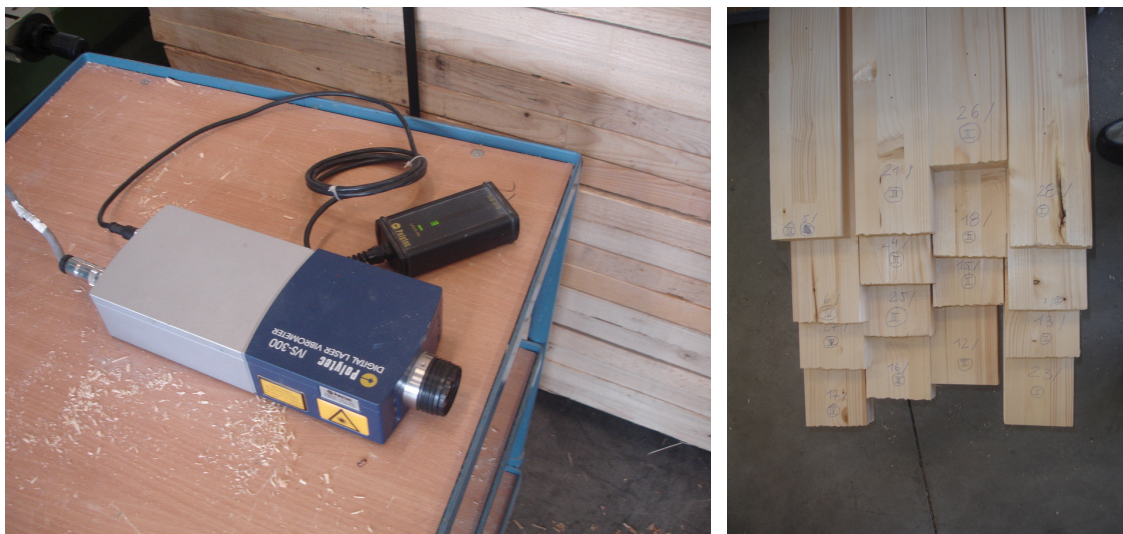


Abbildung 3.9.: Laser-Vibrometer (a) und Sortierung der Rippen nach gemessenem E-Modul (b)

Kontrollieren und Reinigen der Glasscheibe Die Glasscheiben wurden visuell auf Fehlstellen (Kratzer, Einkerbungen an den Kanten) geprüft und aussortiert, danach wurden die Kontaktflächen des Klebers mit dem mitgelieferten Reinigungsmittel vorbereitet (Abbildung 3.6).

Richttisch und Distanzstreifen Vor der Fertigung des ersten Plattenbalkens wurde ein Richttisch mit Distanzhaltern hergestellt (Abbildung 3.11), um Plattenbalken gleicher Geometrie produzieren zu können und eine rasche Verarbeitung zu gewährleisten.

Zur Abgrenzung der Klebefläche jeder Rippe wurden selbstklebende Distanzstreifen aus Schaumstoff angebracht. Diese sicherten die Dicke der Klebefuge und verhinderten das übermäßige Austreten des Klebers.

Auftragen des Klebstoffes auf die beiden äußeren Rippen Die Verarbeitungszeit des Klebers wurde mit ca. zehn Minuten bei Raumtemperatur angegeben. Dieser Zeitraum reichte nicht aus, um auf alle Rippen Kleber aufzutragen und die Glasplatte mit einem Kran über die Balken zu positionieren. Daher wurden in einem ersten Arbeitsgang die äußeren Rippen verklebt und nach einer Trocknungszeit von 45 Minuten die beiden inneren Rippen.

Beim Auftragen des Klebers war darauf zu achten, die richtige Menge aufzubringen. Die Klebefuge sollte möglichst ohne Luftblasen und Fehlstellen hergestellt werden. Ein Abziehen des Klebers vor dem Aufbringen der Platte stellte sich als ungeeignet heraus, da es den satten Kontakt zwischen Kleber und Glasplatte verhinderte. In Abbildung 3.10 sieht man zwei Vorversuche zur Dosierung des Klebers.

Positionieren der Glasplatte Die Glasplatte wurde mit Hilfe eines Laufkrans über den Richttisch gehoben und positioniert.

Erste Trocknungsphase und Abheben der Glasplatte Während der Aushärtungsphase von 45 Minuten wurde die Platte an den Rändern mit auf Holzbalken liegenden Metallplatten belastet, um für den nötigen Anpressdruck zu sorgen.

Die Glasplatte wurde für die weiteren Arbeitsschritte abgehoben und zwischengelagert.

Auftragen des Klebers auf die beiden inneren Rippen Analog zur Vorgangsweise bei den äußeren Rippen wurden die inneren Rippen verklebt. Nach einer zweiten Aushärtungsphase wurden die Platten gelagert.

Anbringen der Messmittel und Einbau in das Statikprüffeld Vor dem Einbau der Platten in das Statikprüffeld wurden die Messmittel nach Abschnitt 3.3.4 angebracht.

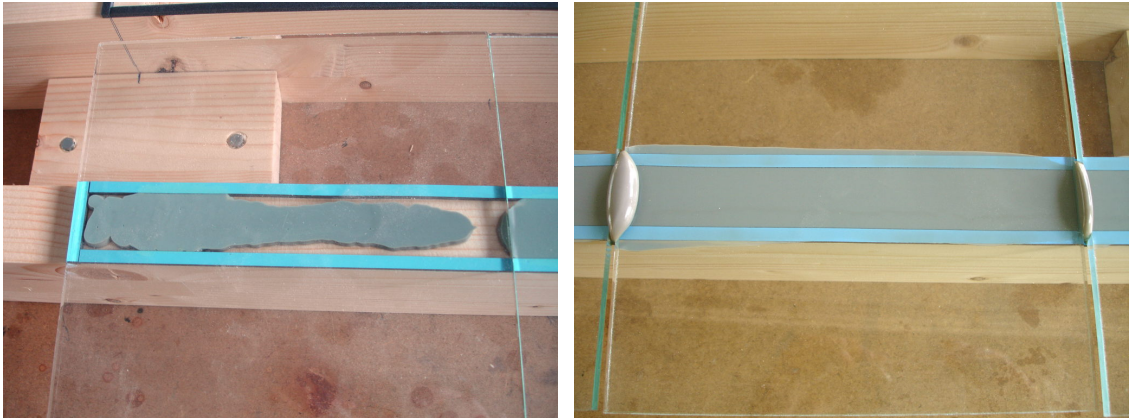


Abbildung 3.10.: Vorversuche zum Auftragen des Klebers

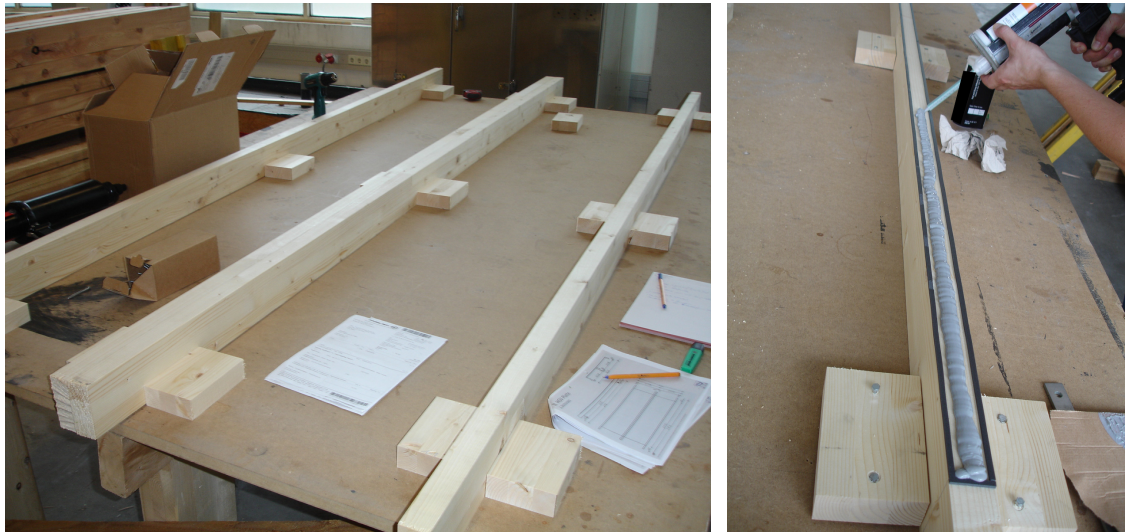


Abbildung 3.11.: Herstellung der Probekörper — Richttisch (a) und Auftragen des Klebers (b)

3.3.4. Verwendete Messmittel und deren Anordnung

Die Anordnung der *Messmittel* ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Im folgenden werden die verwendeten Messmittel aufgelistet und beschrieben:

Dehnmessstreifen (DMS)

Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM)

Typ K-LY41-6/120-2-0.5M

Kleber HBM Z 70

Für die Anbringung der DMS am Glas (Abbildung 3.13 (a)) wurden zuerst die Positionen eingemessen und markiert. Danach musste das Glas gründlich mit HBM®RMS1 gereinigt werden. Die DMS wurden manuell auf dem Kleber positioniert und mit der Hand angepresst. Als Trennfläche diente ein Teflonstreifen. Ähnlich wurde bei der Anbringung der DMS an der Unterseite der Holzrippen verfahren (Abbildung 3.13 (b)).

Mit den DMS an der Oberseite des Glases sollte die Amplitude der Normalspannungen gemessen werden, um daraus den Verlauf der Normalspannungen über den Mittelquerschnitt ermitteln zu können. Mit diesem Verlauf sollte auch die Annahme der mitwirkenden Plattenbreite überprüft werden.

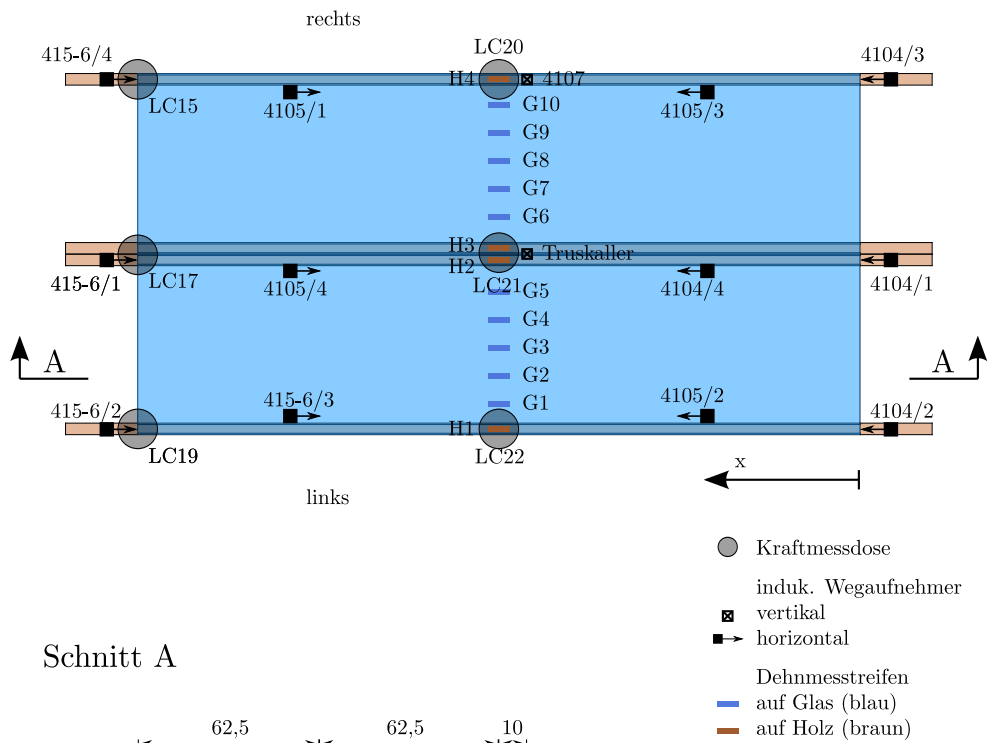
Die DMS an den Holzrippen nahmen die Dehnungen auf der Unterseite der Holzrippen auf. Diese sind jedoch durch lokale Unstetigkeiten wie Äste beeinflusst und haben daher beschränkte Aussagekraft.

Induktive Wegaufnehmer Die Wegaufnehmer wurden auf einem kleinen Holzsockel mit Metallklemmen montiert, der wiederum am Vorholz (Vorschubbewehrung) mit den Holzrippen an den entsprechenden Stellen verschraubt wurde (Abbildung 3.14a). In den Viertelpunkten wurde als Angriffspunkt für die Messung der Relativverschiebung zwischen Glas und Holz auf das Glas ein Holzblock geklebt (Abbildung 3.14b).

Mit diesen Messungen konnte die Relativverschiebung in den Auflagern und in den Viertelpunkten festgestellt werden. Damit ließen sich die Schubspannungen in der Klebefuge überprüfen.

Außerdem wurde mit zwei Wegaufnehmern die Durchbiegung in Plattenmitte gemessen; einmal bei den mittleren Rippen, einmal bei der rechten Rippe (Abbildung 3.12 oben).

Kraftmessdosen (KMD) Um den Kraftfluss im Plattenbalken zu kontrollieren, wurden bei der Lasteinleitung (siehe Abschnitt 3.3.5) und bei einer Auflagerseite Kraftmessdosen dazwischengeschaltet. So hätten eventuell auftretende Kraftumlagerungen zwischen den Auflagern und unter den Rippen beobachtet werden können.



Schnitt A

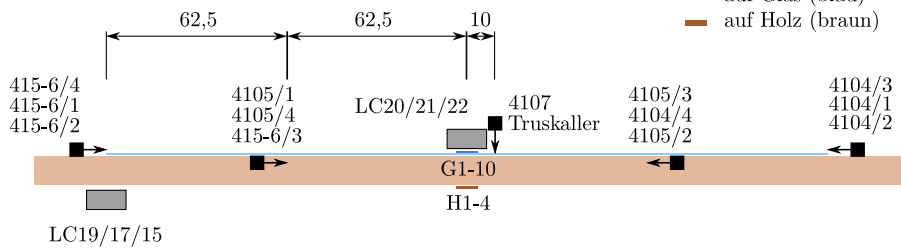


Abbildung 3.12.: Anordnung der Messmittel

Hydraulische Presse Über die hydraulische Presse (vgl. 3.3.5.1) des Statikprüffeldes wurde die Kraft in die Kraftmessdosen eingeleitet. Gleichzeitig wurden dabei die aufgewendete Kraft F_{zyl} und der Weg des Zylinders w_{zyl} aufgezeichnet.

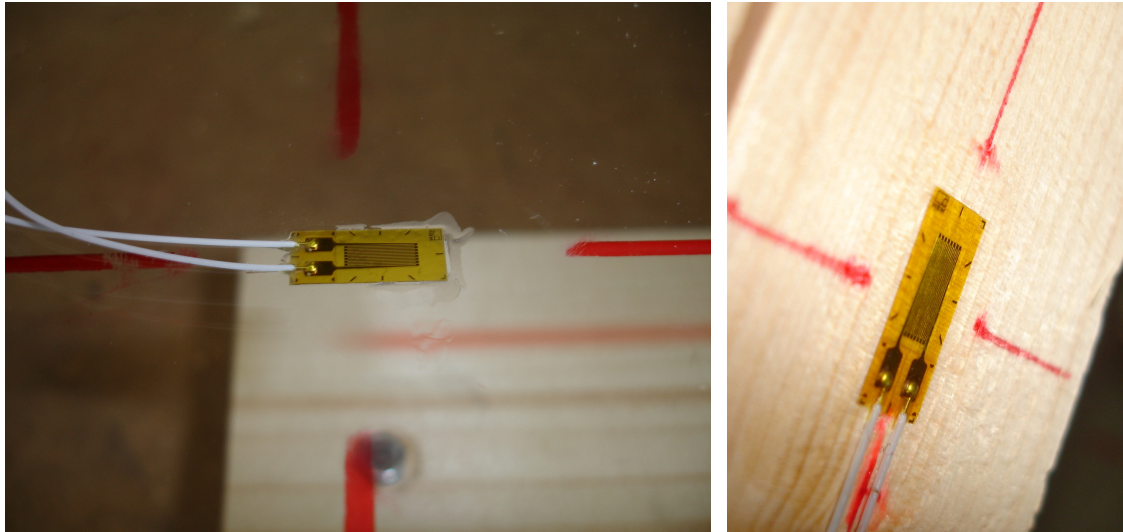


Abbildung 3.13.: Dehnungsmessstreifen auf Glas (a) und auf Holz (b)



Abbildung 3.14.: Induktive Wegaufnehmer beim Auflager (a) und in den Viertel-Punkten (b)

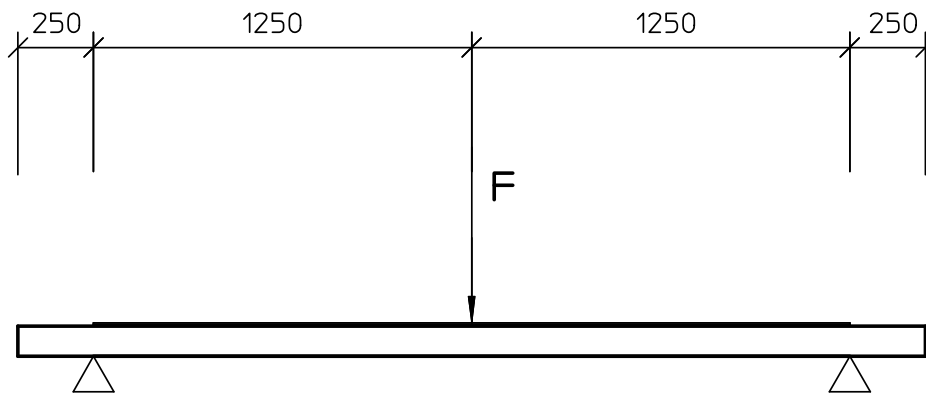


Abbildung 3.15.: Versuchsanordnung

3.3.5. Versuchsdurchführung und Versagensarten

Abbildungen 3.15 und 3.16 zeigen die Versuchsanordnung in der Presse.

3.3.5.1. Lagerung und Kräfteinleitung

Die Kraft aus dem Zylinder der Presse wurde über einen Stahlträger mit I-Profil in drei Kraftmessdosen und über Holzklötze mit einer Dicke von 3 cm und der Faserrichtung parallel zur Krafrichtung in den Plattenbalken eingeleitet (Abbildung 3.17 (a)). Die Platte war an beiden Seiten gelenkig gelagert — einerseits auf einem gelenkigen Linienlager, andererseits auf den Kraftmessdosen und Ausgleichsplatten aus Holz (Abbildung 3.17 (b)).

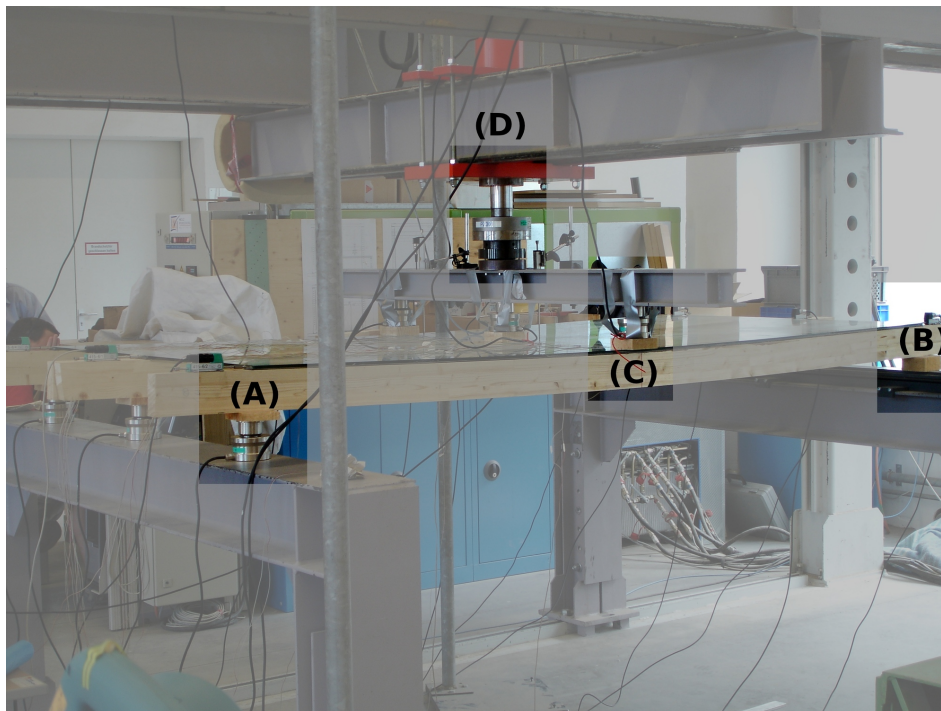


Abbildung 3.16.: Versuchsanordnung: Auflager mit KMD (A), gegenüberliegendes Auflager (B), Lasteinleitung über KMD und Holzstück (C) und Zylinder der Presse (D)

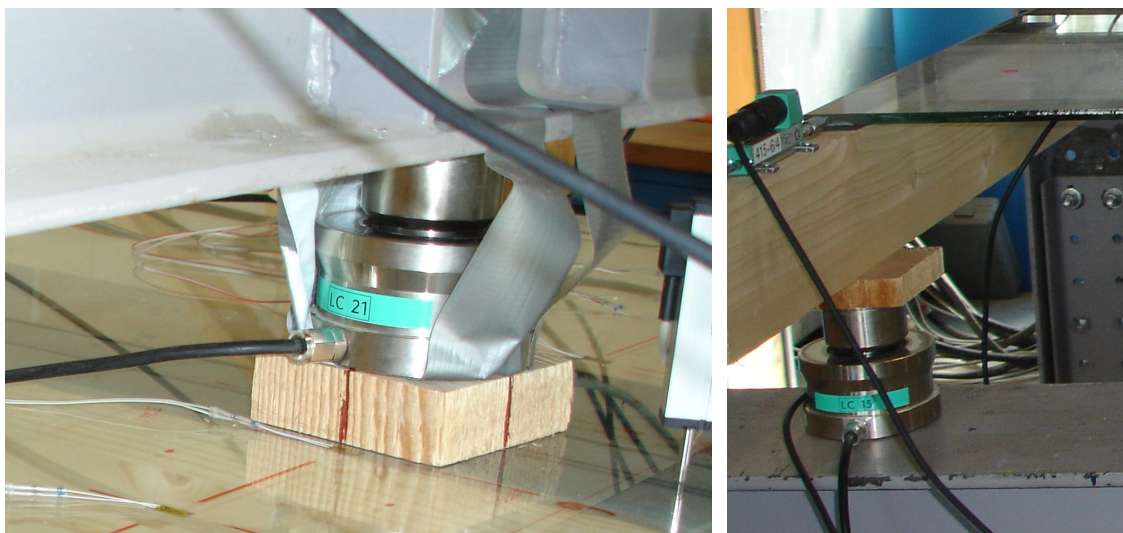


Abbildung 3.17.: Versuchsanordnung: Krafteinleitung über KMD in Feldmitte (a), Auflager mit KMD (b)

3.3.5.2. Versuchsabläufe

Die Platten wurden in folgender Reihenfolge abgedrückt: V, I, II, III, IV.

Die Steuerung der Versuche erfolgte über den Zylinderweg. Auf den folgenden Seiten werden die Abläufe der Messergebnisse der einzelnen Versuche in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Abbildung 3.18 zeigt Kraft-Zeit (linke Ordinate) bzw. Weg-Zeit Diagramme (rechte Ordinate).

Insbesondere bei Platte V (vgl. Abbildung 3.18) wurde am Plateau zwischen 200 s und 800 s das kurzzeitige Kriechverhalten des Klebers deutlich. Platte I und II wurden linear bis zum Bruch belastet. Platte III wurde nach [DIN96] zyklisch belastet. Bei Probe IV gab es technische Probleme im Prüfsystem. Es kam zu einer nicht normgemäßen zyklischen Belastung.

Die Lasten F_{max} , bei denen die Platten das erste Mal versagen, sind in Tabelle 3.6 ersichtlich.

Die Diagramme 3.19 und 3.20 zeigen die Mittelwerte für Dehnung bzw. Relativverschiebung in Abhängigkeit der Zeit. Zusätzlich wurde für eine bessere Vergleichbarkeit der Diagramme auf der rechten Ordinate die Kraft aufgetragen.

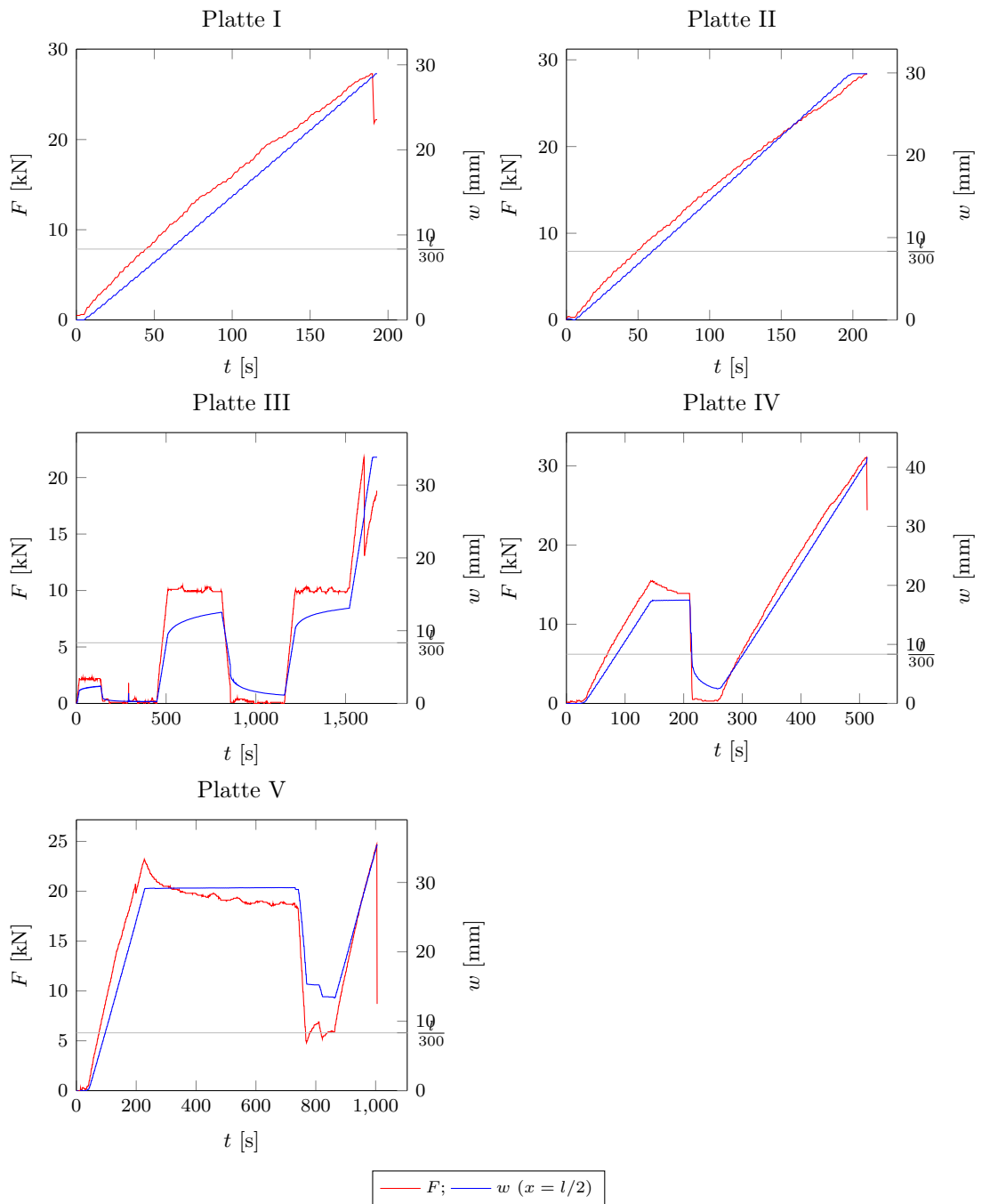


Abbildung 3.18.: Durchbiegung w in Feldmitte und einwirkende Kraft F in Abhängigkeit der Zeit t

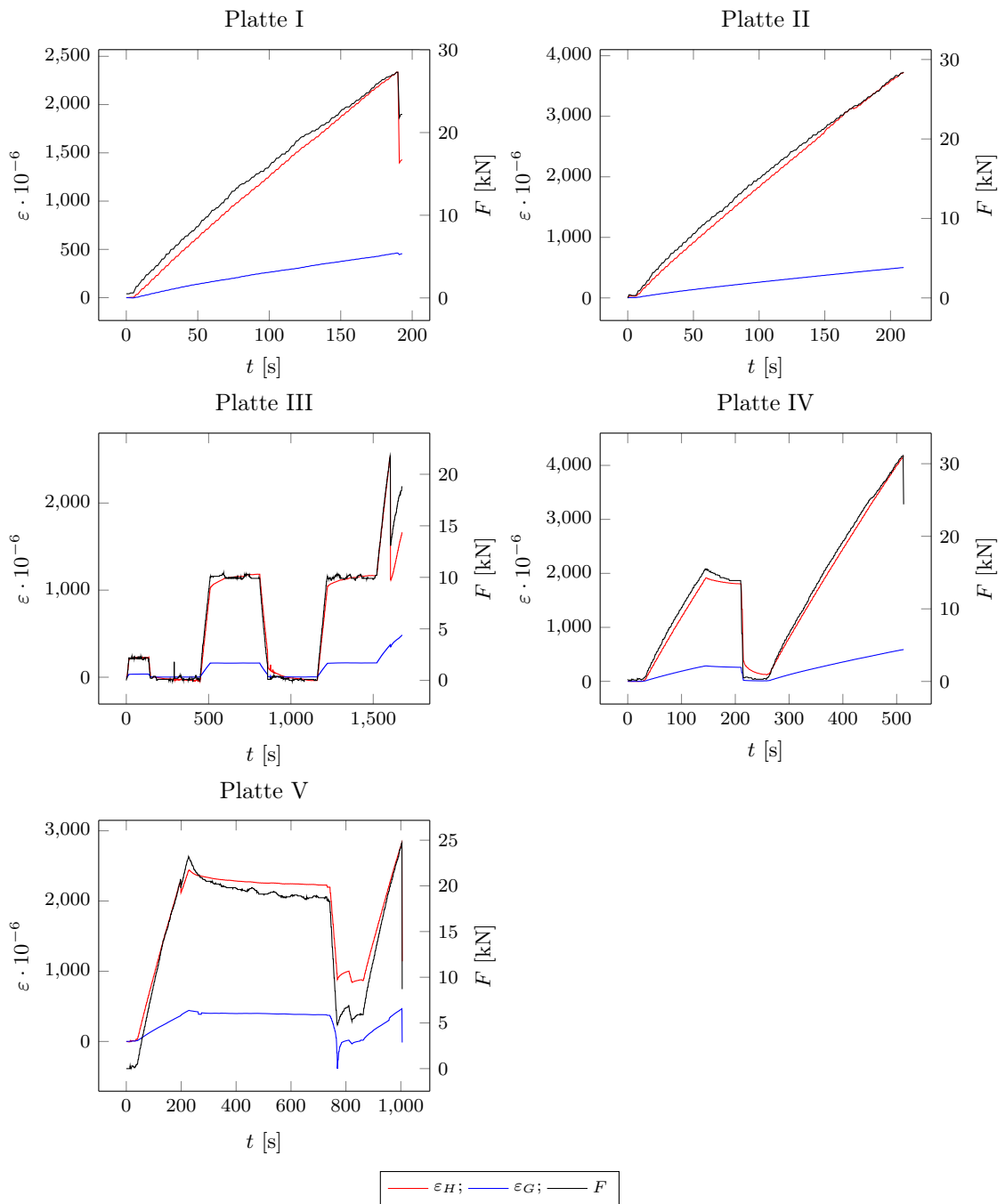


Abbildung 3.19.: Mittlere Dehnung im Glas ε_G und Holz ε_H in Feldmitte in Abhängigkeit der Zeit

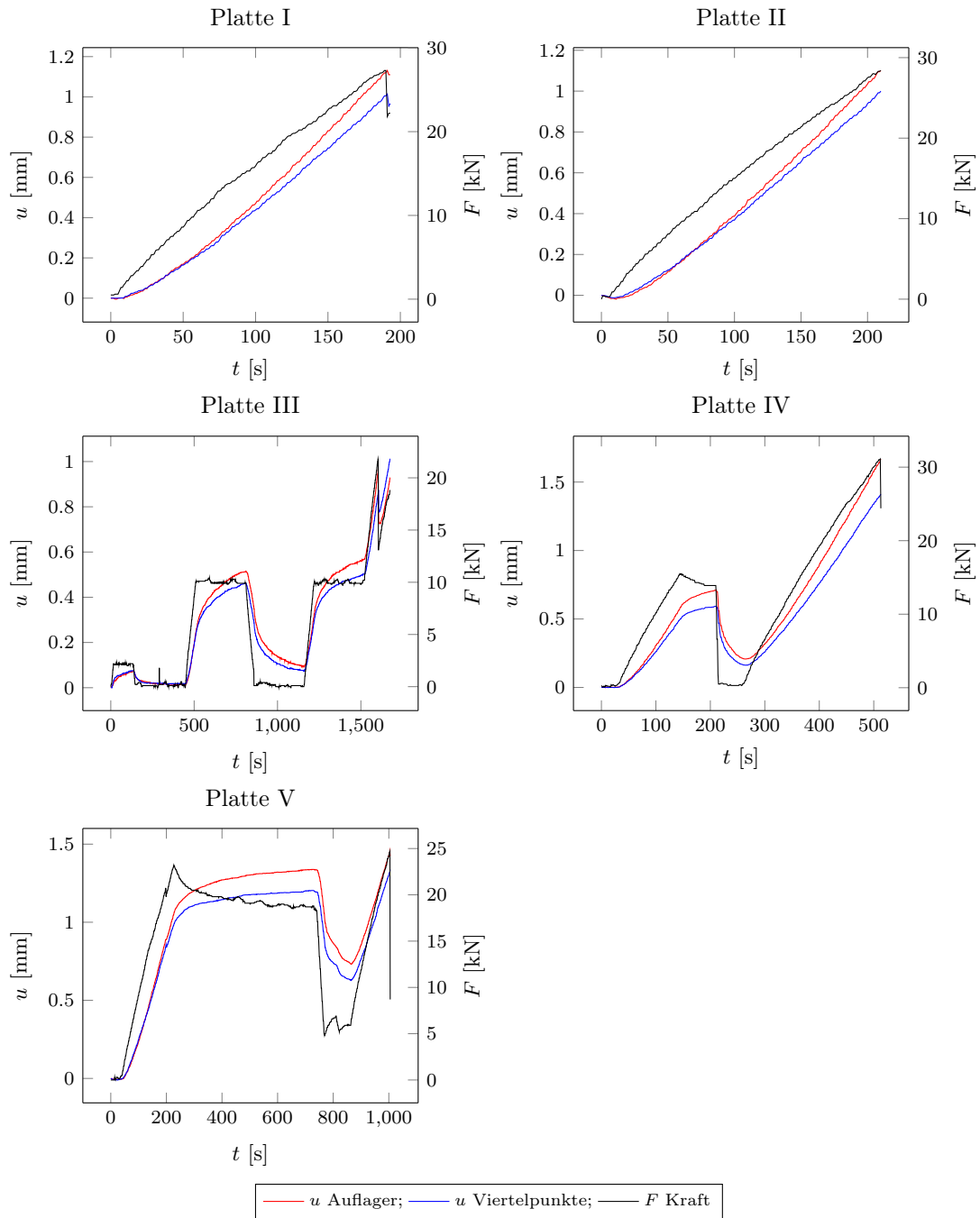


Abbildung 3.20.: Relativverschiebung Glas/Holz am Ende der Platte und in den Viertelpunkten in Abhängigkeit der Zeit



Abbildung 3.21.: Versagen der Platte I

3.3.5.3. Versagensarten

Bei Platte I wurde Schubversagen in einer hölzernen Rippe festgestellt. Als Ausgangspunkt des Versagens wird ein größerer Ast (Abbildung 3.21) vermutet.

Bei Platte II trat ebenfalls Schubversagen in einer hölzernen Rippe ein (Abbildung 3.22)

Bei Platte III, welche einer zyklischen Belastung unterzogen wurde, trat zunächst Versagen in der Glasscheibe ein. Nach dem Glasbruch wurde die Last weiter gesteigert, bis es schließlich zum Biegezugversagen in einer Holzrippe kam. (Abbildung 3.23 bis Abbildung 3.26).

In Abbildung 3.25 und 3.25 lässt sich der Lastausbreitungswinkel entlang der Bruchlinien des Glases erkennen. Beim Auflager wurde ein Winkel von 37° zwischen der Bruchlinie und der Längsachse gemessen.

Bei Platte IV trat infolge der biegeweicheren Holzrippen eine starke Krümmung in der Glasscheibe im Lasteinleitungsbereich auf. Die Glasscheibe versagte infolge Querkzug über die gesamte Breite der Glasplatte (Abbildung 3.27).

Bei Platte V trat infolge eines größeren Astes abermals Schubversagen in einer Rippe ein (Abbildung 3.28).

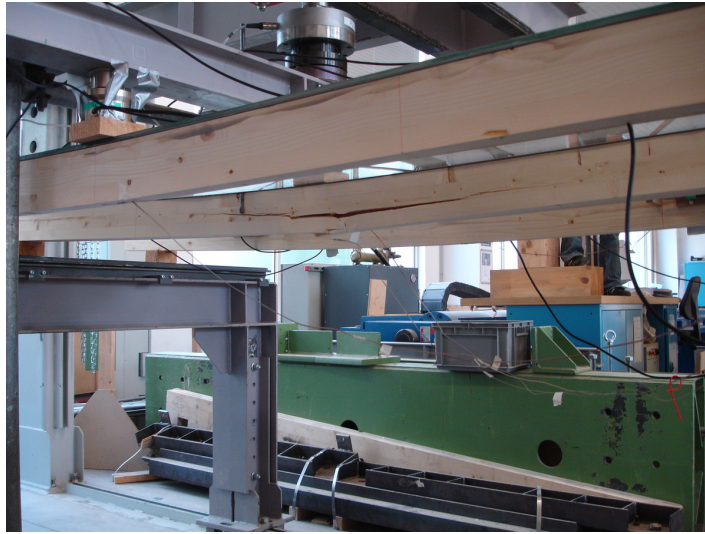


Abbildung 3.22.: Versagen der Platte II

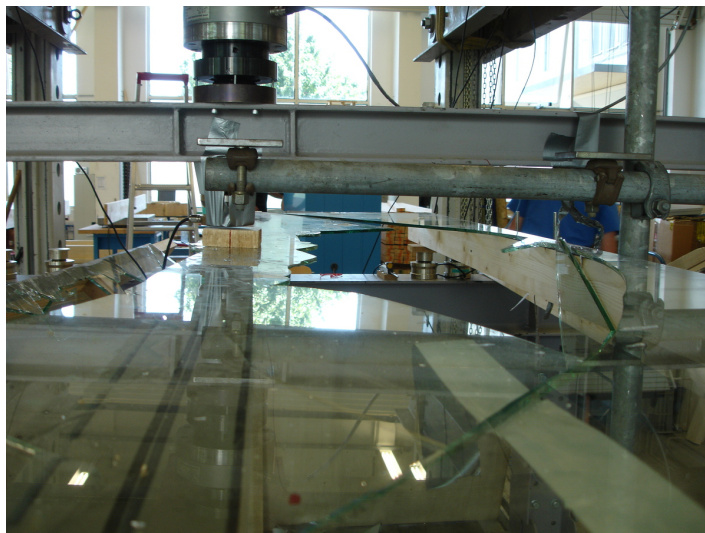


Abbildung 3.23.: Versagen der Platte III

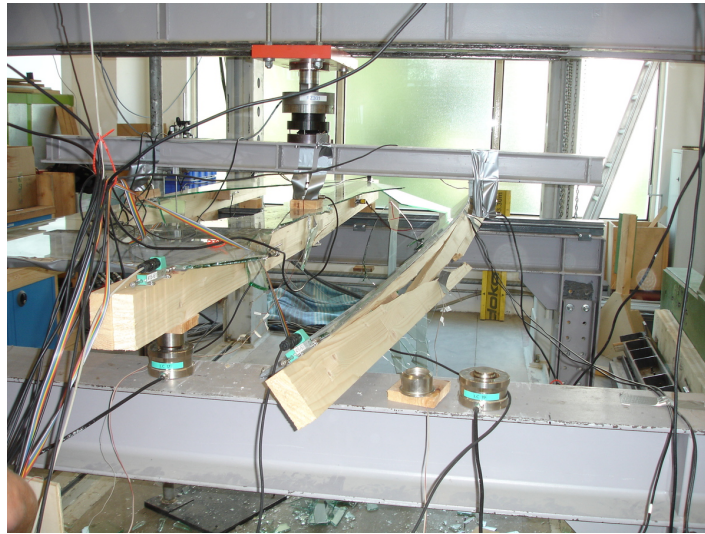


Abbildung 3.24.: Platte III: Biegezugversagen im Holz durch weitere Laststeigerung nach erstmaligem Glasversagen

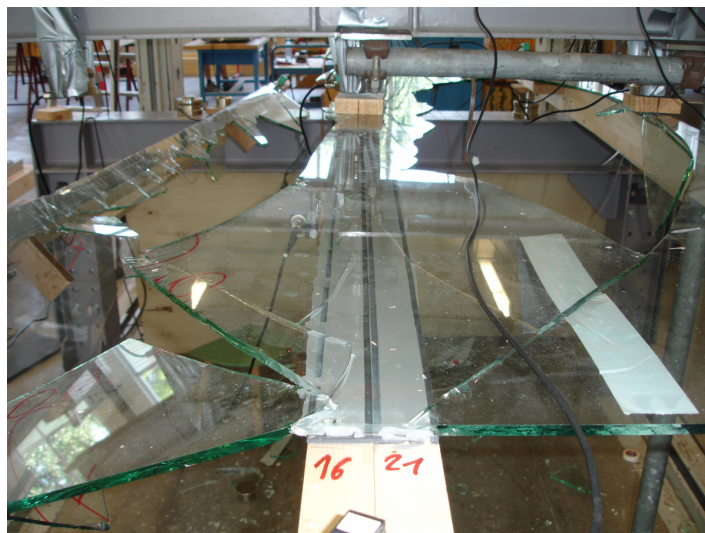


Abbildung 3.25.: Platte III: Lastausbreitungswinkel von etwa 37°



Abbildung 3.26.: Platte III: Schubversagen im Glas mit einem Lastausbreitungswinkel von etwa 37°

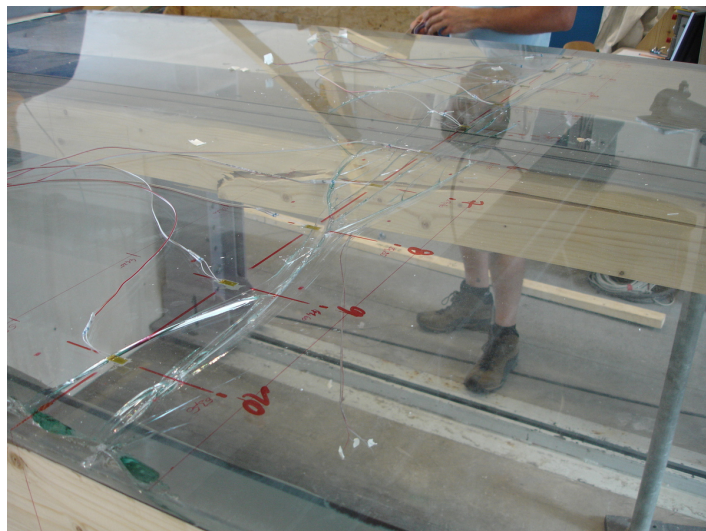


Abbildung 3.27.: Versagen der Platte IV



Abbildung 3.28.: Versagen der Platte V

Tabelle 3.5.: Bei weiteren Analysen betrachtete Zeitabschnitte der Versuche (vgl. 3.18)

Versuch	von t_0 s	$t(F_{max})$ s
I	0	190
II	0	205
III	1158	1676
IV	260	512
V	0	230

Tabelle 3.6.: Kraft, Durchbiegung und Biegesteifigkeit bei $l/300$ und F_{max}

Versuch	$F(w = \frac{l}{300})$ kN	F_{max} kN	$w(F_{max})$ mm	$EI(\frac{l}{300})$ 10^{11} Nmm ²	$EI(F_{max})$ 10^{11} Nmm ²
I	9,09	27,24	31,32	3,554	2,831
II	8,92	28,45	34,43	3,487	2,690
III	8,23	22,40	27,24	3,216	2,676
IV	7,86	31,21	42,54	3,070	2,388
V	7,80	23,02	31,55	3,047	2,375
Mittel	8,38	26,46	33,42	3,275	2,592
σ	0,60	3,72	5,71	0,235	0,202

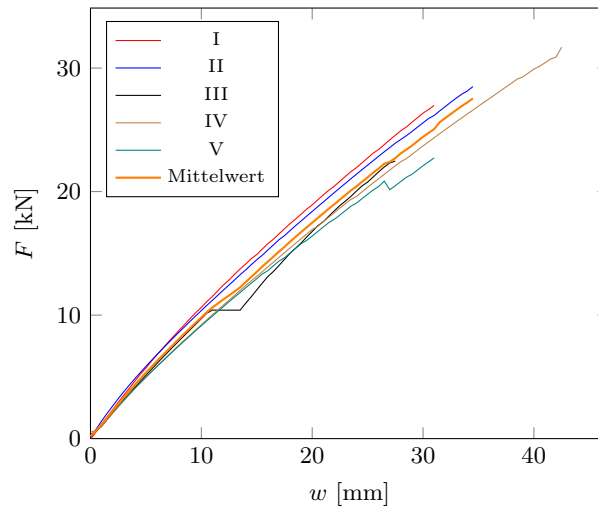


Abbildung 3.29.: Kraft-Weg Diagramm der ausgewählten Versuchsabschnitte und mittlerer Verlauf

3.3.6. Auswertung der Experimente

Für die weiteren Analysen der Daten — Vergleich verschiedener Kennwerte über den Versuchsablauf — wurden jene Teile des Versuchsablaufs ausgewählt, in denen die Platte linear bis zum Bruch belastet wurde. Eine Ausnahme bildet hier Platte V, bei der der Versuch vor dem Versagen abgebrochen wurde und nicht von Null-Belastung neu gestartet wurde. Hier wurde der erste Anstieg bis zum Plateau ausgewählt. In Tabelle 3.5 sind die verwendeten Zeitabschnitte aufgelistet (siehe auch Abbildung 3.18).

Die Daten wurden mit einem Programm für Tabellenkalkulation verarbeitet. Um aussagekräftige Mittelwerte in bestimmten Punkten (z.B. $l/300$) bilden zu können, mussten die Kurven geglättet und die Verformungen durch Vorbelastungen subtrahiert werden. Die Glättung konnte mittels kubischer Spline erreicht werden. Die Werte wurden für eine Schrittweite von $\Delta w = 0,5 \text{ mm}$ berechnet.

3.3.6.1. Durchbiegung und Kraft

Tabelle 3.6 fasst die Kennwerte des Kraft-Weg-Diagramms (Abbildung 3.29) zusammen. Dabei stellt $EI(\frac{l}{300})$ den Sekantenmodul für den Bereich von $w = 0$ bis $w = \frac{l}{300}$ dar.

$$EI(\frac{l}{300}) = \frac{1}{48} \cdot \frac{\Delta F \cdot l^3}{\Delta w} \quad (3.3)$$

$EI(F_{max})$ entspricht dem Sekantenmodul im Bereich zwischen $F = 0 \text{ kN}$ und $F = F_{max}$

3.3.6.2. Lastumlagerung zwischen Streben

Die Diagramme in Abbildung 3.30 zeigen die Differenz der Hälfte der eingetragenen Last in Feldmitte und abgetragenen Last am Auflager in Abhängigkeit der Durchbiegung. Auf der rechten Ordinate ist die

Kraft F_{Zyl} , die im Zylinder gemessen wurde, und die Summe der Messwerte der Kraftmessdosen F_{KMD} aufgetragen, um einen Bezug zum Versuchsablauf herzustellen.

Die Kurven verlaufen parallel zueinander, was darauf schließen lässt, dass kleine Umlagerungen nur zwischen den beiden Auflagern stattfinden, nicht aber von den mittleren Rippen zu den äußeren oder umgekehrt. Außerdem ist die Differenz zwischen Eintrag und Abtrag der Kraft sehr gering und offensichtlich unabhängig von der Höhe der Last.

3.3.6.3. Dehnungen im Glas in Feldmitte

Abbildung 3.31 zeigt die Dehnungen an der Glasoberfläche in Feldmitte in Abhängigkeit der einwirkenden Kraft. Es kann ein eindeutig linearer Zusammenhang festgestellt werden.

Für die Analyse der mitwirkenden Breite wurden die Daten entlang des Mittelquerschnitts aufbereitet. In Abbildung 3.32 (a) sind die gemessenen (und mit den Materialparametern multiplizierten) Werte dargestellt. Mittels kubischer Splines konnte ein Verlauf über die Plattenbreite angenähert werden (Abbildung 3.32 (b)).

Da die DMS beim ersten Versuch (Platte IV) scheinbar zu nahe an den Lasteinbringungspunkten angebracht wurden, liegen die Werte weit außerhalb des Mittels. Um eine Verzerrung der Ergebnisse zu vermeiden, wurde dieser Versuch bei den weiteren Betrachtungen, die die Dehnungen im Glas betreffen außer acht gelassen.

Um die Randspannungen zu erhalten, wurden die Dehnungen mit dem E-Modul $E_G = 700000 \text{ N/mm}^2$ multipliziert und in Abbildung 3.33 dargestellt.

3.3.6.4. Dehnungen im Holz in Feldmitte

Die Resultate aus dieser Messung variieren sehr stark, wie der Vergleich der Dehnungen bei $F = 8,5 \text{ kN}$ in Abbildung 3.35 zeigt. Gründe für diese Abweichungen können Unstetigkeiten im Holz (Äste o.ä.) im Einflußbereich der DMS oder ungenügender Verbund der DMS mit dem Werkstoff sein. Gewisse Trends lassen sich dennoch aus den Daten ablesen.

Die Beziehung zwischen einwirkender Kraft und den resultierenden Dehnungen an der Unterseite der Holzstreben stellt sich linear dar (Abbildung 3.34).

Der Vergleich der Dehnungen bei gleicher Kraft in Abbildung 3.35 zeigt außerdem, dass zufolge der unterschiedlichen kleineren oder größeren E-Moduln die Dehnungen entsprechend größer oder kleiner ausfallen. Wie in Tabelle 3.4 zu sehen ist, wurden die Platten nach der Größe des mittleren E-Moduls nummeriert. Platte I hat den durchschnittlich höchsten E-Modul mit der größten Abweichung vom Mittelwert $\overline{E_{gl0}} = 9041 \text{ N/mm}^2$ und hat auch in obiger Abbildung die auffälligste Abweichung (siehe auch Tabelle 3.7).

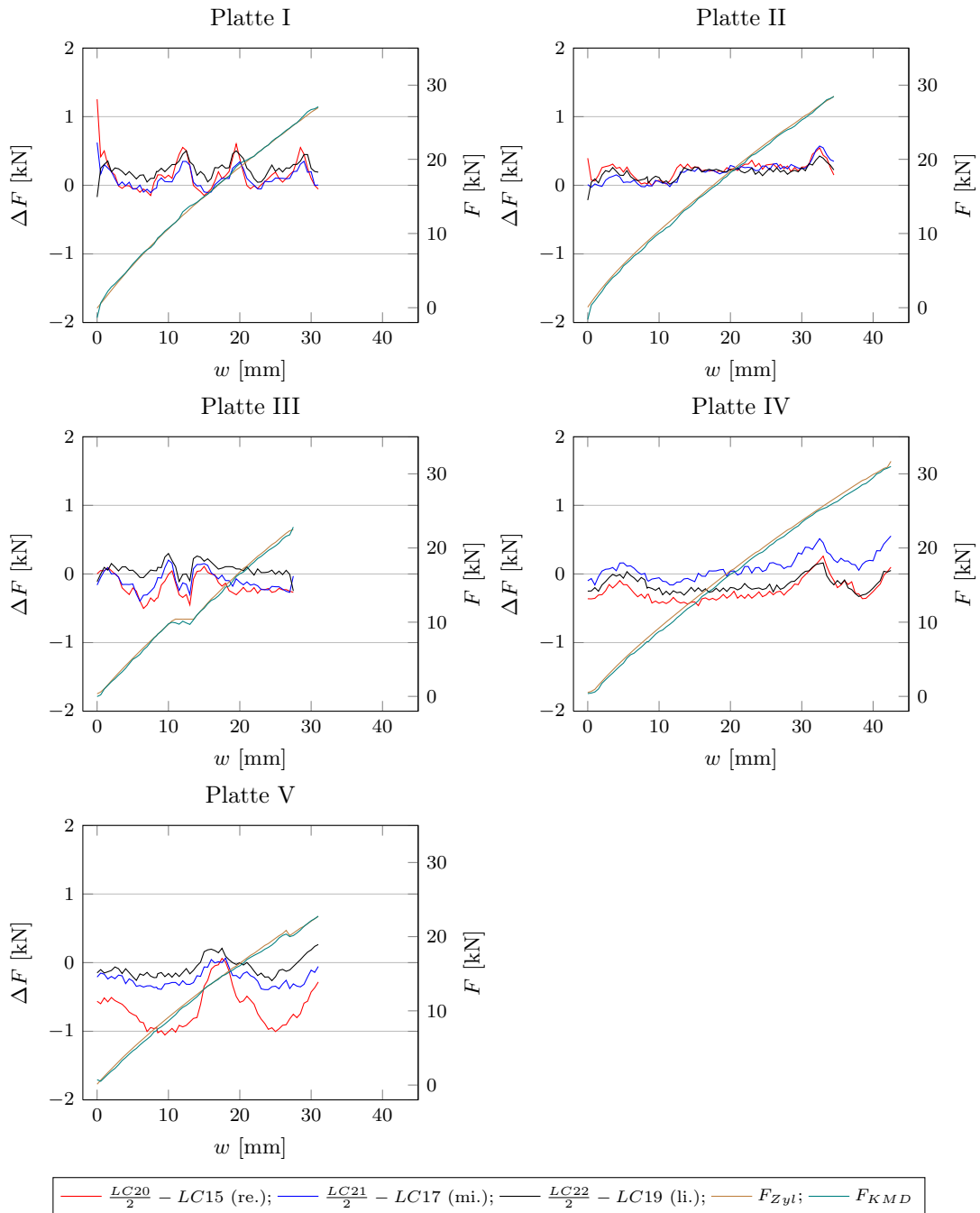


Abbildung 3.30.: Differenz zwischen Lasteintrag (Mitte) und Lastaustrag (Auflager) der einzelnen Rippen.

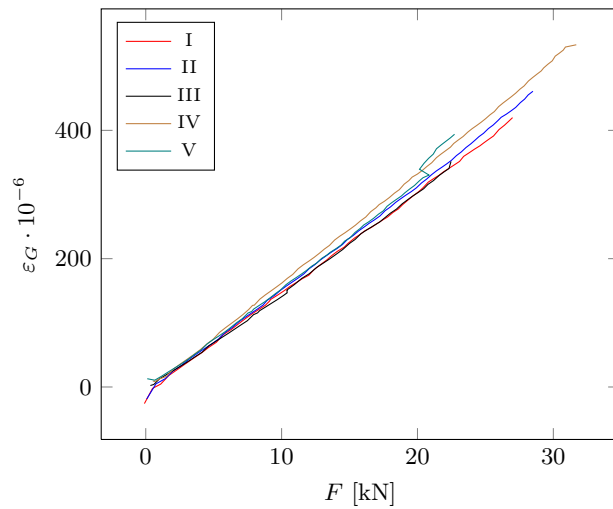


Abbildung 3.31.: Verlauf der Dehnungen in der Glasoberfläche während des Versuchs — Mittelwert von DMS G1 bis DMS G10

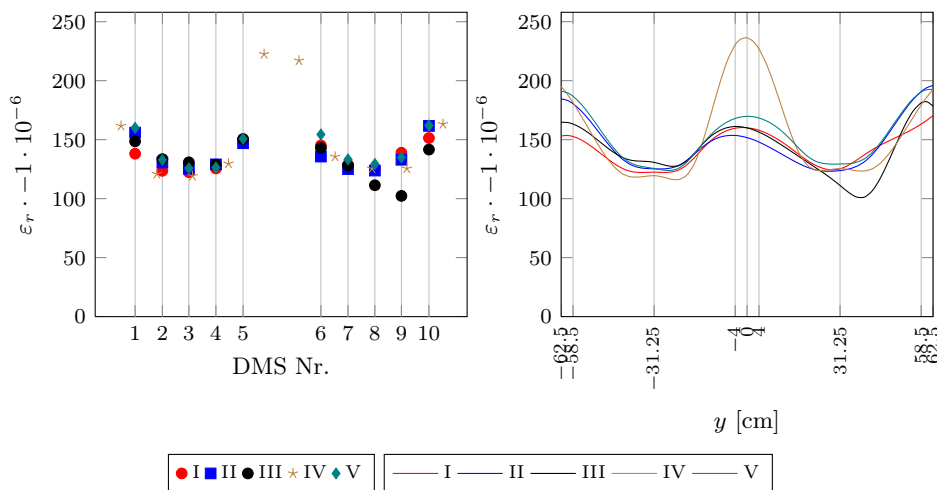


Abbildung 3.32.: Dehnungen in der Glasoberfläche — Gemessenen Werte (a) berechneter Verlauf im Querschnitt in Feldmitte (b) bei $F = 8,5 \text{ kN}$

Tabelle 3.7.: Mittelwerte und Abweichungen der Dehnungen im Holz bei $F = 8,5 \text{ kN}$

Platte Nr.	$\bar{\varepsilon}_i$ 10^{-6}	$\varepsilon_{max,i}$ 10^{-6}	$\frac{\bar{\varepsilon}_i - \bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}}$ %
I	592,72	795,98	-28,14
II	908,67	1263,31	10,17
III	821,09	950,92	-0,45
IV	992,08	1014,81	20,28
V	809,51	971,35	-1,86
Mittelw. $\bar{\varepsilon}$	824,82		0

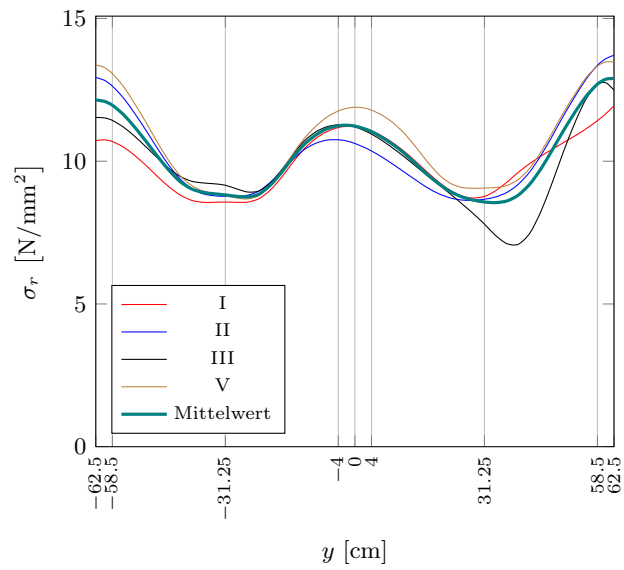


Abbildung 3.33.: Berechnete Randspannungen zufolge Dehnungen im Glas bei $F = 8,5 \text{ kN}$

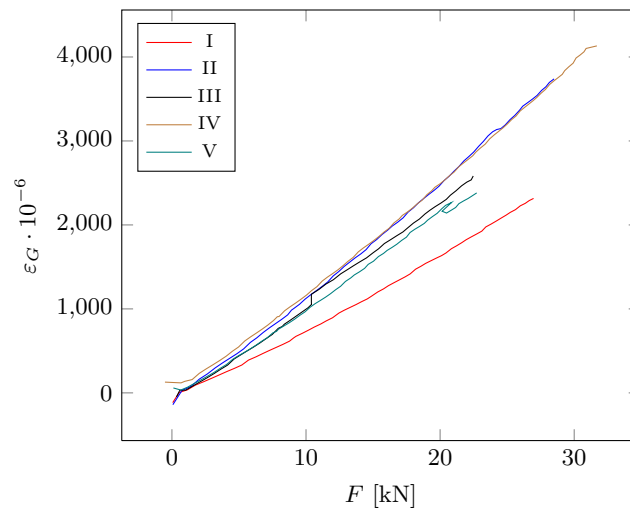


Abbildung 3.34.: Verlauf der Dehnungen an der Unterseite der Holzstreben in Feldmitte — Mittelwert von DMS H1 bis DMS H4

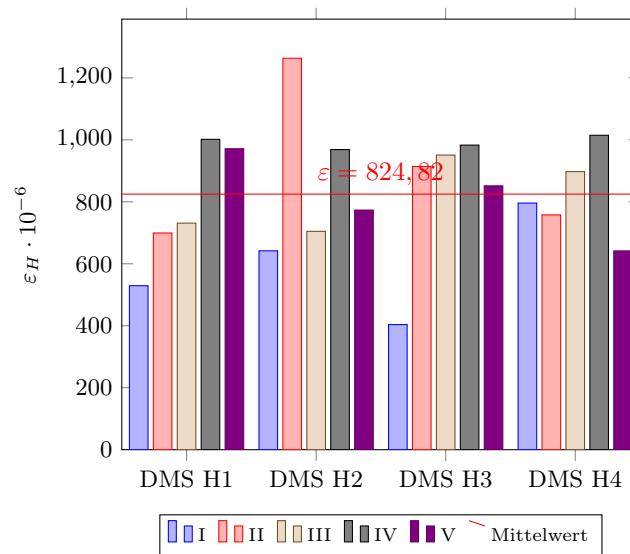


Abbildung 3.35.: Dehnungen an der Unterseite der Holzstreben bei einer Last von $F = 8,5 \text{ kN}$

Tabelle 3.8.: Verschiebungen Glas gegen Holz u zufolge Schub bei $F = 8,5 \text{ kN}$

Versuch Nr.	Auflager			Viertel-Punkte		
	Messwert mm	Korrektur Werte mm	korr. Wert mm	Messwert mm	Korrektur Werte mm	korr. Wert mm
I	0,159	0,000	0,159	0,158	0,000	0,158
II	0,113	0,000	0,113	0,126	0,000	0,126
III	0,273	0,088	0,184	0,253	0,077	0,176
IV	0,372	0,220	0,152	0,315	0,170	0,145
V	0,191	0,000	0,191	0,202	0,000	0,202
Mittelwert	0,222		0,160	0,211		0,162

3.3.6.5. Relativverschiebung Glas-Holz

Die Abbildungen 3.36 und 3.37 stellen den Zusammenhang zwischen der Zylinderkraft F und der Relativverschiebung u zwischen Glas und Holz dar. Es zeigt sich ein überproportionaler Verlauf (siehe auch Abbildung 3.20).

Für den Vergleich der Relativverschiebungen bei $F = 8,5 \text{ kN}$ (Abbildung 3.38) wurde von den gemessenen Werten die Anfangsverformung u_{init} abgezogen.

Der Grund für den nicht vorhandenen aber erwarteten Größenunterschied der Relativverschiebungen in den Auflagern bzw. Viertelpunkten wird vom Autor in der nicht idealen Anbringung der Induktiven Wegaufnehmer bei den Viertelpunkten (siehe Abbildung 3.14(b)) vermutet.

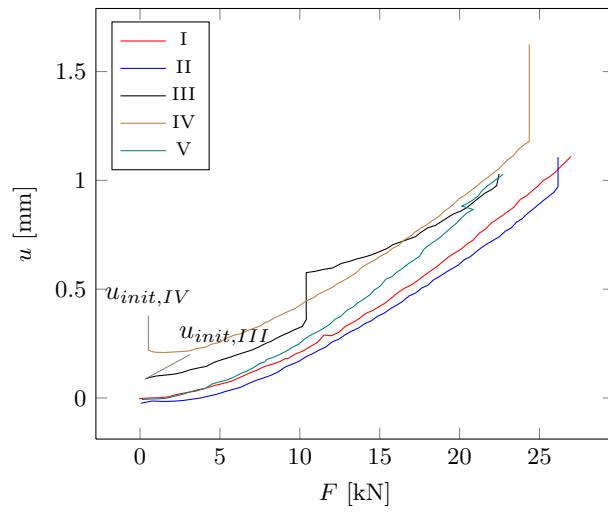


Abbildung 3.36.: Verlauf der Relativverschiebung im Auflagerbereich

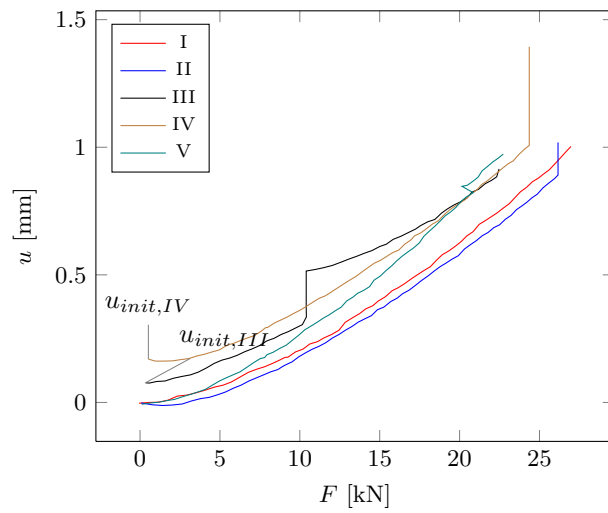


Abbildung 3.37.: Verlauf der Relativverschiebung in den Viertelpunkten der Platte

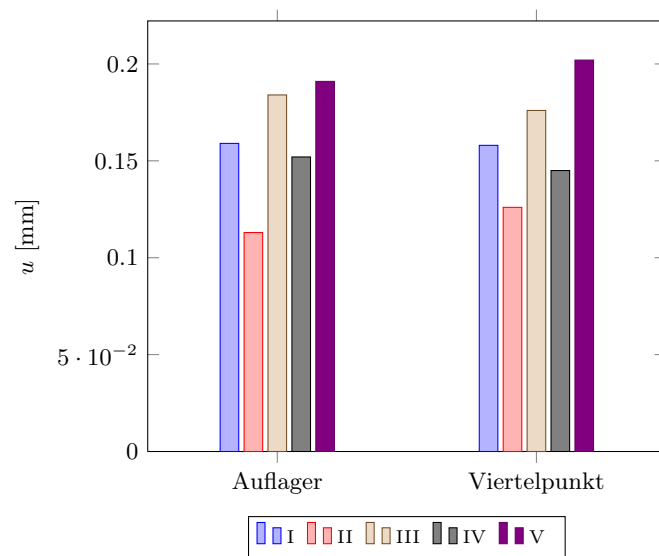


Abbildung 3.38.: Vergleich Relativverschiebung von Holz und Glas bei $F = 8,5$ kN bei den Auflager- und den Viertel-Punkten

4. Vergleich der Experimente mit den Berechnungsmodellen

Ziel des Vergleichs der Berechnungsmodelle und der experimentellen Untersuchungen ist die Überprüfung der Anwendbarkeit der Methoden und in weiterer Folge deren Näherungspotential.

Die meisten Messwerte wurden bei einer einwirkenden Kraft von $F = 8,5 \text{ kN}$ verglichen, da die resultierende Durchbiegung in den Versuchen nahe bei $l/300 = 8,33 \text{ mm}$, dem Gebrauchstauglichkeitskriterium, liegt.

4.1. Durchbiegung w und Biegesteifigkeit des Systems

Durchbiegung Bei dem Vergleich der Beziehungen zwischen einwirkender Kraft und Durchbiegung (Abbildung 4.1) zeigt sich eine gute Übereinstimmung und die berechneten Werte liegen bis zum Bruch auf der „sicheren Seite“, das heißt bei gleicher Kraft ergibt sich eine größere Durchbiegung (Tabelle 4.1).

Biegesteifigkeit Die Biegesteifigkeiten in Tabelle 4.2 wurden analog zu Abschnitt 3.3.6.1 als Sekantenmoduln berechnet. Diese wurden für drei Bereiche bestimmt:

- von $w = 0$ bis $l/300$
- von $F(l/300)$ bis F_{max}
- von $F = 0$ bis F_{max}

Tabelle 4.1.: Vergleich der Durchbiegung in Feldmitte bei $F = 8,5 \text{ kN}$ mit den Berechnungen

	w
	mm
I	7,72
II	7,86
III	8,62
IV	9,12
V	9,19
Mittelwert	8,50
Gamma	11,53
Sa.	11,89

Tabelle 4.2.: Vergleich der Biegesteifigkeit des Systems EI bei $\frac{l}{300}$, im Bereich $\frac{l}{300}$ bis F_{max} und im Bereich 0 bis F_{max} mit den Berechnungen und die Abweichungen der Rechenmodelle von diesen Biegesteifigkeiten

	EI bei	$w = \frac{l}{300}$	$w = \frac{l}{300} - F_{max}$	F_{max}
Versuche	10^{-11} Nmm^2	3,275	2,360	2,592
Gamma	2,400	26,72%	-1,70%	7,41%
Sa.	2,327	28,94%	1,38%	10,22%

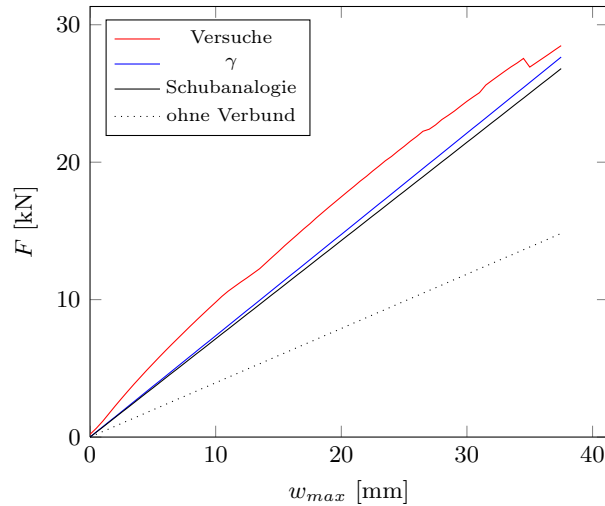


Abbildung 4.1.: Kraft-Weg Diagramm für den Mittelwert der Versuche, das Gamma-Verfahren, das Schubanalogie-Verfahren und unter Annahme losen Verbunds

Wie auch in Abbildung 4.1 zu sehen ist, steigt die Kraft-Weg-Kurve der Versuche bis $w = 10$ mm stärker an verläuft danach aber parallel zu den Kurven der Berechnungsmodelle. In diesem Bereich gibt es also eine hohe Übereinstimmung von Berechnungsmodell und Versuchen (Tabelle 4.2: Abweichung < 2%).

4.2. Spannungen

Die Spannungen wurden aus den Verformungen der Abschnitte 3.3.6.4 bis 3.3.6.5 berechnet. Die Spannungen in Holz und Glas konnten über das Hookesche Gesetz berechnet werden.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{4.1}$$

Die Schubspannungen ergeben sich aus den Relativverschiebungen zwischen Gals und Holz und den nachfolgenden geometrischen Zusammenhängen.

$$\gamma = \frac{u}{d} \tag{4.2}$$

Gleitung

$$\tau = G_k \cdot \gamma \tag{4.3}$$

Schubspannung

Tabelle 4.3.: Vergleich der Normalspannungen im Querschnitt in Feldmitte und der maximalen Schubspannungen bei $F = 8,5 \text{ kN}$

	σ_G	σ_H	τ_K
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Versuche	-11,87	7,457	0,148
Gamma	-10,69	12,82	0,300
Sa.	-10,92	13,98	0,348

Bei den Berechnungen wurden folgende Materialparameter verwendet.

$$E_G = 70000 \text{ N/mm}^2 \quad [\text{ONB09}]$$

$$E_H = 9041 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Mittelwert aus Versuchen in Kapitel 3.4}$$

$$G_K = 2,0 \text{ N/mm}^2 \quad [\text{Neu11}]$$

Der Vergleich der Spannungen in Tabelle 4.3 zeigt, dass die Ergebnisse aus den Berechnungen der Spannungen im Holz σ_H und die Schubspannung in der Verbundfuge τ_K ebenfalls auf der sicheren Seite sind. Für die oberen Randspannungen im Glas σ_G kommen allerdings zu geringe, das heißt unsichere, Werte zustande. Das kann jedoch durch die Wahl einer geringeren mitwirkenden Plattenbreite angepasst werden (siehe Abschnitt 4.3)

4.3. Mitwirkende Plattenbreite

Zur Überprüfung der ersten Abschätzung in Abschnitt 2.2 können verschiedene Kennwerte — Vergleich der Randspannungen in Glas oder Holz, der Durchbiegung, etc. — herangezogen werden. [Joh05]

In [EN106] wird die Fläche unter dem Verlauf der oberen Randspannungen über die Plattenbreite einer Fläche mit den Seiten $\sigma_{r,max} \times b_{eff}$ gleichgesetzt. Es wird also die reelle Spannungsverteilung einer rechteckigen Spannungsverteilung der Höhe $\sigma_{r,max}$ gegenüber gestellt (Abbildung 2.2):

$$\int \sigma_r dy = \max|\sigma_r| \cdot b_{eff} \quad (4.4)$$

Aus dieser Bedingung kann die mitwirkende Breite b_{eff} bestimmt werden.

$$b_{eff} = \frac{\int \sigma_r dy}{\max|\sigma_r|} \quad (4.5)$$

In Abschnitt 3.3.6.3 wurde aus den mittels DMS gemessenen Dehnungen der Glasplatte ein mittlerer Verlauf der Spannungen (Abbildung 3.33) über die Breite der Platte berechnet. Die Flächen unter der Kurve $\int \sigma_r dy$ wurden, wie in Abbildung 4.2 dargestellt, den Streben zugeordnet und als Summenintegral berechnet.

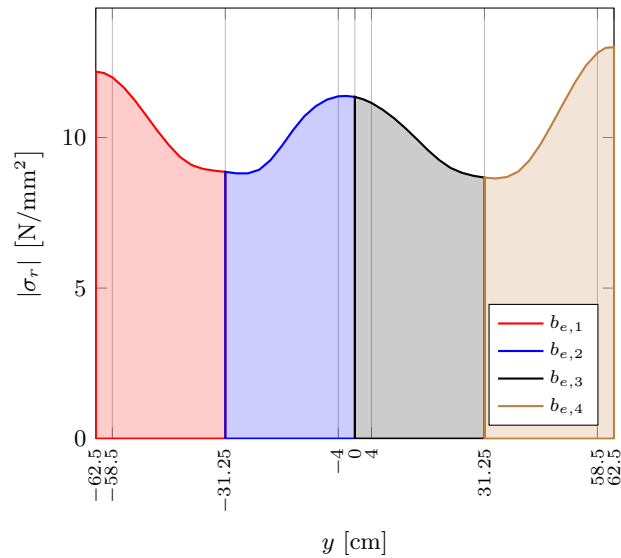


Abbildung 4.2.: Obere Randspannungen σ_r des Glases in Feldmitte quer zur Plattenachse

Tabelle 4.4.: Berechnung der mitwirkenden Plattenbreite b_{eff} aus den oberen Randspannungen σ_r

i	$\sum \sigma_i \cdot \Delta y_i$ kN/cm	b_{eff} cm
1	320,31	27,0
2	311,97	26,3
3	307,13	25,9
4	326,58	27,5
Mittelwert		26,4

4.3.1. Korrektur der mitwirkenden Breite

Abschnitt 2.3.1.4 behandelt den Einfluss der Variation der mitwirkenden Breite auf die Berechnungsergebnisse. Man sieht in Abbildung 2.7, dass sich die Veränderung der mitwirkenden Plattenbreite hauptsächlich auf die Spannungen im Glas auswirken, die wirksame Biegesteifigkeit EI_{eff} (und damit die Durchbiegung w) und die Spannungen im Holz σ_{max} ändern sich aber kaum.

Aus Tabelle 2.3 kann ermittelt werden, dass bei einer Wahl von

$$b_{e,i} = \frac{l_0}{10} \quad \rightarrow \quad \sigma_G = -11,85 \text{ N/mm}^2 \quad (4.6)$$

die Spannungen im Glas sehr gut angenähert (vgl. Tabelle 4.3: $\sigma_G = -11,87 \text{ N/mm}^2$) werden.

4.4. Conclusio

Der Vergleich der Berechnungsverfahren mit den Messungen der Versuche zeigt nur geringe Abweichung. Grundsätzlich wird das System von den Verfahren als zu biegeweich eingeschätzt, das heißt aber, dass die Ergebnisse auf der „sicheren Seite“ liegen. Eine Ausnahme bilden hier die oberen Randspannungen im Glas, die unterschätzt werden.

Durch einen Vergleich der Randspannungen aus Berechnungen mit unterschiedlichen mitwirkenden Plattenbreiten und den Messungen in den Versuchen, wird deshalb die Wahl von $b_{e,i} = l_0/10$ empfohlen.

5. Berechnung und Bemessung von Holz-Glas-Verbundplattenbalken

An dieser Stelle soll das Bemessungsverfahren anhand des Gamma-Verfahrens und des in Abbildung 3.5 dargestellten Probekörpers gezeigt werden. (Siehe auch Abschnitt 2.5.3)

Für dieses Beispiel wurden folgende Annahmen getroffen:

1. Es werden vier Holzrippen in Längsrichtung angeordnet. Zwei am Plattenrand, zwei nebeneinander in Plattenmitte.
2. Es wird eine gleichmäßig verteilte Flächenlast angenommen. Das Eigengewicht der Klebefuge wird vernachlässigt.
3. Die Verbundplatte wird ausschließlich zum vertikalen Lastabtrag herangezogen.
4. Die Nachweisführung bezieht sich auf die Bemessung der Klebefuge.
5. Die größten Spannungen im Verhältnis zur Festigkeit werden durch eine ständig Einwirkung hervorgerufen. Die abgeminderten Federsteifigkeiten für Berechnungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind damit mit jenen für Berechnungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit identisch.

5.1. Material, Geometrie und Einwirkungen

5.1.1. Abmessungen des Plattenbalkens

Plattenlänge	$l = 250 \text{ cm} = 2500 \text{ mm}$
Plattenbreite	$b = 125 \text{ cm} = 1250 \text{ mm}$
Anzahl der Streben	$n_H = 4$

5.1.2. Material und Geometrie

Platte Floatglas 8 mm

Dichte	$\rho_G = 2500 \text{ kg/m}^3 = 2,50 \cdot 10^{-5} \text{ N/mm}^3$	
Elastizitätsmodul	$E_G = 70000 \text{ N/mm}^2$	
Schubmodul	$G_G = 28000 \text{ N/mm}^2$	
Querdehnungszahl	$\nu_G = 0,23$	
Wärmedehnzahl	$\alpha_{T,G} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$	
Breite der Glasplatte	$b_G = b = 1250 \text{ mm}$	
Länge der Glasplatte	$l_G = l = 2500 \text{ mm}$	
Dicke der Glasplatte	$t_G = 8 \text{ mm}$	

Querschnittswerte zufolge mitwirkender Plattenbreite

mitwirkende Plattenbreite	$b_{eff} = 4 \cdot b_{e,i} = 4 \cdot \frac{l_0}{10} = 4 \cdot 2500/10 = 1000 \text{ mm}$	
Querschnittsfläche	$A_G = b_{eff} \cdot h_G = 1000 \cdot 8 = 8000 \text{ mm}^2$	
Dehnsteifigkeit	$EA_G = 70000 \cdot 8000 = 5,6 \cdot 10^8 \text{ N}$	
Trägheitsmoment	$I_G = \frac{b_{eff} \cdot t_G^3}{12} = 1000 \cdot 8^3/12 = 42667 \text{ mm}^4$	
Biegesteifigkeit	$EI_G = 7000 \cdot 42667 = 2,99 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$	

Streben BSH GL 24 h

Dichte	$\rho_{BSH} = 380 \text{ kg/m}^3 = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ N/mm}^3$	
Elastizitätsmodul	$E_H = 11600 \text{ N/mm}^2$	
Schubmodul	$G_H = 720 \text{ N/mm}^2$	
Wärmedehnzahl	$\alpha_{T,H} = 8 \cdot 10^{-6}$	
Quellmaß	$\alpha_{U,H} = 0,01 \text{ } \%/ \% - \Delta \text{HF}$	
Breite einer Strebe	$b_H = 40 \text{ mm}$	
Höhe der Streben	$h_H = 100 \text{ mm}$	
Länge der Streben	$l_H = l = 2500 \text{ mm}$	

Querschnittswerte für gesamten Holzquerschnitt

Querschnittsfläche	$A_{H,ges} = n_H \cdot b_H \cdot h_H = 4 \cdot 40 \cdot 100 = 16000 \text{ mm}^2$	
Trägheitsmoment	$I_H = \frac{n_H \cdot b_H \cdot h_H^3}{12} = 4 \cdot 40 \cdot 100^3/12 = 1,33 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$	

Klebefuge Acrylat

Schubmodul ¹	$G_K =$	2,0 N/mm ²
char. Schubwiderstand ²	$\tau_{K,c} =$	3,034 N/mm ²
Streckgrenze ³	$\varepsilon_{K,max} =$	168 %
Referenztemperatur ⁴	$T_{K,0} =$	20°C
Breite einer Klebefuge	$b_{K,i} =$	30 mm
Breite alle Klebefugen	$b_K = n_H \cdot b_{K,i} = 4 \cdot 30 =$	120 mm
Dicke der Klebefuge	$t_K =$	3 mm

Verbundplattenbalken

Schwerlinienabstand der Teilquerschn. $a = \frac{h_H + t_G}{2} + t_K = (100 + 8)/2 + 3 = 57 \text{ mm}$

5.1.3. Annahmen zu Modifikations-, Teilsicherheits- und Verformungsbeiwerten

Streben BSH GL24h, Nutzungsklasse 1

Deformationsbeiwert (kurz)	$k_{H,def,kurz} = 0,00$
Deformationsbeiwert (lang)	$k_{H,def,lang} = 0,60$

Klebefuge Acrylat ⁵

Modifikationsbeiwert (kurz)	$k_{K,mod,kurz} = 0,90$
Modifikationsbeiwert (lang)	$k_{K,mod,lang} = 0,20$
Deformationsbeiwert (kurz)	$k_{K,def,kurz} = 0,00$
Deformationsbeiwert (lang)	$k_{K,def,lang} = 4,09$
Teilsicherheitsbeiwert	$\gamma_K = 6,0$

Lasten

Teilsicherheitsbeiwert ständig	$\gamma_g = 1,35$
Teilsicherheitsbeiwert veränderlich	$\gamma_q = 1,5$

¹längs = quer; aus Kleinproben der Holzforschung Austria (HFA)

²aus Kleinprobenversuchen der HFA

³aus Kleinprobenversuchen der HFA

⁴Temp. bei Herstellung der Schubverklebung

⁵Die Beiwerte wurden aus [HWK11] übernommen

5.1.4. Einwirkungen

Einsatzgebiet der Platte: klimatisierter Raum.

Ständige Lasten (langzeitig)

Eigengewicht des Plattenbalkens g_P

Veränderliche Lasten (kurzzeitig)

Nutzlast $q = 2,0 \text{ kN/m}^2 = 0,002 \text{ N/mm}^2$

Temperaturbelastung Um trotz der Annahme eines klimatisierten Raumes den Einfluss der Temperaturbelastung darstellen zu können, wurden sehr geringe Werte für die Temperaturschwankung angenommen.

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

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

Feuchtigkeitswechsel Um trotz der Annahme eines klimatisierten Raumes den Einfluss der Feuchtebelastung darstellen zu können, wurden sehr geringe Werte für den Holzfeuchtewechsel angenommen.

$$\Delta u = 0,1\%$$

5.2. Ermittlung der charakteristischen und der Design-Lasten

5.2.1. Lange Einwirkungen

Eigengewicht

Glas

$$g_{k,G} = \rho_G \cdot b_G \cdot t_G = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1250 \cdot 8 = 0,25 \text{ N/mm}$$

Holz

$$g_{k,H} = \rho_H \cdot b_H \cdot h_H = 3,8 \cdot 10^{-6} \cdot 160 \cdot 100 = 0,06 \text{ N/mm}$$

Summe Eigengewicht

$$\begin{aligned} g_k &= g_{k,G} + g_{k,H} = 0,25 + 0,06 &&= 0,31 \text{ N/mm} \\ g_d &= g_k \cdot \gamma_G = 0,31 \cdot 1,35 &&= 0,42 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

5.2.2. Kurze Einwirkungen

Nutzlast

$$\begin{aligned} q &= 2,0 \text{ kN/m}^2 &&= 0,002 \text{ N/mm}^2 \\ q_k &= q \cdot b = 0,002 \cdot 1250 = 2,5 \text{ N/mm} \\ q_d &= q_k \cdot \gamma_Q = 2,5 \cdot 1,5 = 3,75 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Thermische Beanspruchung

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= T_{max} - T_0 = 20,1 - 20 &&= +0,1 \text{ }^\circ\text{K} \\ \Delta T_2 &= T_{min} - T_0 = 19,9 - 20 &&= -0,1 \text{ }^\circ\text{K} \\ \Delta T &= \max(|\Delta T_1|; |\Delta T_2|) = \max(|+0,1|; |-0,1|) = 0,1 \text{ }^\circ\text{K} \end{aligned}$$

5.3. Schnittgrößen

Querkraft beim Auflager Q_{max}

$$\begin{aligned} Q_{max,k,lang} &= \frac{g_k \cdot l}{2} = 0,31 \cdot 2500/2 = 388 \text{ N} \\ Q_{max,k,kurz} &= \frac{q_k \cdot l}{2} = 2,5 \cdot 2500/2 = 3125 \text{ N} \\ Q_{max,d,lang} &= \frac{g_d \cdot l}{2} = 0,42 \cdot 2500/2 = 525 \text{ N} \\ Q_{max,d,kurz} &= \frac{q_d \cdot l}{2} = 3,75 \cdot 2500/2 = 4688 \text{ N} \end{aligned}$$

5.4. Vorwerte für weitere Berechnungen

5.4.1. Vorwerte für kurzfristige Lasteinwirkungen

$$\begin{aligned}
 \text{Fugensteifigkeit} \quad c_F = c_{F, \text{kurz}} &= \frac{G_K \cdot b_K}{t_K} = 2,0 \cdot 120/3 = 80 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{Dehnsteifigkeit Holz} \quad EA_{H, \text{kurz}} &= 11600 \cdot 16000 = 1,86 \cdot 10^8 \text{ N} \\
 \text{Biegesteifigkeit Holz} \quad EI_{H, \text{kurz}} &= 11600 \cdot 1,33 \cdot 10^7 = 1,54 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2
 \end{aligned}$$

Nachgiebkeitsfaktor

$$\begin{aligned}
 \gamma_{1, \text{kurz}} &= \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot EA_G}{l^2 \cdot c_F, \text{kurz}}} = \\
 &= 1/(1 + \pi^2 \cdot 5,6 \cdot 10^8 / (2500^2 \cdot 80)) = 0,083
 \end{aligned}$$

Lage der Schwerlinien

$$\begin{aligned}
 a_{2, \text{kurz}} &= \frac{\gamma_{1, \text{kurz}} \cdot EA_G \cdot a}{\gamma_{1, \text{kurz}} \cdot EA_G + EA_{H, \text{kurz}}} = \\
 &= \frac{0,083 \cdot 5,6 \cdot 10^8 \cdot 57}{0,083 \cdot 5,6 \cdot 10^8 + 1,86 \cdot 10^8} = 11,4 \text{ mm} \\
 a_{1, \text{kurz}} &= 57 - 11,4 = 45,6 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

effektive Biegesteifigkeit

$$\begin{aligned}
 EI_{\text{eff}, \text{kurz}} &= EI_G + EI_{H, \text{kurz}} + \frac{a^2 \cdot \gamma_{1, \text{kurz}} \cdot EA_G \cdot EA_{H, \text{kurz}}}{\gamma_{1, \text{kurz}} \cdot EA_G + EA_{H, \text{kurz}}} = \\
 &= 2,99 \cdot 10^9 + 1,54 \cdot 10^{10} + \frac{57^2 \cdot 0,083 \cdot 5,6 \cdot 10^8 \cdot 1,86 \cdot 10^8}{0,083 \cdot 5,6 \cdot 10^8 + 1,86 \cdot 10^8} = 2,78 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2
 \end{aligned}$$

5.4.2. Vorwerte für langfristige Lasteinwirkungen

In der folgenden Berechnung wird angenommen, dass die größten Spannungen im Verhältnis zur Festigkeit durch eine ständige Einwirkung hervorgerufen werden, wodurch sich ein Beiwert von $\psi_2 = 1$ ergibt. Zur Berücksichtigung des zeitabhängigen Materialverhaltens müssen demnach die Moduln wie folgt abgemindert werden. [HWK11]

5.4.2.1. Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

$$\begin{aligned}
 \text{Schubmodul Klebstoff} \quad G_{K,lang} &= \frac{G_K}{1 + k_{K,def,lang}} = 2,0/(1 + 4,09) = 80 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{Fugensteifigkeit} \quad c_F = c_{F,lang} &= \frac{G_{K,lang} \cdot b_K}{t_K} = 0,39 \cdot 120/3 = 15,6 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{E-Modul BSH} \quad E_{H,lang} &= \frac{E_H}{1 + k_{H,def,lang}} = 11600/(1 + 0,6) = 7250 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{Dehnsteifigkeit BSH} \quad EA_{H,lang} &= 7250 \cdot 16000 = 1,16 \cdot 10^8 \text{ N} \\
 \text{Biegesteifigkeit BSH} \quad EI_{H,lang} &= 7250 \cdot 1,33 \cdot 10^7 = 9,64 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2
 \end{aligned}$$

Nachgiebikoeffizient

$$\begin{aligned}
 \gamma_{1,lang} &= \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot EA_G}{l^2 \cdot c_{F,lang}}} = \\
 &= 1/(1 + \pi^2 \cdot 5,6 \cdot 10^8 / (2500^2 \cdot 15,6)) = 0,017
 \end{aligned}$$

Lage der Schwerlinien

$$\begin{aligned}
 a_{2,lang} &= \frac{\gamma_{1,lang} \cdot EA_G \cdot a}{\gamma_{1,lang} \cdot EA_G + EA_{H,lang}} = \\
 &= \frac{0,017 \cdot 5,6 \cdot 10^8 \cdot 57}{0,017 \cdot 5,6 \cdot 10^8 + 1,16 \cdot 10^8} = 4,3 \text{ mm} \\
 a_{1,lang} &= 57 - 4,3 = 42,7 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

effektive Biegesteifigkeit

$$\begin{aligned}
 EI_{eff,lang} &= EI_G + EI_{H,lang} + \frac{a^2 \cdot \gamma_{1,lang} \cdot EA_G \cdot EA_{H,lang}}{\gamma_{1,lang} \cdot EA_G + EA_{H,lang}} = \\
 &= 2,99 \cdot 10^9 + 9,64 \cdot 10^{10} + \frac{57^2 \cdot 0,017 \cdot 5,6 \cdot 10^8 \cdot 1,16 \cdot 10^8}{0,017 \cdot 5,6 \cdot 10^8 + 1,16 \cdot 10^8} = 1,28 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2
 \end{aligned}$$

5.4.2.2. Grenzzustand der Tragfähigkeit

$$\begin{aligned}
 \text{Fugensteifigkeit} \quad c_{F,\infty} &= \frac{c_F}{1 + \psi_2 \cdot k_{K,def,lang}} \\
 \text{Elastizitätsmodul Holz} \quad E_{H,lang} &= \frac{E_H}{1 + \psi_2 \cdot k_{H,def,lang}}
 \end{aligned}$$

In der folgenden Berechnung wird zur Vereinfachung angenommen, dass die größten Spannungen im Verhältnis zur Festigkeit durch eine ständige Einwirkung hervorgerufen werden, wodurch sich ein Beiwert von $\psi_2 = 1$ ergibt.

5.5. Tragfähigkeitsnachweis der Schubverklebung

5.5.1. Schubwiderstand der Schubverklebung

Widerstand unter kurzfristiger Last

$$\tau_{Rd, kurz} = \frac{k_{K, mod, kurz} \cdot \tau_K}{\gamma_{\tau, M}} = 0,9 \cdot 3,043/6 = 0,46 \text{ N/mm}^2$$

Widerstand unter Dauerlast

$$\tau_{Rd, lang} = \frac{k_{\tau, mod, lang} \cdot \tau_K}{\gamma_{\tau, M}} = 0,2 \cdot 3,043/6 = 0,10 \text{ N/mm}^2$$

5.5.2. Tragsicherheitsnachweis - Schubspannung in der Verklebung

5.5.2.1. Spannungen zufolge kurzfristiger Einwirkung

Lasten

$$\begin{aligned} \tau_{Sd, q} &= \frac{Q_{max, d, kurz}}{EI_{eff, kurz}} \cdot \gamma_{1, kurz} \cdot EA_G \cdot a_{1, kurz} \cdot \frac{1}{b_k} = \\ &= 4688 / (2,78 \cdot 10^{11}) \cdot 0,083 \cdot 5,6 \cdot 10^8 \cdot 45,6 / 120 = 0,298 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Temperatur

$$\begin{aligned} u_T &= (\alpha_{T, G} - \alpha_{T, H}) \cdot \Delta T \cdot \frac{l}{2} = (9 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,1 \cdot 2500 / 2 = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \\ \tau_{Sd, T} &= G_{K, kurz} \cdot \frac{u_T}{t_K} = 2,0 \cdot 1,25 \cdot 10^{-4} / 3 = 8,33 \cdot 10^{-5} \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Feuchtigkeit

$$\begin{aligned} u_F &= \alpha_{F, H} \cdot \Delta U \cdot \frac{l}{2} = 0,01 / 100 \cdot 0,1 \cdot 2500 / 2 = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ mm} \\ \tau_{Sd, F} &= G_{K, kurz} \cdot \frac{u_F}{t_K} = 2,0 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} / 3 = 8,33 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Summe

$$\tau_{Sd, kurz} = \tau_{Sd, q} + \tau_{Sd, T} + \tau_{Sd, F} = 0,298 + 8,33 \cdot 10^{-5} + 8,33 \cdot 10^{-3} = 0,306 \text{ N/mm}^2$$

5.5.2.2. Spannungen zufolge Dauerlast

$$\begin{aligned}\tau_{Sd,lang} &= \frac{Q_{max,d,lang}}{EI_{eff,lang}} \cdot \gamma_{1,lang} \cdot EA_G \cdot a_{1,lang} \cdot \frac{1}{b_k} = \\ &= 525 / (1,29 \cdot 10^{11}) \cdot 0,017 \cdot 5,6 \cdot 10^8 \cdot 52,6 / 120 = 0,017 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

5.5.3. Nachweis der Schubspannungen in der Verklebung

$$\frac{\tau_{Sd,lang}}{\tau_{Rd,lang}} + \frac{\tau_{Sd,kurz}}{\tau_{Rd,kurz}} = \frac{0,017}{0,10} + \frac{0,306}{0,46} = 0,84 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

5.6. Gebrauchstauglichkeitsnachweis: Durchbiegung des Plattenbalkens

5.6.1. Zulässige Durchbiegung

$$w_{zul} = \frac{l}{300} = 2500/300 = 8,33 \text{ mm}$$

5.6.2. Durchbiegung

5.6.2.1. Durchbiegung kurzfristiger Lasten

$$w_{max,kurz} = \frac{5 \cdot q_k \cdot l^4}{384 \cdot EI_{eff,kurz}} = 5 \cdot 2,5 \cdot 2500^4 / (384 \cdot 2,79 \cdot 10^{11}) = 4,56 \text{ mm}$$

5.6.2.2. Durchbiegung Dauerlasten

$$w_{max,lang} = \frac{5 \cdot g_k \cdot l^4}{384 \cdot EI_{eff,lang}} = 5 \cdot 0,31 \cdot 2500^4 / (384 \cdot 1,29 \cdot 10^{11}) = 1,22 \text{ mm}$$

5.6.3. Nachweis der Durchbiegung

$$\frac{w_{max, kurz} + w_{max, lang}}{w_{zul}} = \frac{4,56 + 0,319}{8,33} = 0,7 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

5.7. Gebrauchstauglichkeitsnachweis: Relativverschiebung in Klebefuge

5.7.1. Zulässige Relativverschiebung

$$u_{zul} = \varepsilon_{K, max} \cdot t_K = 1,68 \cdot 3 = 5,04 \text{ mm}$$

5.7.2. vorhandene Relativverschiebung

5.7.2.1. Relativverschiebung zufolge kurzzeitiger Einwirkungen

$$\begin{aligned} \text{Nutzlast} \quad \tau_{Sk,q} &= \frac{Q_{max,k, kurz}}{EI_{eff, kurz}} \cdot \gamma_{1, kurz} \cdot EA_G \cdot a_{1, kurz} \cdot \frac{1}{b_k} = \\ &= 3125 / (2,78 \cdot 10^{11}) \cdot 0,083 \cdot 5,6 \cdot 10^8 \cdot 45,6 / 120 = 0,199 \text{ N/mm}^2 \\ u_q &= \frac{\tau_{Sk,q}}{G_K} \cdot t_K = 0,199 / 2,0 \cdot 3 = 0,30 \text{ mm} \\ \text{Temperatur} \quad u_T &= 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \\ \text{Feuchtigkeit} \quad u_F &= 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ mm} \\ \text{Gesamt} \quad u_{kurz} &= u_q + u_T + u_F = 0,30 + 1,25 \cdot 10^{-4} + 1,25 \cdot 10^{-2} = 0,31 \text{ mm} \end{aligned}$$

5.7.2.2. Relativverschiebung zufolge Dauerlasten

$$\begin{aligned} \tau_{Sk,g} &= \frac{Q_{max,k, lang}}{EI_{eff, lang}} \cdot \gamma_{1, lang} \cdot EA_G \cdot a_{1, lang} \cdot \frac{1}{b_k} = \\ &= 389 / (1,29 \cdot 10^{11}) \cdot 0,017 \cdot 5,6 \cdot 10^8 \cdot 52,6 / 120 = 0,013 \text{ N/mm}^2 \\ u_{lang} &= \frac{\tau_{Sk,g}}{G_{lang}} \cdot t_K = 0,013 / 0,39 \cdot 0,3 = 0,010 \text{ mm} \end{aligned}$$

5.7.3. Nachweis der Relativverschiebung

$$\frac{\gamma_{max,kurz} + \gamma_{max,lang}}{\gamma_{zul}} = \frac{0,013 + 0,010}{1,68} = 0,014 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

6. Zusammenfassung

Das Gamma-Verfahren und das Schubanalogieverfahren eignen sich gleichermaßen zur Bemessung einer Holz-Glas-Verbundplatte. Es konnte gezeigt werden, dass das Gamma-Verfahren trotz ungünstiger Belastungssituation (Einzellast in Trägermitte) brauchbare Ergebnisse liefert (sh. Abschnitt 2.5.3).

Der entscheidende Vorteil des Gamma-Verfahrens ist die einfache Anwendbarkeit. Im Gegensatz zum Schubanalogieverfahren muss man nicht auf ein Stabwerksprogramm zurückgreifen, um die Verteilung der Schnittgrößen auf die Einzelquerschnitte zu ermitteln.

Um die Anwendbarkeit der analytischen Berechnungsmodelle zu überprüfen, wurden die Ergebnisse mit Messwerten aus Belastungsversuchen verglichen. Dazu wurden Probekörper bestehend aus einer Glasplatte und vier Holzstreben an der Unterseite, die mit Zwei-Komponenten-Kleber verbunden wurden, hergestellt.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Berechnungsergebnissen zeigte eine gute Übereinstimmung. Es wurden die Schnittkräfte in Feldmitte und am Auflager aus den Messungen abgeleitet und den Berechnungsergebnissen gegenübergestellt. Dabei zeigte sich, dass im Allg. die Ergebnisse der Berechnungen auf der „sicheren Seite“ liegen. Einzige die oberen Randspannungen werden unterschätzt.

Die Abschätzung der mitwirkenden Plattenbreite wurde mit Hilfe des Verlaufs und des Maximalwertes der oberen Randspannungen überprüft. Für die Bemessung wurde $b_{e,i} = l/10$ bestimmt, was die auf der unsicheren Seite liegenden Randspannungen kompensiert.

Wie in den Annahmen zum Bemessungsbeispiel (sh. Abschnitte 5.1.3 und 5.1.4) angedeutet, wurden dort keine Langzeit- und Umwelteinwirkungen berücksichtigt. Versuche dazu sollen in folgenden Forschungsprojekten durchgeführt werden. Die Erkenntnisse sollen unter anderem in die Wahl der Materialsicherheitsbeiwerte einfließen. Außerdem kann interessierten Herstellern damit ein schärferes Anforderungsprofil für die Entwicklung künftiger Klebstoffe vermittelt werden.

Es bleibt weiters zu wünschen, dass im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Arbeiten Bemessungskonzepte für durchlaufende HGV-Platten studiert werden, um das große Potential der jungen Holz-Glas-Verbundbauweise in weiteren Einsatzgebieten nutzbar zu machen.

A. Gamma-Verfahren

Die Formel für die Lage der Spannungsnullebenen wird meist (z.B. [EN106]) mit

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot EA_1 (h_1 + h_2)}{2 \cdot (\gamma_1 \cdot EA_1 + EA_2)} \quad (\text{A.1})$$

angegeben. Dabei wird aber die Dicke der Klebefuge t_k nicht beachtet, die in unserem Rechenbeispiel und Versuchskörper gegenüber den anderen Querschnittsteilen jedoch nicht sehr klein ist. Daher wurde in dieser Arbeit folgende Formel verwendet, die im Weiteren hergeleitet wird. Diese Änderung hat nur Auswirkung auf die Berechnung der Spannungen aus der Verbundwirkung. Die Normalkräfte sind in den beiden Querschnitten also gleich groß, was auch der Ausgangspunkt der Herleitung ist:

$$N_1 = N_2 \quad (\text{A.2})$$

$$\sigma_1 \cdot A_1 = \sigma_2 \cdot A_2 \quad (\text{A.3})$$

Einsetzen von (2.8) und Division durch M/EI_{eff} :

$$\gamma_1 \cdot EA_1 \cdot a_1 = EA_2 \cdot a_2 \quad (\text{A.4})$$

Einsetzen von (2.6) und Auflösen nach a_2 ergibt schließlich:

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot EA_1 \cdot a}{\gamma_1 \cdot EA_1 + EA_2} \quad (\text{A.5})$$

B. Leitfaden zur Berechnung und Bemessung

Die Berechnung und Bemessung von Holz-Glas-Verbundplatten wurde im Rahmen dieser Arbeit eingehend beschrieben. Nun sollen abschließend die wichtigsten Bemessungsschritte nochmals in kondensierter Form dargelegt werden. Der nachfolgende Leitfaden bezieht sich ausschließlich auf die Bemessung des Klebstoffsystems der Schubverklebung. Die Bemessung der übrigen Bauteilkomponenten hat gesondert zu erfolgen.

B.1. Annahmen für den Leitfaden

Die für den nachfolgenden Leitfaden getroffenen Annahmen sind zu überprüfen. Bei Abweichungen von diesen Annahmen sind Werte sowie Formeln zu anzupassen.

1. Es werden vier Holzrippen in Längsrichtung angeordnet. Zwei am Plattenrand, zwei nebeneinander in Plattenmitte.
2. Es wird eine gleichmäßig verteilte Flächenlast angenommen. Das Eigengewicht der Klebefuge wird vernachlässigt.
3. Die Deformationsbeiwerte sind entsprechend den zu erwartenden klimatischen Bedingungen zu wählen.
4. Die in den Formeln verwendeten Einheiten können von jenen der Annahmen variieren. Eine entsprechende Anpassung erfolgt während der Berechnung.
5. Die Nachweisführung bezieht sich auf die Bemessung der Klebefuge. Die verbleibenden Bauteilkomponenten müssen gesondert nachgewiesen werden.
6. Die größten Spannungen im Verhältnis zur Festigkeit werden durch eine ständig Einwirkung hervorgerufen. Die abgeminderten Federsteifigkeiten für Berechnungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind damit mit jenen für Berechnungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit identisch.

B.2. Material, Geometrie und Einwirkungen

B.2.1. Abmessungen des Plattenbalkens

Plattenlänge	$l = \dots\dots\dots \text{cm} = \dots\dots\dots \text{mm}$
Plattenbreite	$b = \dots\dots\dots \text{cm} = \dots\dots\dots \text{mm}$
Anzahl der Streben	$n_H = 4$

B.2.2. Material und Geometrie

Platte Floatglas 8 mm

Dichte	$\rho_G = \dots\dots\dots \text{kg/m}^3 = \dots\dots\dots \text{N/mm}^3$
Elastizitätsmodul	$E_G = \dots\dots\dots \text{N/mm}^2$
Schubmodul	$G_G = \dots\dots\dots \text{N/mm}^2$
Querdehnungszahl	$\nu_G = \dots\dots\dots$
Wärmedehnzahl	$\alpha_{T,G} = \dots\dots\dots \text{°K}^{-1}$
Breite der Glasplatte	$b_G = b = \dots\dots\dots \text{mm}$
Länge der Glasplatte	$l_G = l = \dots\dots\dots \text{mm}$
Dicke der Glasplatte	$t_G = \dots\dots\dots \text{mm}$

Querschnittswerte zufolge mitwirkender Plattenbreite

mitwirkende Plattenbreite	$b_{eff} = 4 \cdot b_{e,i} = 4 \cdot \frac{l_0}{10} = 4 * \dots\dots\dots / 10 = \dots\dots\dots \text{mm}$
Querschnittsfläche	$A_G = b_{eff} \cdot t_G = \dots\dots\dots * \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{mm}^2$
Dehnsteifigkeit	$E A_G = \dots\dots\dots * \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{N}$
Trägheitsmoment	$I_G = \frac{b_{eff} \cdot t_G^3}{12} = \dots\dots\dots * \dots\dots\dots^3 / 12 = \dots\dots\dots \text{mm}^4$
Biegesteifigkeit	$E I_G = \dots\dots\dots * \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{Nmm}^2$

Streben BSH GL 24 h

Dichte	$\rho_{BSH} = \dots \text{ kg/m}^3 = \dots \text{ N/mm}^3$
Elastizitätsmodul	$E_H = \dots \text{ N/mm}^2$
Schubmodul	$G_H = \dots \text{ N/mm}^2$
Wärmedehnzahl	$\alpha_{T,H} = \dots$
Quellmaß	$\alpha_{U,H} = \dots \text{ \%}\varepsilon/\Delta u$
Breite einer Strebe	$b_H = \dots \text{ mm}$
Höhe der Streben	$h_H = \dots \text{ mm}$
Länge der Streben	$l_H = l = \dots \text{ mm}$

Querschnittswerte für gesamten Holzquerschnitt

Querschnittsfläche $A_{H,ges} = n_H \cdot b_H \cdot h_H = 4 * \dots * \dots = \dots \text{ mm}^2$
 Trägheitsmoment $I_H = \frac{n_H \cdot b_H \cdot h_H^3}{12} = 4 * \dots * \dots^3 / 12 = \dots \text{ mm}^4$

Klebefuge Acrylat

Schubmodul	$G_K = \dots \text{ N/mm}^2$
char. Schubwiderstand	$\tau_{K,c} = \dots \text{ N/mm}^2$
Streckgrenze	$\varepsilon_{K,max} = \dots \text{ \%}$
Referenztemperatur	$T_{K,0} = \dots \text{ }^\circ\text{C}$
Breite einer Klebefuge	$b_{K,i} = \dots \text{ mm}$
ges. Breite aller Klebefugen	$b_K = n_H \cdot b_{K,i} = 4 * \dots = \dots \text{ mm}$
Dicke der Klebefuge	$t_K = \dots \text{ mm}$

Verbundplattenbalken

Schwerlinienabstand der Teilquerschn.

$$a = \frac{h_H + t_G}{2} + t_K = (\dots + \dots) / 2 + \dots = \dots \text{ mm}$$

B.2.3. Modifikations-, Teilsicherheits- und Verformungsbeiwerte

Streben BSH GL 24 h, Nutzungsklasse 1

Deformationsbeiwert (kurz)	$k_{H,def,kurz} = \dots$
Deformationsbeiwert (lang)	$k_{H,def,lang} = \dots$

Klebefuge AcrylatModifikationsbeiwert (kurz) $k_{K,mod,kurz} = \dots\dots\dots$ Modifikationsbeiwert (lang) $k_{K,mod,lang} = \dots\dots\dots$ Deformationsbeiwert (kurz) $k_{K,def,kurz} = \dots\dots\dots$ Deformationsbeiwert (lang) $k_{K,def,lang} = \dots\dots\dots$ Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_K = \dots\dots\dots$ **Lasten**Teilsicherheitsbeiwert ständig $\gamma_g = \dots\dots\dots$ Teilsicherheitsbeiwert veränderlich $\gamma_q = \dots\dots\dots$ **B.2.4. Einwirkungen**

Einsatzgebiet der Platte: klimatisierter Raum

Ständige Lasten (langzeitig)Eigengewicht des Plattenbalkens g_P **Veränderliche Lasten** (kurzzeitig)Nutzlast $q = \dots\dots\dots \text{kN/m}^2 = \dots\dots\dots \text{N/mm}^2$

Temperaturbelastung Um trotz der Annahme eines klimatisierten Raumes den Einfluss der Temperaturbelastung darstellen zu können, wurden sehr geringe Werte für die Temperaturschwankung angenommen.

 $T_{max} = \dots\dots\dots \text{°C}$ $T_{min} = \dots\dots\dots \text{°C}$

Feuchtigkeitswechsel Um trotz der Annahme eines klimatisierten Raumes den Einfluss der Feuchtebelastung darstellen zu können, wurden sehr geringe Werte für den Holzfeuchtewechsel angenommen.

$$\Delta u = \dots\dots\dots\%$$

B.3. Ermittlung der charakteristischen und der Design-Lasten

B.3.1. Lange Einwirkungen

Eigengewicht

Glas

$$g_{k,G} = \rho_G \cdot b_G \cdot t_G = \dots\dots\dots * \dots\dots\dots * \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{ N/mm}$$

Holz

$$g_{k,H} = \rho_H \cdot b_H \cdot h_H = \dots\dots\dots * \dots\dots\dots * \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{ N/mm}$$

Summe Eigengewicht

$$g_k = g_{k,G} + g_{k,H} = \dots\dots\dots + \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{ N/mm}$$

$$g_d = g_k \cdot \gamma_G = \dots\dots\dots * \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{ N/mm}$$

B.3.2. Kurze Einwirkungen

Nutzlast

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

$$q_k = q \cdot b = \dots\dots\dots * \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{ N/mm}$$

$$q_d = q_k \cdot \gamma_Q = \dots\dots\dots * \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{ N/mm}^2$$

Thermische Beanspruchung

$$\Delta T_1 = T_{max} - T_0 = \dots\dots\dots - \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{ }^\circ\text{K}$$

$$\Delta T_2 = T_{min} - T_0 = \dots\dots\dots - \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{ }^\circ\text{K}$$

$$\Delta T = \max(|\Delta T_1|; |\Delta T_2|) = \max(|\dots\dots\dots|; |\dots\dots\dots|) = \dots\dots\dots \text{ }^\circ\text{K}$$

B.4. Schnittgrößen

Querkraft beim Auflager Q_{max}

$$Q_{max,k,lang} = \frac{g_k \cdot l}{2} = \dots * \dots / 2 = \dots \text{ N}$$

$$Q_{max,k,kurz} = \frac{q_k \cdot l}{2} = \dots * \dots / 2 = \dots \text{ N}$$

$$Q_{max,d,lang} = \frac{g_d \cdot l}{2} = \dots * \dots / 2 = \dots \text{ N}$$

$$Q_{max,d,kurz} = \frac{q_d \cdot l}{2} = \dots * \dots / 2 = \dots \text{ N}$$

B.5. Vorwerte für weitere Berechnungen

B.5.1. Vorwerte für kurzfristige Lasteinwirkungen

Fugensteifigkeit

$$c_F = c_{F,kurz} = \frac{G_K \cdot b_K}{t_K} = \dots * \dots / \dots = \dots \text{ N/mm}^2$$

Dehnsteifigkeit Holz $EA_{H,kurz} = \dots * \dots = \dots \text{ N}$

Biegesteifigkeit Holz $EI_{H,kurz} = \dots * \dots = \dots \text{ Nmm}^2$

Nachgiebkeitsfaktor

$$\begin{aligned} \gamma_{1,kurz} &= \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot EA_G}{l^2 \cdot c_{F,kurz}}} \\ &= 1 / (1 + \pi^2 * \dots / (\dots^2 * \dots)) = \dots \end{aligned}$$

Lage der Schwerlinien

$$\begin{aligned} a_{2,kurz} &= \frac{\gamma_{1,kurz} \cdot EA_G \cdot a}{\gamma_1 \cdot EA_G + EA_{H,kurz}} = \\ &= \frac{\dots * \dots * \dots}{\dots * \dots + \dots} = \dots \text{ mm} \\ a_{1,kurz} &= \dots - \dots = \dots \text{ mm} \end{aligned}$$

effektive Biegesteifigkeit

$$EI_{eff, kurz} = EI_G + EI_{H, lang} + \frac{a^2 \cdot \gamma_{1, lang} \cdot EA_G \cdot EA_{H, lang}}{\gamma_{1, lang} \cdot EA_G + EA_{H, lang}} =$$

$$= \dots + \dots + \frac{\dots^2 \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots}{\dots \cdot \dots + \dots} = \dots \text{ N mm}^2$$

B.5.2. Vorwerte für langfristige Lasteinwirkungen

In der folgenden Berechnung wird angenommen, dass die größten Spannungen im Verhältnis zur Festigkeit durch eine ständige Einwirkung hervorgerufen werden, wodurch sich ein Beiwert von $\psi_2 = 1$ ergibt. Zur Berücksichtigung des zeitabhängigen Materialverhaltens müssen demnach die Moduln wie folgt abgemindert werden.

B.5.2.1. Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Schubmodul Klebstoff	$G_{K, lang} = \frac{G_K}{1 + k_{K, def, lang}} = \dots / (1 + \dots)$	= $\dots \text{ N/mm}^2$
Fugensteifigkeit	$c_F = c_{F, lang} = \frac{G_{K, lang} \cdot b_K}{t_K} = \dots \cdot \dots / \dots$	= $\dots \text{ N/mm}^2$
E-Modul BSH	$E_{H, lang} = \frac{E_H}{1 + k_{H, def, lang}} = \dots / (1 + \dots)$	= $\dots \text{ N/mm}^2$
Dehnsteifigkeit BSH	$EA_{H, lang} = \dots \cdot \dots$	= $\dots \text{ N}$
Biegesteifigkeit BSH	$EI_{H, lang} = \dots \cdot \dots$	= $\dots \text{ Nmm}^2$

Nachgiebkeitsfaktor

$$\gamma_{1, lang} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot EA_G}{l^2 \cdot c_{F, lang}}} = 1 / (1 + \pi^2 \cdot \dots / (\dots^2 \cdot \dots)) = \dots$$

Lage der Schwerlinien

$$a_{2, lang} = \frac{\gamma_{1, lang} \cdot EA_G \cdot a}{\gamma_{1, lang} \cdot EA_G + EA_{H, lang}} =$$

$$= \frac{\dots \cdot \dots \cdot \dots}{\dots \cdot \dots + \dots} = \dots \text{ mm}$$

$$a_{1, lang} = \dots - \dots = \dots \text{ mm}$$

effektive Biegesteifigkeit

$$EI_{eff,lang} = EI_G + EI_{H,lang} + \frac{a^2 \cdot \gamma_{1,lang} \cdot EA_G \cdot EA_{H,lang}}{\gamma_{1,lang} \cdot EA_G + EA_{H,lang}} =$$

$$= \dots + \dots + \frac{\dots^2 * \dots * \dots * \dots}{\dots * \dots + \dots} = \dots \text{ N mm}^2$$

B.5.2.2. Grenzzustand der Tragfähigkeit

$$\text{Fugensteifigkeit} \quad c_{F,\infty} = \frac{c_F}{1 + \psi_2 \cdot k_{K,def,lang}}$$

$$\text{Elastizitätsmodul Holz} \quad E_{H,lang} = \frac{E_H}{1 + \psi_2 \cdot k_{H,def,lang}}$$

B.6. Tragfähigkeitsnachweis der Schubverklebung**B.6.1. Schubwiderstand der Schubverklebung**

Widerstand unter kurzfristiger Last

$$\tau_{Rd, kurz} = \frac{k_{K,mod, kurz} \cdot \tau_K}{\gamma_{\tau, M}} = \dots * \dots / 6 = \dots \text{ N/mm}^2$$

Widerstand unter Dauerlast

$$\tau_{Rd, lang} = \frac{k_{\tau,mod, lang} \cdot \tau_K}{\gamma_{\tau, M}} = \dots * \dots / 6 = \dots \text{ N/mm}^2$$

B.6.2. Tragsicherheitsnachweis - Schubspannung in der Verklebung**B.6.2.1. Spannungen zufolge kurzfristiger Einwirkung**

Lasten

$$\tau_{Sd,q} = \frac{Q_{max,d, kurz}}{EI_{eff, kurz}} \cdot \gamma_{1, kurz} \cdot EA_G \cdot a_{1, kurz} \cdot \frac{1}{b_k} =$$

$$= \dots / \dots * \dots * \dots * \dots / \dots = \dots \text{ N/mm}^2$$

Temperatur

$$\begin{aligned}
 u_T &= (\alpha_{T,G} - \alpha_{T,H}) \cdot \Delta T \cdot \frac{l}{2} \\
 &= (9 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-6}) * \dots * \dots / 2 &= \dots \text{ mm} \\
 \tau_{Sd,T} &= G_{K, \text{kurz}} \cdot \frac{u_T}{t_K} = \dots * \dots / \dots = &= \dots \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Feuchtigkeit

$$\begin{aligned}
 u_F &= \alpha_{F,H} \cdot \Delta U \cdot \frac{l}{2} = \dots / 100 * \dots * \dots / 2 &= \dots \text{ mm} \\
 \tau_{Sd,F} &= G_{K, \text{kurz}} \cdot \frac{u_F}{t_K} = \dots * \dots / \dots = &= \dots \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Summe

$$\tau_{Sd, \text{kurz}} = \tau_{Sd,q} + \tau_{Sd,T} + \tau_{Sd,F} = \dots + \dots + \dots = \dots \text{ N/mm}^2$$

B.6.2.2. Spannungen zufolge Dauerlast

$$\begin{aligned}
 \tau_{Sd, \text{lang}} &= \frac{Q_{\text{max}, d, \text{lang}}}{EI_{\text{eff}, \text{lang}}} \cdot \gamma_{1, \text{lang}} \cdot EA_G \cdot a_{1, \text{lang}} \cdot \frac{1}{b_k} = \\
 &= \dots / \dots * \dots * \dots * \dots / \dots = \dots \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

B.6.3. Nachweis der Schubspannungen in der Verklebung

$$\boxed{\frac{\tau_{Sd, \text{lang}}}{\tau_{Rd, \text{lang}}} + \frac{\tau_{Sd, \text{kurz}}}{\tau_{Rd, \text{kurz}}} = \dots + \dots = \dots \leq 1}$$

B.7. Gebrauchstauglichkeitsnachweis: Durchbiegung des Plattenbalkens

B.7.1. Zulässige Durchbiegung

$$w_{\text{zul}} = \frac{l}{300} = \dots / 300 = \dots \text{ mm}$$

B.7.2. Durchbiegung

B.7.2.1. Durchbiegung kurzfristiger Lasten

$$w_{max, kurz} = \frac{5 \cdot q_k \cdot l^4}{384 \cdot EI_{eff, kurz}} = 5 * \dots * \dots^4 / (384 * \dots) = \dots \text{ mm}$$

B.7.2.2. Durchbiegung Dauerlasten

$$w_{max, lang} = \frac{5 \cdot g_k \cdot l^4}{384 \cdot EI_{eff, lang}} = 5 * \dots * \dots^4 / (384 * \dots \cdot 1) = \dots \text{ mm}$$

B.7.3. Nachweis der Durchbiegung

$$\frac{w_{max, kurz} + w_{max, lang}}{w_{zul}} = \frac{\dots + \dots}{\dots} = \dots \leq 1$$

B.8. Gebrauchstauglichkeitsnachweis: Relativverschiebung in Klebefuge

B.8.1. Zulässige Relativverschiebung

$$u_{zul} = \varepsilon_{K, max} \cdot t_K = \dots * \dots = \dots \text{ mm}$$

B.8.2. vorhandene Relativverschiebung

B.8.2.1. Relativverschiebung zufolge kurzzeitiger Einwirkungen

Nutzlast $\tau_{Sk,q} = \frac{Q_{max,k, kurz}}{EI_{eff, kurz}} \cdot \gamma_{1, kurz} \cdot EA_G \cdot a_{1, kurz} \cdot \frac{1}{b_k} =$
 $= \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots / \dots = \dots \text{ N/mm}^2$
 $u_q = \frac{\tau_{Sk,q}}{G_K} \cdot t_K = \dots / \dots \cdot \dots = \dots \text{ mm}$

Temperatur $u_T = \dots \text{ mm}$
 Feuchtigkeit $u_F = \dots \text{ mm}$
 Gesamt $u_{kurz} = u_q + u_T + u_F = \dots + \dots + \dots = \dots \text{ mm}$

B.8.2.2. Relativverschiebung zufolge Dauerlasten

$\tau_{Sk,g} = \frac{Q_{max,k, lang}}{EI_{eff, lang}} \cdot \gamma_{1, lang} \cdot EA_G \cdot a_{1, lang} \cdot \frac{1}{b_k} =$
 $= \dots / \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots / \dots = \dots \text{ N/mm}^2$
 $u_{lang} = \frac{\tau_{Sk,g}}{G_{lang}} \cdot t_K = \dots / \dots \cdot \dots = \dots \text{ mm}$

B.8.3. Nachweis der Relativverschiebung

$\frac{\gamma_{max, kurz} + \gamma_{max, lang}}{\gamma_{zul}} = \frac{\dots + \dots}{\dots} = \dots \leq 1$

Abbildungsverzeichnis

0.1. Skizze des Versuchskörpers	IV
2.1. Schnittgrößen eines Verbundträgers (aus [Ham99])	5
2.2. Mitwirkende Plattenbreite (aus [Joh05])	6
2.3. Verbundquerschnitt und Spannungsverlauf im Querschnitt	7
2.4. Zusammenhang γ und EI_{eff}	9
2.5. Zusammenhang γ und EI_{eff} — für $G_k = 0,5 \dots 5,5$	10
2.6. Zusammenhang γ und G_k bzw. l — für $G_k = 0,5 \dots 5,5$	12
2.7. Zusammenhang b_{eff} und EI_{eff} , σ_{max} , σ_{min}	12
2.8. Analogiemodell (aus [KS04])	14
2.9. Skizze des Versuchskörpers	16
2.10. statisches System	17
2.11. Verlauf des Biegemoments (Ausdruck aus Dlubal RSTAB 5)	19
2.12. Verlauf der Querkraft (Ausdruck aus Dlubal RSTAB 5)	20
2.13. Vergleich Gamma- und Schubanalogie-Verfahren	21
3.1. Kleinproben - Probekörper	23
3.2. Kleinproben - Probekörper (a) und Versuchsanordnung (b)	23
3.3. Versuchsablauf Kleinproben im Kraft-Weg-Diagramm	24
3.4. Kleinproben - Bestimmung von A_{net}	25
3.5. Zeichnung des Probekörpers im Maßstab 1:25 und das Anschlussdetail im Maßstab 1:1	26
3.6. Zweikomponentenkleber und Reinigungsmittel	28
3.7. Verhältnis von E_{dyn} zu E_{global} nach [RK09]	29
3.8. Bestimmung von $E_{0,dyn}$ mittels Laser-Interferometrie (a) und Feuchtigkeitsmessgerät (b)	30
3.9. Laser-Vibrometer (a) und Sortierung der Rippen nach gemessenem E-Modul (b)	31
3.10. Vorversuche zum Auftragen des Klebers	33
3.11. Herstellung der Probekörper — Richttisch (a) und Auftragen des Klebers (b)	33
3.12. Anordnung der Messmittel	35
3.13. Dehnungsmessstreifen auf Glas (a) und auf Holz (b)	36
3.14. Induktive Wegaufnehmer beim Auflager (a) und in den Viertel-Punkten (b)	36
3.15. Versuchsanordnung	37
3.16. Versuchsanordnung: Auflager mit KMD (A), gegenüberliegendes Auflager (B), Lasteinleitung über KMD und Holzstück (C) und Zylinder der Presse (D)	38
3.17. Versuchsanordnung: Krafteinleitung über KMD in Feldmitte (a), Auflager mit KMD (b)	38
3.18. Durchbiegung w in Feldmitte und einwirkende Kraft F in Abhängigkeit der Zeit t	40
3.19. Mittlere Dehnung im Glas ε_G und Holz ε_H in Feldmitte in Abhängigkeit der Zeit	41
3.20. Relativverschiebung Glas/Holz am Ende der Platte und in den Viertelpunkten in Abhängigkeit der Zeit	42
3.21. Versagen der Platte I	43
3.22. Versagen der Platte II	44
3.23. Versagen der Platte III	44

3.24. Platte III: Biegezugversagen im Holz durch weitere Laststeigerung nach erstmaligem Glasversagen	45
3.25. Platte III: Lastausbreitungswinkel von etwa 37°	45
3.26. Platte III: Schubversagen im Glas mit einem Lastausbreitungswinkel von etwa 37°	46
3.27. Versagen der Platte IV	46
3.28. Versagen der Platte V	47
3.29. Kraft-Weg Diagramm der ausgewählten Versuchsabschnitte und mittlerer Verlauf	48
3.30. Differenz zwischen Lasteintrag (Mitte) und Lastaustrag (Auflager) der einzelnen Rippen.	50
3.31. Verlauf der Dehnungen in der Glasoberfläche während des Versuchs— Mittelwert von DMS G1 bis DMS G10	51
3.32. Dehnungen in der Glasoberfläche — Gemessenen Werte (a) berechneter Verlauf im Querschnitt in Feldmitte (b) bei $F = 8,5 \text{ kN}$	51
3.33. Berechnete Randspannungen zufolge Dehnungen im Glas bei $F = 8,5 \text{ kN}$	52
3.34. Verlauf der Dehnungen an der Unterseite der Holzstreben in Feldmitte — Mittelwert von DMS H1 bis DMS H4	52
3.35. Dehnungen an der Unterseite der Holzstreben bei einer Last von $F = 8,5 \text{ kN}$	53
3.36. Verlauf der Relativverschiebung im Auflagerbereich	54
3.37. Verlauf der Relativverschiebung in den Viertelpunkten der Platte	54
3.38. Vergleich Relativverschiebung von Holz und Glas bei $F = 8,5 \text{ kN}$ bei den Auflager- und den Viertel-Punkten	55
4.1. Kraft-Weg Diagramm für den Mittelwert der Versuche, das Gamma-Verfahren, das Schubanalogieverfahren und unter Annahme losen Verbunds	57
4.2. Obere Randspannungen σ_r des Glases in Feldmitte quer zur Plattenachse	59

Tabellenverzeichnis

2.1. Zusammenhang G_k, γ, EI_{eff}	10
2.2. Zusammenhang γ und G_k bzw. l — für $G_k = 0,5 \dots 5,5$	11
2.3. Auswirkung der Variation von b_{eff} auf EI_{eff}, σ_{min} (Glas), σ_{max} (Holz)	13
2.4. Ergebnisse der Berechnungen im Stabwerksprogramm	19
2.5. Vergleich der Ergebnisse des Gamma-Verfahrens und des Schubanalogie-Verfahrens (Sa.)	21
3.1. Maximale Schubspannung	25
3.2. Berechnung des Schubmoduls	27
3.3. Messergebnisse des Laser-Interferometers	30
3.4. Mittelwerte und Standardabweichungen der E-Moduln für jede Platte und alle Rippen	31
3.5. Bei weiteren Analysen betrachtete Zeitabschnitte der Versuche (vgl. 3.18)	47
3.6. Kraft, Durchbiegung und Biegesteifigkeit bei $l/300$ und F_{max}	47
3.7. Mittelwerte und Abweichungen der Dehnungen im Holz bei $F = 8,5$ kN	51
3.8. Verschiebungen Glas gegen Holz u zufolge Schub bei $F = 8,5$ kN	53
4.1. Vergleich der Durchbiegung in Feldmitte bei $F = 8,5$ kN mit den Berechnungen	56
4.2. Vergleich der Biegesteifigkeit des Systems EI bei $\frac{l}{300}$, im Bereich $\frac{l}{300}$ bis F_{max} und im Bereich 0 bis F_{max} mit den Berechnungen und die Abweichungen der Rechenmodelle von diesen Biegesteifigkeiten	57
4.3. Vergleich der Normalspannungen im Querschnitt in Feldmitte und der maximalen Schubspannungen bei $F = 8,5$ kN	58
4.4. Berechnung der mitwirkenden Plattenbreite b_{eff} aus den oberen Randspannungen σ_r	59

Stichwortverzeichnis

Berechnungsverfahren, 5

Biegesteifigkeit

effektive, 7

Wirksame, 8

wirksame, 7

DMS, 34

E-Modul

dynamisch, 28

Ersatzschubsteifigkeit, 14

Ersatzträger, 14

Fugensteifigkeit, 7, 14

Gamma-Verfahren, 7

Glasscheibe, 27

Holzrippen, 27

Induktiver Wegaufnehmer, 34

Klebstoff, 27

Kleinproben, 22

Versuchskörper, 22

Kraftmessdosen, 34

Laser-Interferometrie, 28

Messmittel, 34

mitwirkende Plattenbreite, 6, 11, 58

Nachgiebigkeitsfaktor, 7

Probekörper

Herstellung, 29

Schubanalogie-Verfahren, 14

Schubmodul, 24

Spannungen zufolge Eigenbiegung, 8

Spannungen zufolge Verbundwirkung, 8

Steineranteile, 5

Teilwuerschnitt, 5

Verbund

kein, 5

starrer, 5

Verbundeffizienz, 9

Verbundtheorie, 5

Verbundträger, 5

Versagensarten, 43

Literaturverzeichnis

- [DIN96] Beuth Verlag: *DIN EN 594: Holzbauwerke, Prüfverfahren: Tragfähigkeit und Steifigkeit von Wänden in Tafelbauart (Wandscheiben)*. Berlin, 1996
- [DIN04] Beuth Verlag: *DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*. Berlin, 08 2004
- [DIN08] Beuth Verlag: *DIN EN 384: Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte*. Berlin, 2008
- [EN106] Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM EN 1995-1-1 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Wien, 2006
- [ENB05] Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM EN 1994-1-1 Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton; Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln - Bemessungsregeln für den Hochbau*. Wien, 2005
- [Ham99] HAMM, Jan: *Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas*. Lausanne, Diss., 1999. <http://dx.doi.org/10.5075/epfl-thesis-2065>. – DOI 10.5075/epfl-thesis-2065
- [Hoc11] HOCHHAUSER, Werner: *Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundscheiben*. Wien, Vienna University of Technology, Diss., 2011
- [HWK11] HOCHHAUSER, Werner ; WINTER, Wolfgang ; KREHER, Klaus: *Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: State of the Art, Forschungsbericht, Studentische Arbeiten*. Endbericht zum Forschungsprojekt: Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: Berechnung und Bemessungskonzept / TU Wien. Wien, 2011. – Forschungsbericht
- [Joh05] JOHANNSEN, Karl: *Exkurs über die Mitwirkende Plattenbreite*. http://www.traxpro.de/Aufsaeetze/mitwirkende_Plattenbreite.pdf. Version: 2005
- [Kre04] KREHER, Klaus: *Tragverhalten und Bemessung von Holz-Glas-Verbundträgern unter Berücksichtigung der Eigenspannungen im Glas*. Lausanne, Diss., 2004. <http://dx.doi.org/10.5075/epfl-thesis-2999>. – DOI 10.5075/epfl-thesis-2999
- [KS04] KUHLMANN, Ulrike ; SCHÄNZLIN, Jörg: *Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken nach DIN und Euronormen*. In: *Innovationen im Bauwesen* (2004)
- [Mic06] MICHELFELDER, Birgit C.: *Trag- und Verformungsverhalten von Kernen bei Brettstapel-Beton*

-
- Verbunddecken*. Stuttgart, Diss., 2006. <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2007/2891/>
- [Mü11] MÜLLER, Christina: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Holz-Glas-Verbundträgern*. Wien, TU Wien, Diplomarbeit, 2011
- [Neu07] NEUMÜLLER, Andreas: Festigkeitssortierung im frischen Zustand. In: *HFA-Magazin* 04.2007 (2007), S. 2
- [Neu11] NEUBAUER, Georg: *Entwicklung und Bemessung von statisch wirksamen Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zum Einsatz im Fassadenbereich*. Wien, TU Wien, Diss., 2011
- [ONB06] Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM B 1995-1-1 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau Nationale Festlegungen zur ÖNORM EN 1995-1-1 und nationale Erläuterungen*. Wien, 2006
- [ONB07] Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM B 1994-1-1 Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton; Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln - Bemessungsregeln für den Hochbau. Nationale Festlegungen zur ÖNORM EN 1994-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen*. Wien, 2007
- [ONB09] Österreichisches Normungsinstitut: *Ö-NORM B 3716-1: Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau - Teil 1: Grundlagen*. Wien, 11 2009
- [RK09] RAVENSHORST, G. J. P. ; KULEN, J. W. G. d.: Relationships Between Local, Global And Dynamic Modulus Of Elasticity For Soft- And Hardwoods. In: *International Council For Research And Innovation in Building And Construction CIB-W18/42-10-1* (2009), August, S. 12