

**Zum Tragverhalten von mehrschichtigen Glaselementen
mit integrierten Funktionsträgern
am Beispiel von
Glaslamellen mit eingebetteten Hologrammen**

Thomas Topp

**Zum Tragverhalten von mehrschichtigen Glaselementen
mit integrierten Funktionsträgern
am Beispiel von
Glaslamellen mit eingebetteten Hologrammen**

Von der
Fakultät Bauwesen der Technischen Universität Dortmund
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Thomas Topp

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer
1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Atilla Ötes
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Helmut F.O. Müller
Tag der mündlichen Prüfung: 13. März 2008

INHALT

1. Einleitung	1
1.1. Entwicklung von Glasfassaden mit Funktionen	1
1.2. Ziel der Arbeit	6
2. Glaselemente mit integrierten Funktionen.....	9
2.1. Zwischenschichten mit integrierten Funktionen	9
2.2. Einbausituationen von HOE in Geschossbauten	15
2.2.1. Fassade	16
2.2.2. Dach	18
2.3. Anforderungen/ Einwirkungen.....	18
2.3.1. Einwirkungen	19
3. Komponenten und Materialien	23
3.1. Glas (Deckschicht).....	23
3.2. Zwischenschicht.....	26
3.2.1. Verbundfolien	27
3.2.2. HOE-Funktionsfolie.....	30
3.3. Glashalterungen.....	31
3.3.1. Linienlagerung	31
3.3.2. Punkthalter im Glas	32
3.3.3. Weitere Halterungen	34
4. Tragkonstruktionen für Lichtlenk-Lamellen	35
4.1. Ebene Einzellamellen	35
4.1.1. Halterung der Lamelle	35
4.1.2. Glashalterung.....	37

4.1.3.	Lamellen mit Verbindungsrohr	40
4.1.4.	Glasdimensionierung	42
4.2.	Großflächige Lamellenlösungen.....	49
4.3.	Lamellen mit größeren Spannweiten	51
4.3.1.	Verschattungssysteme mit mehreren Funktionsebenen.....	52
4.3.2.	Konzentrierende Systeme mit gekrümmten Gläsern	54
5.	Tragverhalten von ebenen Einzellamellen	55
5.1.	Tragverhalten der Zwischenschichten.....	55
5.1.1.	Mechanische Modelle für die Zwischenschicht	55
5.1.2.	Berücksichtigung der Zwischenschicht bei der Bemessung von VSG	59
5.2.	Scherversuche an Kleinproben.....	67
5.2.1.	Versuchsaufbau	67
5.2.2.	Versuchsergebnisse	69
5.2.3.	Zusammenfassung der Ergebnisse der Schertests	79
5.3.	Untersuchungen an Lamellen	80
5.3.1.	Untersuchte Konstruktionen.....	80
5.3.2.	Versuchsaufbau und -durchführung	84
5.3.3.	Biegeversuche an Lamellen mit liniengelagerten Gläsern	87
5.3.4.	Biegeversuche an Lamellen mit punktgelagerten Gläsern.....	93
5.3.5.	Resttragfähigkeitsversuche	96
5.4.	Identifizierung eines Schubmoduls.....	98
5.4.1.	Mechanisches Modell für Träger mit nachgiebigem Verbundquerschnitt..	98
5.4.2.	Vergleich mit FE-Ergebnissen.....	106
5.4.3.	Anwendung auf die Versuchsdaten	107
6.	Tragverhalten von Lamellen mit größeren Spannweiten	112
6.1.	Gebogene Lamellen	113
6.1.1.	Experimentelle Untersuchungen.....	114

6.1.2.	Rechnerische Untersuchungen	116
6.2.	Lamelle mit hybridem T-Querschnitt.....	123
6.2.1.	Konstruktion und Materialien.....	123
6.2.2.	Mechanisches Modell	128
6.2.3.	Experimentelle Untersuchungen	129
6.2.4.	Rechnerische Untersuchungen	134
6.3.	Konstruktionshinweise	139
6.3.1.	Glasrand	139
6.3.2.	Gebogene Lamelle.....	139
6.3.3.	Lamelle mit hybridem T-Querschnitt	140
7.	Zusammenfassung	141
8.	Literatur	143
	Normen/ Regelwerke/ Zulassungen.....	147
Anhang	A
	Abkürzungen/ Symbole	A
	Glossar.....	C
	Verzeichnis der Abbildungen.....	E
	Verzeichnis der Tabellen.....	I

1. EINLEITUNG

1.1. Entwicklung der Glasfassaden mit Funktionen

Glasfassaden werden in den letzten Jahren, neben den originären Aufgaben der Belichtung und des Gebäudeabschlusses, in zunehmendem Maße mit weiteren Funktionen ausgestattet. Die Gläser werden „intelligenter“.

Die Entwicklung der Fassaden wurde entscheidend durch Untersuchungen zum Behaglichkeitsempfinden von Menschen in Räumen, insbesondere in Arbeitsräumen, gefördert. Diese Untersuchungen zeigten, dass die ursprüngliche Parameterliste, im Wesentlichen aus Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit bestehend, erweitert werden müsste. Für das Wohlbefinden des Nutzers sind auch Tageslicht, Sichtbeziehung nach außen, natürliche Lüftung und Verzicht auf Vollklimatisierung entscheidend. Um diese erweiterten Anforderungen zu erfüllen, ist es erforderlich, die Fassade mit möglichst individuell steuerbaren Funktionen wie Sonnenschutz, Blendschutz und Lichtlenkung zu versehen.

Die Funktionen werden auf dem Glas oder zwischen zwei Gläsern angeordnet, auf dem Glas als Beschichtung oder Siebdruck, zwischen den Gläsern als diskrete Profile (z.B. Spiegellamellen), als reaktive Masse ohne Verbundeigenschaften oder als in die Verbundschicht (Zwischenschicht) eines Verbundglases integrierte Schicht. Letztere stellen Funktionsverbundgläser dar, für die bauartbedingt eine Interaktion mit den Trageigenschaften stattfindet. Daher werden die für diese Bauform geeigneten Funktionselemente nachstehend ihrer Funktion nach kurz erläutert¹.

Elektrochrome Schichten werden durch das Anlegen einer Spannung in einen Ladungszustand versetzt, der die Transmissionseigenschaften für Licht und Wärme verändert. Der Arbeitsbereich für den Gesamtenergiedurchlassgrad wird mit $g = 0,40 \dots 0,14$ und für den Licht-

¹ Eine ausführliche Vorstellung der Funktionsfolien mit Aufbau und Funktionsweise folgt in Kapitel 2.1.

transmissionsgrad mit $T_L = 0,50 \dots 0,15$ angegeben². Damit liegt die Größenordnung der realisierbaren solaren Gewinne zwischen Wärmedämm- und Sonnenschutzglas. Sie sind als Sonnen- und Blendschutz einsetzbar und können in die Gebäudehülle integriert werden (Bild 1).



Bild 1:
Elektrochrome Gläser

Zu beachten ist allerdings, dass die reduzierte Transparenz nach dem Abschalten der Spannung solange erhält bleibt, bis sich der Ladungszustand wieder abgebaut hat. Es muss somit nicht kontinuierlich Energie zugeführt werden, der Zustandswechsel ist jedoch durch eine gewisse Trägheit gekennzeichnet.

Thermotrope Schichten verändern temperaturabhängig ihre Molekulanordnung. Dies bewirkt bei steigenden Temperaturen eine Verdunkelung des Glases, bei Temperaturabnahme stellt sich wieder die transparent erscheinende Ordnung her. Im Gegensatz zu den vorgenannten elektrochromen Schichten muss keine kostenrelevante Energie zugeführt werden, der reversible Vorgang läuft jeweils völlig selbstständig, allerdings mit einer gewissen Trägheit ab. Dies bedingt im konkreten Anwendungsfall eine sorgfältige Entscheidung unter Abwägung des geringen Energieaufwandes und der fehlenden Steuermöglichkeit seitens des Nutzers.

Thermochrome Schichten zeigen, vom Prinzip her, ein ähnliches Verhalten. Die Transmission wird jedoch nur im oberen Strahlungsbereich des sichtbaren Lichts³ reduziert. Daher begrenzt sich die Einsatzmöglichkeit auf eine Sonnenschutzfunktion.

Holographisch-optische Elemente (HOE) bestehen aus Hologrammfilmen, in die die räumlichen Informationen von Linsen einbelichtet wurden. Dies ermöglicht eine Lichtlenkung, die sich, in Abhängigkeit der eingestellten Beugungswinkel, als Belichtungselement zur Erhöhung

² Zum Vergleich: Ein zurzeit übliches, durchschnittliches Wärmedämmglas besitzt $T_L \approx 0,8$ und $g \approx 0,6$.

³ Strahlung der Sonne: UV: 315 - 380 nm; sichtbares Licht: 380 - 780 nm; IR: 780 - 2500 nm

des Tageslichtquotienten⁴ bei tiefen Räumen oder als Sonnen-/ Blendschutz darstellt, siehe Bild 2.



Bild 2: Holographisch-optische Elemente (HOE),
a) Universität Bremen (Lichtlenkung im Dach),
b) Universität Dortmund (Sonnenschutz-Lamellen)

Das umgelenkte Licht ist farbneutral, im Gegensatz zu den allgemein von Hologrammen bekannten Farbeffekten. Daher werden diese Hologramme auch als Weißlichthologramme bezeichnet. Da die Hologramme jeweils nur für den durch die Herstellung definierten Lichteinfallswinkel optimal arbeiten, müssen die Hologramme dem Sonnenstand nachgeführt werden. Sie werden dann drehbar vor der Gebäudehülle angeordnet, im Folgenden als nachführbare Lamelle bezeichnet. Dieser Funktionstyp ist der am weitesten entwickelte in der Gruppe der die Transmission beeinflussenden Schichten, wie die Anzahl an bereits realisierten Referenzobjekten zeigt.

Weitere winkelabhängig-selektive Schichten wurden in der Vergangenheit entwickelt und erprobt. Sie bestehen aus dünnen Schichten, in die eine feine Lamellenstruktur eingeprägt wird, bei Polymerfolien durch Fotopolymerisation infolge Bestrahlung oder bei dünnen Acrylplatten durch Laserschnitte. Die Lamellenstruktur bewirkt für bestimmte Einfallswinkel die

⁴ Tageslichtquotient: Verhältnis der Lichtstärke im Innenraum und im Außenbereich, jeweils bei bedecktem Himmel.

Streuung und Reflektion der Lichtstrahlen. Sie können als Sichtschutz oder als Sonnenschutz ausgeführt werden.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt bei dem Gebäudeentwurf ist die Energieeffizienz von Gebäuden. Im Kontext mit dem voran beschriebenen Behaglichkeitsempfinden bedeutet dies die Reduzierung von Kühllasten und Kunstlichtbedarf. Des Weiteren ist dies aber auch die Nutzung von erneuerbaren Energien durch entsprechende Systeme. Für die Integration in Fassaden finden Photovoltaik-Module (PV-Module) Anwendung und können in oder vor der Gebäudehülle angeordnet werden, siehe Bild 3.



Bild 3: Hauptbahnhof Berlin,
PV-Verglasung der Bahnsteighalle

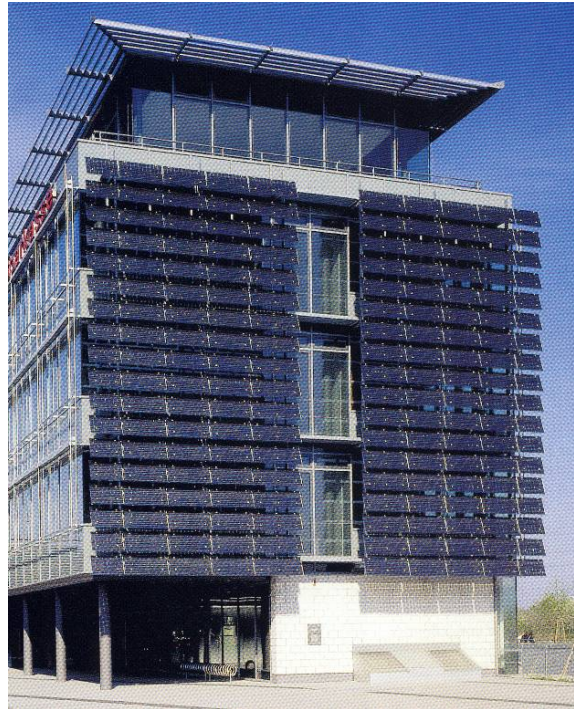


Bild 4: Sparkasse Graben-Neudorf,
Nachführbare PV-Lamellen

Die PV-Module können zusätzlich als Sonnenschutz in Form von nachführbaren Lamellen konzipiert werden (Bild 4). Für die Bestückung der PV-Module gibt es vier verschiedene Zellenarten, die sich in Herstellungsverfahren und -aufwand sowie Wirkungsgrad unterscheiden.

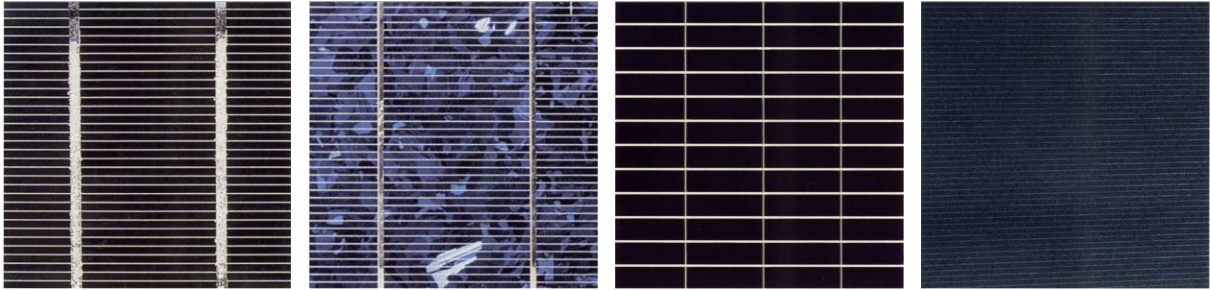


Bild 5: Photovoltaik-Zellen

a) monokristallin, b) polykristallin, c) amorphe Dünnschichtzelle, d) CIS-Dünnschichtzelle

Die monokristallinen und polykristallinen Siliziumzellen mit Schichtdicken von 300 μm besitzen mit 14...16% bzw. 12...14% die höheren Wirkungsgrade, sind jedoch in der Herstellung aufwendiger. Die Dünnschichtzellen als amorphe Siliziumzelle oder als CIS-Dünnschichtzelle⁵ erfordern durch geringere Schichtdicken (1 μm) einen geringeren Materialaufwand, erreichen jedoch nur Wirkungsgrade von ca. 8%.

Neben den beschriebenen, vorwiegend opaken Modulen sind auch semitransparente Ausführungen entwickelt worden und zwar insbesondere im Bereich der Dünnschichtmodule. Dies ermöglicht die Anordnung vor oder in der Glasfassade unter Aufrechterhaltung einer gewissen Sichtbeziehung nach außen, siehe Bild 6.



Bild 6:

Semitransparente
Dünnschichtmodule
(Umwelt-Campus Birkenfeld)

⁵ CIS : Copper-Indium-Selenid (Kupfer, Indium, Selen)

Der dritte Aspekt aus dem sich Funktionsgläser entwickeln, liegt im Bereich der Gebäudeinformation und Medien. Hier finden band- und flächenartig angeordnete LEDs, Flüssigkristallanzeigen (LCD) sowie holographisch-optische Elemente (HOE) Anwendung, siehe Bild 7.



Bild 7: LEDs in Treppenstufen; LC-Display in Fassade (EXPO 2000); HOE-Display

Eine vergleichende Betrachtung der vorgestellten Beispiele zeigt, dass Funktionsgläser eher kurze Spannweiten aufweisen. Die Wirtschaftlichkeit und die Minimierung von Sichtstörungen erfordern es, den Umfang der Unterkonstruktion zu reduzieren. Dies bedeutet eine Erhöhung der Stützweite durch die Nutzung der in den verschiedenen Konstruktionselementen liegenden Potenziale. Insbesondere gilt dies für die nachführbaren Systeme, da hier noch zusätzlicher Aufwand für Antriebseinheiten und Halterungen entsteht.

1.2. Ziel der Arbeit

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Identifizierung des Tragverhaltens von Funktionsgläsern am Beispiel von Gläsern mit HOE-Folien sowie die Entwicklung von Konzepten für die konstruktive Auslegung der Gläser und ihrer Halterungen. Ein Schwerpunkt hierbei liegt in der Erfassung und gezielten Nutzung der Verbundtragwirkung, die diese Gläser mit den mehrlagigen Funktionszwischen-schichten besitzen.

Diese Arbeit gliedert sich in die folgenden Abschnitte:

Verschiedene Arten von Funktionsschichten, insbesondere die in dieser Arbeit detaillierter betrachteten holographisch-optischen Elemente (HOE), sind mit ihrem Aufbau und Funkti-

onsprinzip in [Kapitel 2](#) zusammengestellt und erläutert. Die sich aus der Nutzung und Fügung ergebenden Einbausituationen und die daraus resultierenden Anforderungen sind dargestellt.

Die Materialien und Halterungen sind in [Kapitel 3](#) mit ihren wesentlichen Eigenschaften vorgestellt.

Auf Basis der zusammengestellten Anforderungen, Spannweiten und Randbedingungen werden in [Kapitel 4](#) verschiedene Tragkonstruktionen für Lamellen entwickelt und Anwendungsbereiche identifiziert.

In [Kapitel 5](#) werden die mechanischen Modelle zur Abbildung des Materialverhaltens der Zwischenschichten und die aktuellen Bemessungskonzepte für Verbund-Sicherheitsglas dargelegt. Experimentelle Untersuchungen an Kleinproben und an Lamellenkonstruktionen mit Spannweiten von einem Fassadenraster werden erläutert und daraus Konstruktionsempfehlungen abgeleitet. Hierbei erfolgt auch ein Vergleich zu dem Verbund-Sicherheitsglas (VSG). Aus den Versuchsdaten werden materialspezifische Größen zur Beschreibung des Verbundverhaltens ermittelt und mit einem FE-Modell verifiziert.

Konstruktionen mit Spannweiten von mehreren Fassadenrastern werden in [Kapitel 6](#) behandelt. Hierzu werden eigene experimentelle und rechnerische Untersuchungen an Lamellen mit gebogenem Glas sowie mit einem hybriden T-Querschnitt vorgestellt.

In dem abschließenden [Kapitel 7](#) werden die Ergebnisse der Arbeit, verbunden mit einem Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf, zusammengestellt.

2. GLASELEMENTE MIT INTEGRIERTEN FUNKTIONEN

Die in der Einleitung vorgestellten Gläser mit eingebetteten Funktionsschichten werden bezüglich ihrer Funktionsprinzipien und Zwischenschichtaufbauten erläutert. Für die lichtlenkenden HOE-Gläser folgt eine Betrachtung der Einbausituationen in Büro- und Geschäftshäusern. Hierbei werden, unter Berücksichtigung der Nutzungs- und der lichttechnischen Anforderungen, Randbedingungen für die Tragkonstruktionen der HOE-Gläser definiert.

2.1. Zwischenschichten mit integrierten Funktionen

In der Einleitung sind Funktionsfolien in ihrer Anwendung erläutert worden. Funktionselemente und -folien werden überwiegend mittels Verbundfolien in ein Verbundglas integriert. Dies ergibt einen mehrlagigen Zwischenschichtaufbau, siehe Bild 8.

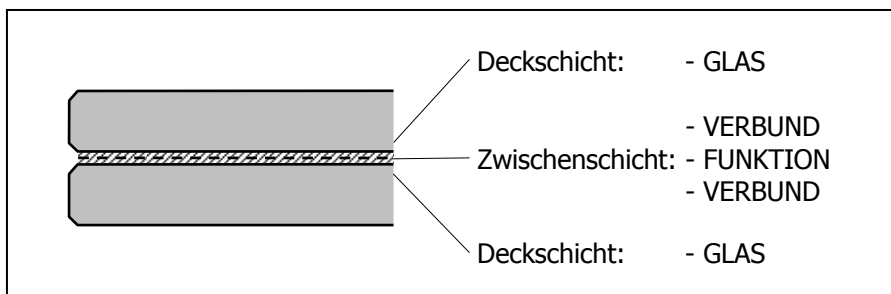


Bild 8:
Aufbau von Verbundgläsern mit mehrlagigen Funktionsschichten

Die Einbettung in das Verbundglas schützt die Funktionsfolie vor Witterungseinflüssen (z.B. Feuchte) und vor mechanischen Beschädigungen. Beschreibungen der Funktionszwischenschichten mit Funktionsprinzip und Zwischenschichtaufbau (i.d.R. mehrlagig) finden sich zum Beispiel in [Achilles et al. 2003], [Compagno 1996] und [Grimm 2004].

Das bekannteste mehrschichtige Glaselement, das Verbund-Sicherheitsglas (VSG), findet neben dem Bauwesen zum Beispiel auch im Fahrzeugbau Verwendung und ist durch eine Polyvinyl-Butyral-Folie (PVB) als Zwischenschicht charakterisiert. Die PVB-Folie stellt gleichzeitig Funktions- und Verbundfolie dar und gewährleistet die Tragfähigkeit und Splitterbindung, wenn einzelne oder alle Scheiben des Scheibenverbunds gebrochen sind.

Eine elektrochrome Schicht besteht aus zwei Lagen unterschiedlichen elektrochromen Materials, die durch eine Polymer-Folie als Ionenleiter getrennt und glasseitig mit transparenten elektronenleitfähigen Folien (TCO)⁶ als Elektrode abgeschlossen sind, siehe Bild 9.

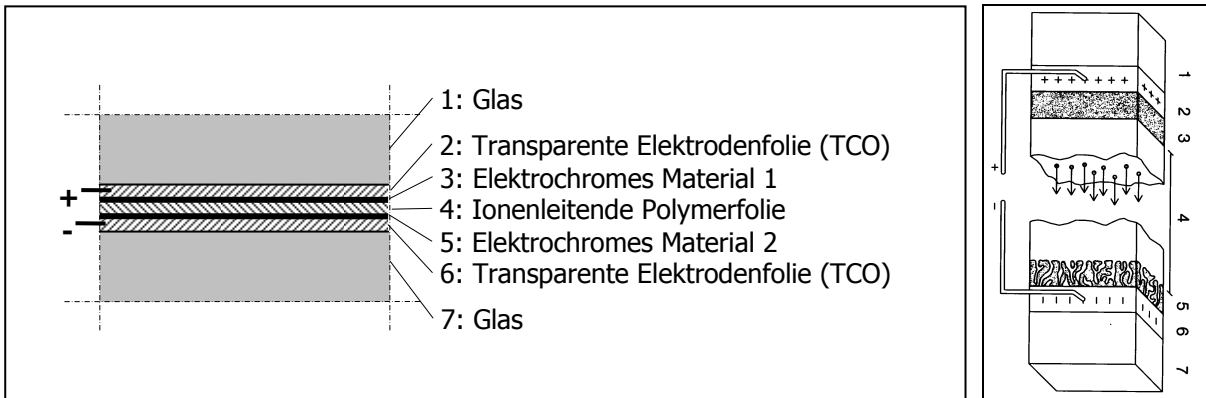


Bild 9: Elektrochrome Schicht, a) Aufbau (schematisch), b) Funktionsprinzip

Wird über die Elektroden (TCO) eine Spannung angelegt, kommt es zu einer Ionenwanderung zwischen den elektrochromen Materialien, die in diesen zu einer Einfärbung und Transparenzänderung führt. Das Prinzip der Ionenwanderung ist vergleichbar mit den Vorgängen in einer wieder aufladbaren Dünnschichtbatterie.

Die elektrochromen Materialien sind so gewählt, dass sie ein komplementäres Verhalten haben. Es wird ein anodisch färbendes Material (z.B. Polyanilin oder Nickeloxid NiO) mit einem katodisch färbenden Material (z.B. Wolframoxid WO₃) kombiniert⁷. Alternativ kann auch ein elektrochromes Material durch einen reinen Ionenspeicher ersetzt werden.

Der Aufbau benötigt über die drei bezeichneten Folien hinaus keine weiteren Verbundfolien.

Thermotrope Schichten bestehen aus einem Hydrogel (Wasser und Kunststoff) oder einem Polymerblend (Mischung aus zwei verschiedenen Kunststoffen). Die Moleküle der Polymeranteile liegen bei niedrigen Temperaturen in gestreckter Anordnung vor. Diese Ordnung löst

⁶ TCO : Transparent and Conductive Oxide

⁷ WO₃ ist blaufärbend, NiO ist braunfärbend

sich mit steigenden Temperaturen auf und bewirkt dadurch eine Streuung des Lichts, als reduzierte Transparenz ersichtlich. Die Hydrogele erfordern, im Gegensatz zu den Polymerblends, wegen des Wasseranteils Zusatzmaßnahmen zur Sicherstellung der Frostsicherheit. Die Schichtdicken liegen bei ca. 1 mm.

Flüssigkristall-Schichten (LC-Schicht)⁸ bestehen aus einer Flüssigkristall-Lage, die beidseitig mittels TCO-Folien abgeschlossen und eingebettet werden, siehe Bild 10.

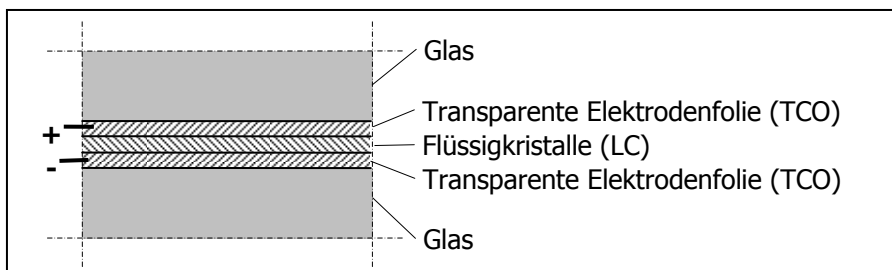


Bild 10:
LC-Schicht
- Aufbau (schematisch)

Im spannungslosen Zustand ist die Molekülanordnung der Flüssigkristalle ungeordnet, das einfallende Licht wird gestreut und die LC-Schicht erscheint opak. Mit dem Anlegen einer Spannung richten sich die Moleküle entlang des elektrischen Feldes zwischen den Elektroden aus und die Schicht wird transparent.

Die Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich, neben den bereits erläuterten Displays in Fassaden, auch als Sichtschutz im Innenbereich (z.B. Besprechungsräume). Hierbei ist jedoch zu beachten, dass das System im spannungslosen Zustand opak ist.

Die mit Leiterbahnen verbundenen Siliziumzellen der Photovoltaik-Module werden mit zwei beidseitig angeordneten Verbundfolien (z.B. EVA-Folien⁹) oder in einem Gießharzverguss eingebettet, siehe Bild 11.

⁸ LC : Liquid Cystal
LCD : Liquid Cystal Display

⁹ EVA : Ethylen-Vinylacetate-Copolymer

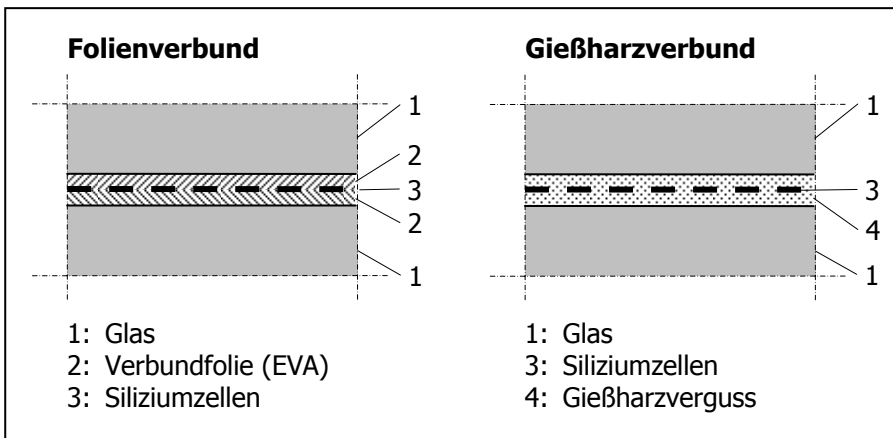


Bild 11:
PV-Schicht
- Aufbau (schematisch)

Die mono- und polykristallinen Siliziumzellen werden über sichtbare, aufgelötete Leiterbahnen elektrisch verbunden (vgl. Bild 5). Bei den Dünnschichtzellen finden dagegen TCO-Folien zur unsichtbaren Verbindung Verwendung. Wegen der thermischen Beanspruchungen sind vorgespannte Gläser als Deckschichten die Regel.

Für LEDs stehen ebenfalls zwei verschiedene Einbettprinzipien zur Verfügung, siehe Bild 12.

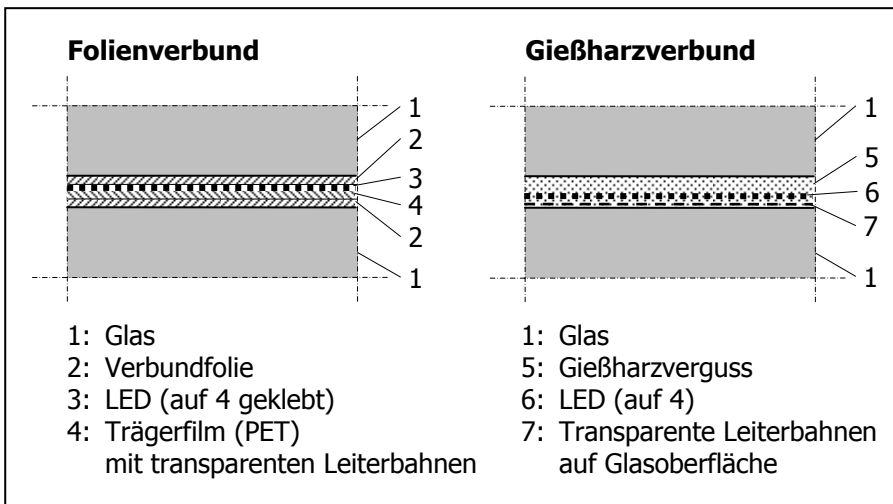


Bild 12:
LED-Schicht
- Aufbau (schematisch)

Der Folienverbund ermöglicht eine Entkopplung der Fertigung von LED-Matrix und Verbundglas. Die LEDs werden auf einem transparent metallisierten PET-Film¹⁰ elektrisch leitend auf-

¹⁰ PET : Polyethylenterephthalat

geklebt, es entsteht ein eigenständiger, transportfähiger LED-Film. Dieser wird in einem zweiten Prozess mittels zweier Verbundfolien zu einem Verbundglas laminiert. Als Verbundfolien sind PVB, EVA und TPU¹¹ möglich.

Bei dem Gießharzverbund werden die LEDs auf einer inneren Oberfläche des Grundglases aufgebracht und mit transparenten Leiterbahnen verbunden. Das Deckglas wird mit Abstand aufgesetzt und der Zwischenraum mit Gießharz vergossen.

Holographisch-optische Elemente (HOE) haben vielfältige Einsatzmöglichkeiten in Fassaden- und Dachverglasungen. Entsprechend der Farbigkeit des gebeugten Lichts können zwei Anwendungsgruppen unterschieden werden. Die Weißlichthologramme bewirken eine farbneutrale Lichtlenkung (vgl. Bild 2). Die Display- sowie Gitterhologramme erzeugen eine Dispersion in Spektralfarben und sind als Informationsträger oder zur Farblichtgestaltung einsetzbar (vgl. Bild 7 c)).

Die Lichtlenk-HOE können für zwei Anwendungssituationen ausgelegt werden, als Belichtungselement zur natürlichen Belichtung oder als Verschattungselement zur Reflektion des direkten Sonnenlichts, siehe Bild 13.

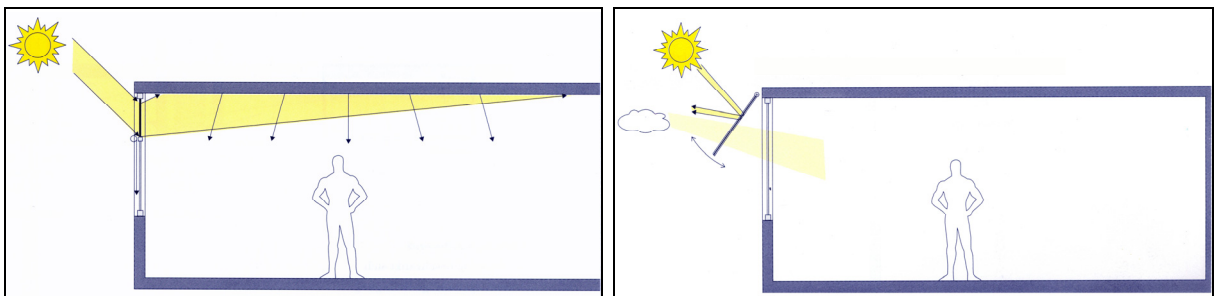


Bild 13: Holographisch-optische Elemente (HOE)
a) Belichtungselement, b) transparentes Verschattungssystem [Müller et al. 1997]

Die Belichtungselemente vergrößern die natürlich belichtete Raumtiefe und ermöglichen dadurch eine Qualitätssteigerung der Arbeitsplatzbedingungen sowie die Reduzierung des E-

¹¹ TPU : thermoplastische Polyurethane

nergieaufwands für künstliche Belichtung. Der Einbau der Lichtlenkelemente kann in der raumabschließenden Fassade erfolgen.

Die Verschattungselemente dienen als Sonnenschutz mit Diffuslichtdurchlass. Im Gegensatz zu Jalousien besitzen sie ein annähernd transparentes Erscheinungsbild und ermöglichen dadurch eine gewisse Blickbeziehung nach außen.

Bei der Integration dieser Lichtlenkgläser ist zu berücksichtigen, dass die HOE für einen begrenzten Lichteinfallswinkel¹² ausgelegt werden. Um einen gleichmäßigen Wirkungsgrad über den gesamten Nutzungszeitraum zu gewährleisten, ist in der Regel die Kombination mit einer motorisch betriebenen und in Abhängigkeit des Sonnenstands gesteuerten Nachführung (Rotation) der Lichtlenkgläser notwendig [Müller et. al. 2005].

Die HOE-Folie besteht, ähnlich einem Fotofilm, aus einer Trägerfolie mit einer Beschichtung. In diese werden die Hologramm-Informationen mittels Belichtungs- und Entwicklungsprozessen eingeprägt. Die Einbettung erfolgt, wie bei den PV-Elementen, mit einem Folienverbund und ist wegen der zerstörenden hygroskopischen Eigenschaft der Hologramme zwingend notwendig, siehe Bild 14.

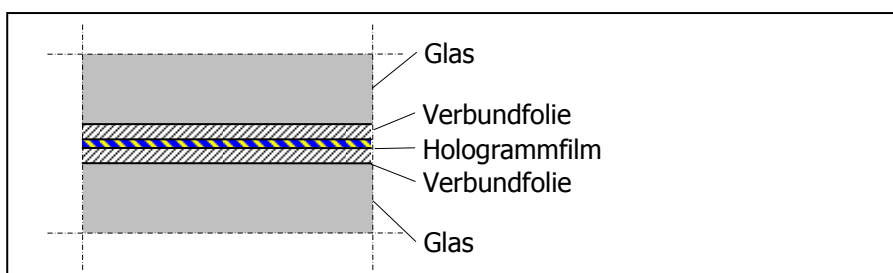


Bild 14:
HOE-Schicht
- Aufbau (schematisch)

Im Vergleich mit anderen Funktionszwischen-schichten weist der HOE-Film den Vorteil eines durchgehenden und tragenden Elements im Folienverbund auf. Als Verbundfolien sind ebenfalls PVB, EVA und TPU möglich, wobei die chemische Verträglichkeit der einzelnen Schichten zu gewährleisten ist.

¹² Der Arbeitsbereich des Lichteinfallswinkels beträgt $\beta \approx \pm 25^\circ$. Dieser wird in einem Zeitraum von ca. 3 Stunden durchlaufen.

2.2. Einbausituationen von HOE in Geschossbauten

Die Anwendungsbereiche für HOE-Funktionsgläser befinden sich schwerpunktmäßig in Büro- und Geschäftshäusern und sind schematisch in Bild 15 dargestellt.

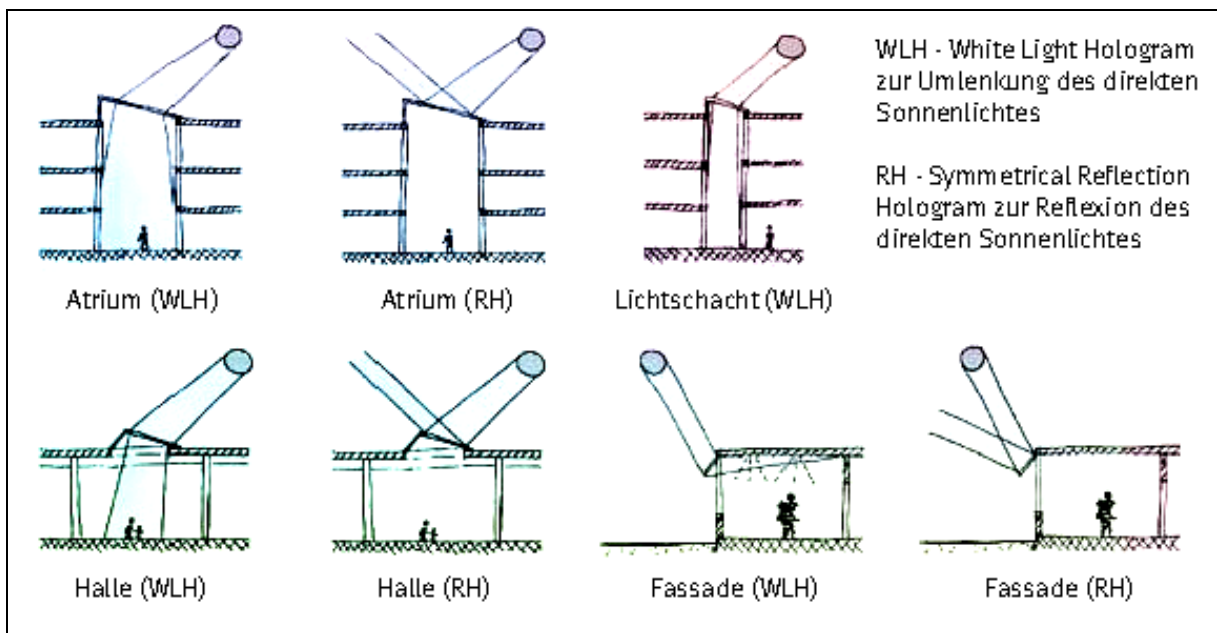


Bild 15: Anwendungsmöglichkeiten von HOE

Für diese Gebäudetypen lassen sich die folgenden Einbausituationen identifizieren:

- Lage im Gebäude
 - Dachbereich
 - Fassadenbereich
- Befestigung der Fassadenelemente
 - Starr innerhalb der Fassadenkonstruktion
 - Drehbar
- Orientierung der Gläser
 - liegend
 - stehend
- Halterung der Gläser
 - 4-seitig
 - 2-seitig
 - punktuell

In Abhängigkeit des Anwendungstyps (Belichtungs- oder Verschattungstyp) lassen sich folgende Prinzipien bezüglich der Anordnung von HOE und Gebäudehülle definieren (Bild 13):

- HOE als Belichtungselemente, vorwiegend in starrer Anordnung, können in die Gebäudehülle integriert werden. Die Verglasung stellt somit sowohl Wetterschutz als auch Funktionselement dar.
- HOE als Verschattungselemente sind, bedingt durch die Nachführbarkeit, in einer zweiten Ebene anzuordnen. Diese liegt wegen der Sonnenschutzfunktion außerhalb der Gebäudehülle. Seitens der HOE-Gläser kann somit keine wetterdichte Gebäudehülle realisiert werden.

2.2.1. Fassade

Für die Einbausituation an der Fassade eines Gebäudes sind die gängigsten Prinzipien für die Ausbildung der Fassaden zu betrachten. Hierbei ist es vorerst ohne Belang, ob es sich um HOEs mit oder ohne Nachführbarkeit handelt. Die möglichen Befestigungspunkte sind von der Orientierung der Lamellen (horizontal oder vertikal) und der Ausbildung der Fassade (geschoss hohe Fassadenelemente oder Fensterbänder mit tragenden Brüstungen) abhängig:

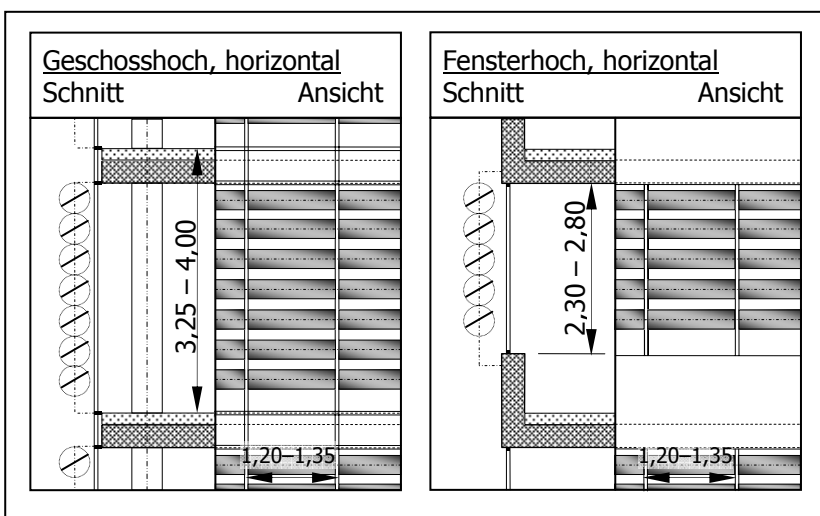


Bild 16:
Befestigungspunkte
für horizontale Lamellen

- Bei horizontaler Anordnung der Lamellen ergibt sich eine Befestigungsmöglichkeit in jedem Fassadenraster, siehe Bild 16. Diese betragen in Europa in der Regel zwischen 1,20 und 1,375 m [Hascher et al. 2002].
- Bei vertikaler Anordnung der Lamellen und geschosshohen Fensterelementen befinden sich Befestigungsmöglichkeiten in jeder Deckenebene, siehe Bild 17. Daher korrespondiert die Spannweite der Lamellen mit den üblichen Geschosshöhen von Verwaltungsbauten. Diese lassen sich mit 3,25 bis 4,00 m angeben [Eisele/ Kloft 2002].
- Bei vertikaler Anordnung der Lamellen und Fensterbändern mit tragenden Brüstungen können die Spannweiten aus den Fensterhöhen und dem erforderlichen Randabstandes für den Anschluss der Konstruktion ermittelt werden, siehe Bild 17. Aus einer üblichen lichten Raumhöhe von ca. 3 m und einer Brüstungshöhe von mindestens 70 cm (Schreibtisch-Höhe) lässt sich eine Fensterhöhe von ca. 2,30 m abschätzen. Im Falle von nachführbaren Lamellen erhöht sich, wegen des notwendigen Randabstandes für die Befestigung, die Spannweite auf ca. 2,50 m.

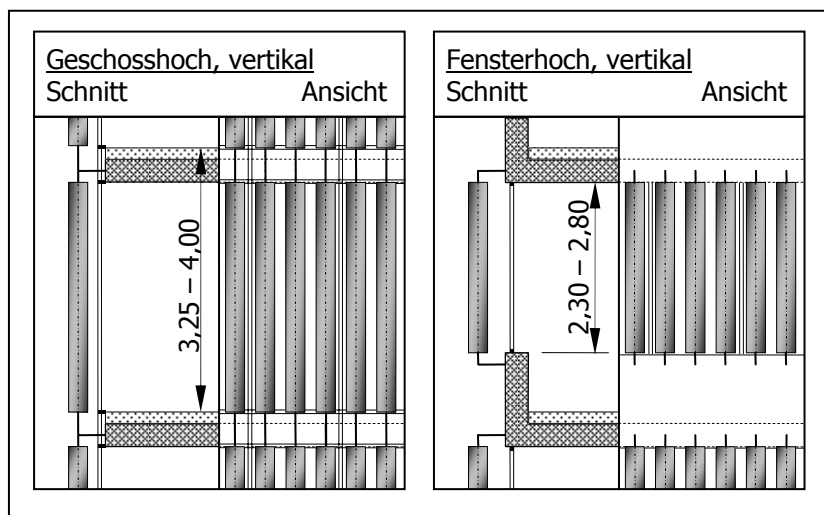


Bild 17:
Befestigungspunkte
für vertikale Lamellen

2.2.2. Dach

Die Konstruktion des Daches unterliegt in der Regel einem Vielfachen des bei den Fassaden angeführten Ausbaurasters ($n \times 1,20 \dots 1,35 \text{ m}$). Für die Lage der Funktionsgläser in Bezug auf die Gebäudehülle sind die folgenden Varianten vorstellbar:

- Nachführbares Funktionsglas oberhalb der Gebäudehülle
- Funktionsglas stellt gleichzeitig auch das Hüllelement dar

Hierbei sollte im Vergleich zur Wandfassade berücksichtigt werden, dass die Raumsituation bei der Dachanwendung in der Regel anders ist. Es handelt sich häufig um transparente Dächer von Gebäudebereichen mit großer Raumhöhe, wie Atrien oder Lichtschächten (Südeuropa). Dies gibt wegen der Raumproportionen die Möglichkeit Konstruktionen mit größerem Querschnitt zu verwenden und somit größere Spannweiten zu überbrücken.

2.3. Anforderungen/ Einwirkungen

Die Anforderungen an die Funktionsgläser definieren sich, neben den spezifischen Anforderungen der Funktionsschichten, über die Anforderungen an die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Bauteilen aus Glas.

Anforderungen an Glaselemente sind in [TRLV 2006] und in [TRPV 2006] unter Verwendung eines globalen Sicherheitskonzepts formuliert:

Tragfähigkeit: vorh. $\sigma \leq$ zul. σ
mit zul. σ (Einbaulage, Glasart)

Gebrauchstauglichkeit: $u \leq \ell/100$
mit ℓ : Stützweite

Weitergehende Empfehlungen für Bemessung und Konstruktion unter Berücksichtigung eines Teilsicherheitskonzepts sind in [BÜV 2001] zusammengefasst. Des Weiteren befinden sich Normenentwürfe in der Bearbeitung, auf nationaler Ebene die „DIN 18008 – Bemessungs- und Konstruktionsregeln für Bauprodukte aus Glas“ und auf europäischer Ebene die „prEN 13474 – Glas im Bauwesen, Bemessung von Glasscheiben“. Die wesentlichen Elementen-

te der Bemessungskonzepte für Glas werden in Kapitel 5.1.2 dargestellt. Darüber hinaus besteht bei Überkopfverglasungen allgemein die Anforderung, dass, im Falle des Bruches aller Glasscheiben einer Verbundglasscheibe, die Zwischenschicht-Folie die Tragfähigkeit unter $\frac{1}{2}$ Verkehrslast sicherstellen und eine Splitterbindung gewährleisten muss, siehe Kapitel 3.2.

Hierfür ist eine genaue Kenntnis des Tragverhaltens der speziellen Funktionsgläser unerlässlich. Dies ist Gegenstand der Tragfähigkeitsuntersuchungen, die in Kapitel 5 und 6 dieser Arbeit beschrieben sind.

Die Aufbauten der Zwischenschichten sind im Hinblick auf Funktion und Dauerhaftigkeit der eingebetteten Funktionsschichten zu konzipieren.

2.3.1. Einwirkungen

Die Konstruktionen sind im Wesentlichen für die Einwirkungen aus Wind und Schnee auszuliegen, siehe Bild 18.

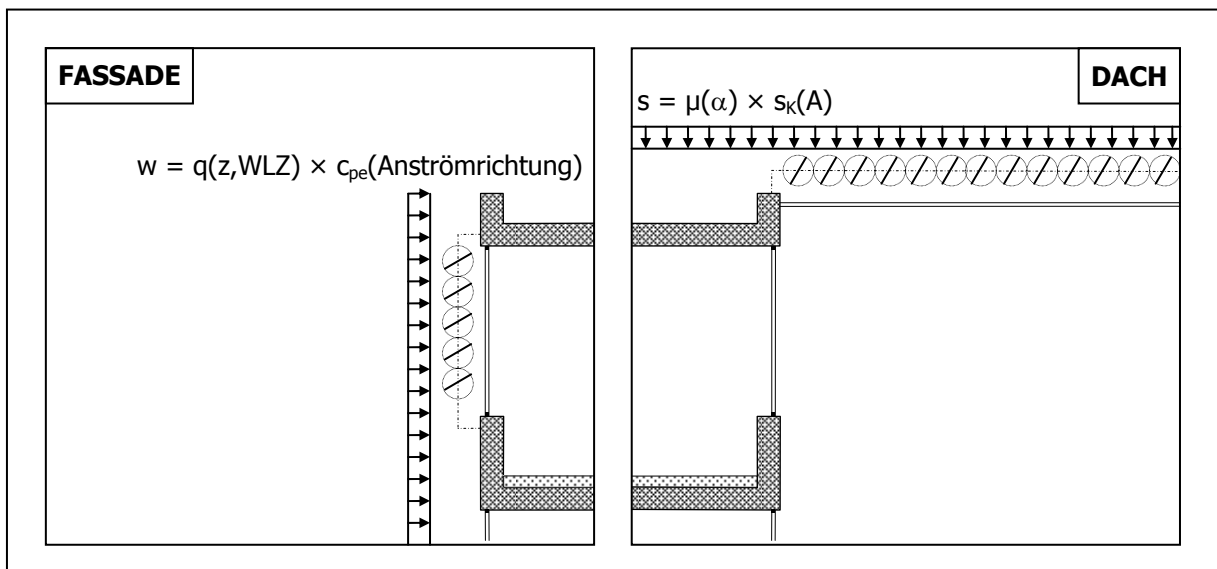


Bild 18: Einwirkungen aus Wind oder Schnee bei Fassaden- oder Dachlamellen

Zur Ermittlung der Einwirkungen aus Wind sind in [DIN 1055-4] Außendruckbeiwerte und Geschwindigkeitsdrücke angegeben:

Außendruckbeiwert $c_{pe,10}$ ¹³

$c_{pe} = +0,8$ Fassade Luvseite

$c_{pe} = -0,5$ Fassade Leeseite

$c_{pe} = -1,4 \dots -0,5$ Windparallele Fassade

Böengeschwindigkeitsdruck $q(z)$ ¹⁴ (Binnenland)

$$q(z) = 1,7 \times q_{ref} \left(\frac{z}{10} \right)^{0,37} \quad \text{für } 7 \text{ m} < z \leq 50 \text{ m}$$

mit

q_{ref} : Geschwindigkeitsdruck

$q_{ref} = 0,32 \text{ kN/m}^2$ (Windlastzone WZ1)

$q_{ref} = 0,39 \text{ kN/m}^2$ (Windlastzone WZ2)

z_e : Bezugshöhe

Die Außendruckbeiwerte in [DIN 1055-4] beschreiben nicht hinterlüftete Wand- und Dachflächen. Für mehrschalige Außenwände oder Dächer finden sich Angaben in [DIN V ENV 1991-2-4], die im Wesentlichen auf Untersuchungen an Außenwandbekleidungen beruhen. Diese Werte lassen zur Berücksichtigung des über die Fassadenöffnungen stattfindenden Druckausgleichs, Abminderungen der Winddruck- bzw. Windsoglasten auf 2/3 bzw. 1/3 der Windlasten einer geschlossenen Außenfassade zu. In [Sedlacek et al. 1999|2] ist an Beispielen aufgezeigt, dass sich bei belüfteten Doppelfassaden jedoch Werte von ca. 60-100% der Windlasten der geschlossenen Fassade ergeben und die im EC1 abgebildeten Verhältnisse nicht übertragen lassen. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird daher der ungeminder-

¹³ $c_{pe,10}$ -Werte für Lastezugsflächen von $A > 10 \text{ m}^2$. Die $c_{pe,1}$ -Werte für Lastezugsflächen $A \leq 10 \text{ m}^2$ finden nur für den Nachweis der Verankerungen und Unterkonstruktionen Anwendung und bleiben bei den nachfolgenden Betrachtungen der Verbundglaselemente unberücksichtigt.

¹⁴ Die angegebenen Bauwerkshöhen und das Geländeprofil korrespondieren mit den üblichen Anwendungsbereichen von Büroskelettbauten. Für größere Bauwerkshöhen bzw. die Küsten- und Inselregionen befinden sich weitere Angaben in der Norm.

te Windlastansatz der [DIN 1055-4] verwandt, der die in Bild 19 dargestellten Winddrücke ergibt.

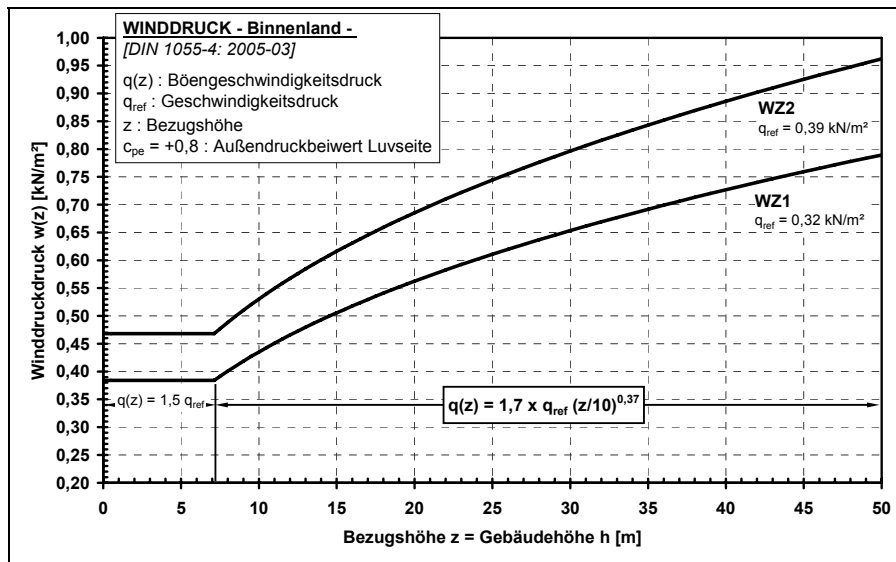


Bild 19:
Winddruck für
Außenwand luvwärts

Die Formbeiwerte μ und charakteristischen Werte s_k zur Ermittlung der Einwirkungen aus Schnee sind in [DIN 1055-5] angegeben:

Formbeiwerte

$$\mu = 0,8 \quad \text{für Dachneigungen } 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$$

$$\mu = 0,8 \frac{60^\circ - \alpha}{30^\circ} \quad \text{für Dachneigungen } 30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$$

Charakteristische Werte der Schneelast [kN/m²]

$$s_{k,1} = 0,19 + 0,91 \left(\frac{A+140}{760} \right)^2 \geq 0,65 \quad \text{für Schneelastzone 1}$$

$$s_{k,1a} = s_{k,1} \times 1,25 \geq 0,81 \quad \text{für Schneelastzone 1a}$$

$$s_{k,2} = 0,25 + 1,91 \left(\frac{A+140}{760} \right)^2 \geq 0,85 \quad \text{für Schneelastzone 2}$$

$$s_{k,2a} = s_{k,2} \times 1,25 \geq 1,06 \quad \text{für Schneelastzone 2a}$$

$$s_{k,3} = 0,31 + 2,91 \left(\frac{A+140}{760} \right)^2 \geq 1,10 \quad \text{für Schneelastzone 3}$$

mit

A: Geländehöhe über Meeresniveau

Für Flachdächer ergeben sich die in Bild 20 dargestellten Schneelasten.

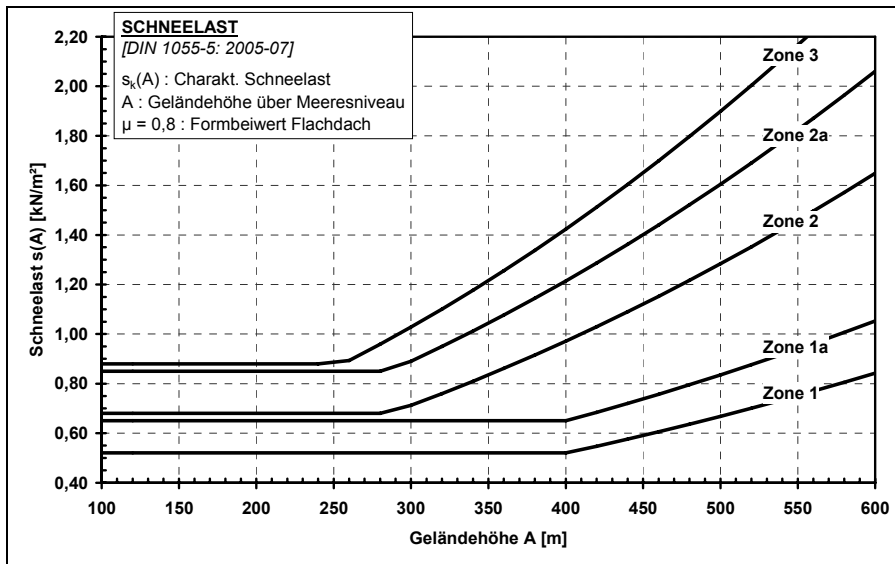


Bild 20:
Schneelasten für
Flachdächer

Im Weiteren können sich noch Beanspruchungen aus Temperatur und im Falle von nachführbaren Lamellen, aus Schadensszenarien an der Mechanik ergeben. Letztere resultieren daraus, dass nachführbare Lamellen in der Regel an jedem Ende mit einer Welle gelagert sind, wobei eine Welle angetrieben und die andere Welle frei drehbar ist. Im Fall einer Blockade des freien Drehlagers, zum Beispiel bedingt durch einen Lagerschaden, erfährt die Lamelle bis zum Abschalten des Antriebs (z.B. durch Rutschkupplung oder Schutzschalter) eine Verdrillung, wodurch Beanspruchungen in der Lamelle entstehen.

Da es sich üblicherweise um Außenbauteile handelt, erfahren diese Längenänderung aus Temperatur. Damit dies nicht zu Beanspruchungen in den Bauteilen führt, sind die Lagerungssituationen so auszubilden, dass die Längenänderungen nicht behindert werden. Des Weiteren sind die unterschiedlichen Längenausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien zu beachten.

3. KOMPONENTEN UND MATERIALIEN

Im Folgenden werden die relevanten Materialien und Konstruktionselemente für Glas, Folien und Halterungen vorgestellt.

3.1. Glas (Deckschicht)

In den betrachteten Fassadenverglasungen finden im Float-Verfahren hergestellte Flachgläser aus Kalk-Natronsilicatglas Anwendung. Werkstoff-Eigenschaften und Herstellung dieser Gläser sind in [Scholze 1988] und [Petzold et al. 1990] sowie unter Berücksichtigung ihrer Anwendung in [Bucak 1999], [Sedlacek et al. 1999|1] und [Wörner et al. 2001] beschrieben.

Die Glaseigenschaften Porenfreiheit und Dichtigkeit machen es besonders geeignet zum Schutz der Funktionsschichten und somit zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit.

Die mechanischen Eigenschaften im baupraktischen Temperaturbereich sind gekennzeichnet durch ein elastisches Verhalten unterhalb der Biegezugfestigkeit und bei deren Überschreitung durch ein Versagen in Form eines spröden Bruches. Das Stoffgesetz lässt sich mit dem Hookschen Gesetz beschreiben. Die Materialparameter sind in Tabelle 1 angegeben.

Elastizitätsmodul E	70000 N/mm ²
Poisson-Zahl μ	0,2
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	9×10^{-6} K ⁻¹
Dichte ρ	2500 kg/m ³

Tabelle 1: Eigenschaften von Glas [DIN EN 572]

Die Glas-Festigkeit ist kein konstanter Materialkennwert, sondern wird durch die Oberflächenqualität und eine Vielzahl weiterer Parameter beeinflusst, die zum Beispiel in [Fink 2000] dargestellt sind. Die wesentlichen Punkte seien nachfolgend zusammengefasst.

Die theoretische Festigkeit von Glas, die sich auf Basis der molekularen Bindungen ermitteln lässt, beträgt 5000...8000 N/mm². Die Oberflächen der Gläser weisen jedoch naturgemäß Beschädigungen, meistens in Form von Rissen, auf, die sich durch mechanische Einwirkungen, sowohl im Herstellprozess als auch im Gebrauch, ergeben und nicht vermeiden lassen. Durch diese mikroskopischen und makroskopischen Oberflächendefekte ergibt sich eine geringere Festigkeit, die bei der Bemessung im Bauwesen zugrunde zu legen ist.

Hierzu eine kurze Betrachtung der Verhältnisse an einem Riss. Unter einer Zugbeanspruchung entstehen am Rissgrund Spannungsspitzen, die sich mit Hilfe der Bruchmechanik beschreiben lassen. Überschreiten diese Spannungsspitzenwerte die theoretische Festigkeit des Glases, tritt ein quasi sofortiger Bruch (Spontanbruch) auf. Der Einfluss der Oberflächengröße ergibt sich hieraus durch die Tatsache, dass für die betrachtete Fläche mit zunehmender Größe auch die Wahrscheinlichkeit zunimmt, einen maßgeblichen, bruchauslösenden Oberflächendefekt zu enthalten und findet durch entsprechende Beiwerte in den Bemessungsvorschlägen [Shen 1997] und [Sedlacek et al. 1999]1] Berücksichtigung.

Zur Erläuterung des Einflusses von Belastungsgröße, -geschwindigkeit und -dauer sowie des Umgebungsmediums ist eine Betrachtung der Risswachstumsgeschwindigkeit notwendig, eine ausführliche Zusammenstellung hierzu findet sich zum Beispiel in [Fink 2000]. Unter einer Dauerlast kommt es, infolge verschiedener chemischer Prozesse, zu einem langsamen Rissfortschritt, dem unterkritischen Risswachstum. Erreicht die Risstiefe einen bestimmten Wert, der sich über die Bruchzähigkeit K_{IC} und die Biegezugspannung im ungestörten Bereich beschreiben lässt, führt dies zu einem schlagartigen Anstieg der Rissgeschwindigkeit und somit zu dem bekannten plötzlichen, spröden Versagen. In lastfreien Perioden tritt ein entgegengesetzter Effekt auf, das Ausheilen von Rissen. Daraus ergibt sich, dass in Belastungsperioden mit geringer Zugspannung eine Rissfestsetzung erfolgt, bei der die Rissheilung und das unterkritische Risswachstum ungefähr im Gleichgewicht stehen.

Je länger der Belastungszeitraum andauert, umso länger tritt ein unterkritisches Risswachstum auf und somit eine Annäherung der Risstiefe an den Grenzwert für das unterkritische Risswachstum. Dies erklärt den Einfluss der Belastungsdauer und deren Berücksichtigung in den Bemessungsvorschlägen.

Durch einen Anstieg der Luftfeuchtigkeit, als dem im Bauwesen relevanten Umgebungseinfluss, kommt es zu einem Anstieg der Risswachstumsgeschwindigkeit, womit das Erreichen der kritischen Ristiefe beschleunigt wird. Durch eine Reduzierung der Biegezugfestigkeit lässt sich dies im Bemessungsverfahren berücksichtigen.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass steigende Temperaturen ebenfalls mit einer Reduzierung der Glasfestigkeit einhergehen. Die betreffenden Temperaturbereiche sind allerdings, abgesehen von Sonderverglasungen, bautechnisch nicht relevant.

Die Berücksichtigung der beschriebenen, materialspezifischen Eigenschaften führen zu den charakteristischen Biegezugfestigkeiten für Floatglas, siehe Tabelle 2.

Glasart	Biegezugfestigkeit	Quelle
Normal gekühltes Floatglas (SPG)	45 N/mm ²	[BÜV 2001]
Teilvorgespanntes Glas (TVG)	70 N/mm ²	[BÜV 2001], [DIN EN 1863]
Einscheibensicherheitsglas (ESG)	120 N/mm ²	[BÜV 2001], [DIN EN 12150]

Tabelle 2: Charakteristische Biegezugfestigkeiten verschiedener Glasarten

Bei vorgespannten Gläsern (TVG, ESG) ergeben sich höhere Biegezugfestigkeiten, da durch die Einprägung von Eigenspannungszuständen die Glasoberflächen im lastfreien Zustand mit Druckspannungen beaufschlagt sind. Das thermische Vorspannverfahren beinhaltet das Erhitzen des konfektionierten Glases auf ca. 650°C ($T_G + \approx 100^\circ\text{C}$) und dem plötzlichen Abkühlen durch Anblasen mit Luft. Der Grad des Abkühlens entscheidet über die Größe der eingepprägten Vorspannung und somit über die entstehenden Glasart (TVG oder ESG). Dieser Vorgang führt allerdings auch dazu, dass die Glasscheibe ihre im Floatverfahren durch das Zinnbad erzeugte Oberflächen-Planheit etwas verliert. Dies ist im Rahmen der nachstehend erläuterten Weiterbearbeitung zu Verbundglas von Belang.

3.2. Zwischenschicht

Werden Glasschichten durch Zwischenschichten vollflächig miteinander verbunden entsteht Verbundglas (VG) oder Verbund-Sicherheitsglas (VSG). Die namentliche Unterscheidung kennzeichnet die unterschiedlichen Anforderungen an den Verbund und die daraus resultierenden und zur Anwendung kommenden Materialien.

Verbund-Sicherheitsglas hat die folgenden wesentlichen Anforderungen, die sich hauptsächlich bei der Verwendung im Überkopfbereich ergeben, zu erfüllen:

- Splitterbindung

Im Falle eines Glasbruchs dürfen von herabfallenden Glassplittern keine Gefährdungen ausgehen. Hieraus resultiert bei Bauverglasungen im Überkopfbereich die Forderung einer hohen Splitterbindung, die wiederum nur durch eine gute Adhäsion realisiert werden kann.

Im Gegensatz dazu werden die PVB-Folien für den Automobilbau mit einer reduzierten Glashaftung ausgelegt. Dies ermöglicht bei dem Aufschlag eines Körpers das Ablösen der Glassplitter im Anprallpunkt. Die Folie besitzt dadurch eine höhere Durchschlagfestigkeit, da die Gefahr des Abreißens an einer scharfen Splitterkante reduziert ist und sie sich aufgrund ihrer Elastizität frei dehnen kann.

- Ausreichende Resttragfähigkeit der gebrochenen VSG-Scheibe

Die gebrochene Scheibe muss über einen bestimmten Zeitraum, in der Regel mindestens 24 Stunden, den Lastabtrag unter mindestens $\frac{1}{2}$ Verkehrslast sicherstellen. Hierbei ist eine ausreichende Dehnsteifigkeit der Zwischenschicht von Bedeutung. Im Falle des Glasbruchs kann sich die zugseitige gebrochene Scheibe nicht mehr am Lastabtrag beteiligen. Es steht somit nur die Verbund-Folie als Zugband und die druckseitige gebrochene Scheibe als Druckelement zur Verfügung. Der durch den Glasbruch bedingte Steifigkeitsabfall führt bei gleicher Last zu einer deutlich größeren Durchbiegung und damit zu einem Übergang vom Biege- zum Membrantragverhalten. Beides führt in der Folie zu einer Zugbeanspruchung und erfordert ausreichende Reißfestigkeit und Dehnsteifigkeit.

Diese skizzierten Aufgaben der Folie in dem Verbund-Sicherheitsglas resultieren aus den Sicherheitsanforderungen für das Schadensszenario des Glasbruchs. Bei intaktem Glas werden zurzeit hinsichtlich der Tragfähigkeit keine Anforderungen an die Zwischenschicht gestellt. Hinsichtlich der Gebrauchsfähigkeit ergeben sich Anforderungen an die Folie aus dem selbstverständlichen Anspruch der dauerhaften optischen Qualität der Folie. Es dürfen keine Delaminationen (punktuelle Blasenbildung bis zu flächigem Ablösen der Folie) auftreten, die die Durchsicht beeinträchtigen könnten. Bezüglich Tragfähigkeit weisen die Folien aber durchaus Potenzial auf, das es zu identifizieren gilt. Hierzu zeigt die vorliegende Arbeit in Kapitel 5 Ansätze am Beispiel der betrachteten Zwischenschicht auf.

Verbundglas ist gekennzeichnet durch die alleinige Forderung einer vollflächigen Verbindung der Glas-Deckschichten ohne konkrete Lastabtrag-Aufgaben an die Zwischenschicht.

3.2.1. Verbundfolien

Das Verbund-Sicherheitsglas ist gekennzeichnet durch die Verwendung von Polyvinylbutyral (PVB) als Zwischenschicht. Dieses Material ermöglicht über seine Eigenschaften die konstruktiven Anforderungen an das Glas sicherzustellen.

Die PVB-Folie besteht aus PVB-Harz, Weichmachern und Additiven (Stabilisatoren, Färbemittel) und ist in die Gruppe der amorphen Thermoplaste¹⁵ einzuordnen. Die mechanischen Eigenschaften sind von Temperatur und Belastung abhängig.

Für die Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften ist die Glasübergangstemperatur T_G ¹⁶ ein wichtiger Parameter, siehe Bild 21.

¹⁵ Thermoplaste :
Verhalten sich bei niedrigen Temperaturen elastisch und oberhalb einer bestimmten Temperatur viskos fließend. Amorphe Thermoplaste erweichen im Bereich des Glasübergangs [Retting 1991].

¹⁶ Die Glasübergangstemperatur T_G wird auch als Glastemperatur oder Einfriertemperatur T_{ET} bezeichnet. [Menges et al. 2002]

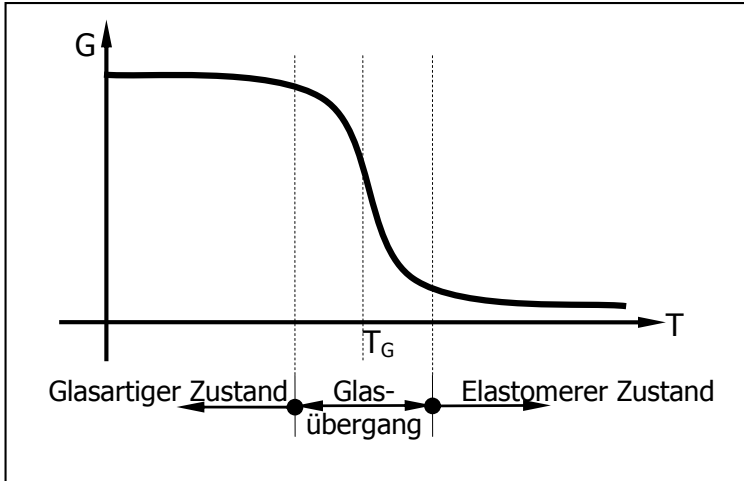


Bild 21:
Schubmodul in Abhängigkeit der
Temperatur bei PVB

Liegt die Temperatur im Glasübergangsbereich ($T \approx T_G$), findet eine starke Erweichung des Materials statt. Dies ist bedingt durch die zunehmende Beweglichkeit der Molekülketten (Fadenmoleküle) und spiegelt sich in einem deutlichen Abfall des Schubmoduls G wieder.

Bei Temperaturen $T < T_G$ liegt der energieelastische Zustand¹⁷ vor, die Moleküle verlieren ihre Beweglichkeit, sie werden quasi eingefroren. Es stellt sich ein annähernd konstanter Schubmodul G ein und es liegt ein linear elastisches Materialverhalten vor.

Der Bereich mit $T > T_G$ ist gekennzeichnet durch entropieelastisches (quasi-gummielastisches) Materialverhalten¹⁸. Die Verformungen treten zeitlich verzögert auf, sind jedoch reversibel.

Bei PVB beträgt $T_G \approx +20^\circ\text{C}$ und liegt im baupraktisch relevanten Anwendungsbereich. Für den Werkstoff ist dies ohne Belang, da der Glasübergang mehrfach durchlaufen werden kann und die damit verbundenen Zustandsveränderungen des Werkstoffs komplett reversibel sind. Die stark unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Aggregatzu-

¹⁷ Energieelastizität definiert sich dadurch, dass die Längenänderung infolge einer Krafteinwirkung nur mit einer Änderung der mechanischen Energie verbunden ist.

¹⁸ Entropieelastizität definiert sich dadurch, dass die Längenänderung infolge einer Krafteinwirkung nur mit einer Änderung des inneren Ordnungszustandes (Entropie) verbunden ist.

stände machen jedoch eine Berücksichtigung bei der Dimensionierung der Querschnitte schwierig.

Für die Glashaftung ist der richtig dosierte Wassergehalt der Folie wichtig und stellt sich in Form von Wasserstoffbrücken zwischen der Glasoberfläche und dem Polymer dar.

Der Herstellungsprozess des VSG - die Fügung von Glas-Deckschichten und PVB-Zwischenschicht - beinhaltet im Wesentlichen die folgenden Stationen [Trosifol 2001]:

- Vorbehandlung der konfektionierten Glasscheiben (waschen, ...)
- Zuschneiden und Verlegen der PVB-Folie
- Vorverbund durch Pressen des Schichtenpakets unter Temperatur
- Endverbund im Luftautoklaven unter Temperatur und Druck

Die Folie wird überwiegend in den Dicken 0,76 oder 1,52 mm verwandt. Die Dicke ergibt sich im Wesentlichen aus den Beanspruchungen im Szenario Glasbruch. Bei vorgespannten Gläsern ist, infolge der bereits erläuterten leichten Unebenheit der Glasoberfläche, mit einer dickeren Folie leichter eine vollflächige Haftung sicherzustellen.

Die wesentlichen Materialparameter von PVB sind in Tabelle 3 angegeben:

Reißfestigkeit	20 N/mm ²
Reißdehnung	300 %
Glastemperatur T _G	≈ 20 °C
Dicke t	0,38; 0,76; 1,52 mm

Tabelle 3: Materialdaten PVB-Verbundfolie

Die bis dato an Verbundgläsern durchgeführten umfassenderen Untersuchungen beschränkten sich auf Verbund-Sicherheitsglas mit PVB-Folie.

Als weitere Verbundfolie finden EVA-Folien (Ethylene-Vinylacetat-Copolymer) Anwendung. Bei den Zwischenschichten für Verbundgläser handelt es sich um ein modifiziertes, teilverseiftes EVAC. Die Weichheit des Materials wird durch den VAC-Gehalt (Vinylacetat) bestimmt [Oberbach 2001]. Die EVA-Folie zeichnet sich gegenüber der gängigen PVB-Folie durch eine sehr gute Haftung und eine gute Reißfestigkeit aus (Tabelle 4), jedoch bei zurzeit ca. doppelten Kosten.

Reißfestigkeit (Tensile Strength)	21,7 N/mm ²
Reißdehnung (Elongation)	530 %
E-Modul E (Young's Modulus)	1,2 N/mm ² bei 23°C
Querdehnzahl μ (Poisson Ratio)	0,32
Glastemperatur T_G (Glass Transition Temperature)	-28 °C
Schmelztemperatur T_M (Melting Temperature)	79 °C
Dicke t	0,4 mm

Tabelle 4: Materialdaten EVA-Verbundfolie

Der Vollständigkeit halber sei Gießharz als weiteres Zwischenschicht-Material erwähnt. Dieses wird häufig bei Photovoltaik-Panelen verwandt. Die Solarzellen werden zwischen zwei auf Abstand gesetzte Scheiben eingebracht und der Scheiben-Zwischenraum mit Gießharz vergossen. Mit dem Erhärten des Gießharzes entsteht das Verbundglas-Element. Untersuchungen an Gießharz-Verbundglas sind in [Siebert 1999] dokumentiert.

3.2.2. HOE-Funktionsfolie

Eine HOE-Folie besitzt einen Aufbau ähnlich eines Foto-Films. Das Hologramm wird in eine DCG-Schicht eingetragen, diese befindet sich auf einem Triacetat-Träger (Unterlage). Materialdaten für den Träger sind in Tabelle 5 angegeben.

Zugfestigkeit (längs quer)	96 98 N/mm ²
Reißdehnung (längs quer)	24 30 %
Streckspannung (längs quer)	84 80 N/mm ²
Dicke t	0,19 mm

Tabelle 5: Materialdaten HOE-Träger

Ein Vergleich mit den Kenndaten der EVA-Folie lässt eine Verbesserung der Dehnsteifigkeit der mehrlagigen HOE-Zwischenschicht erwarten. Dies soll mit den in Kapitel 5 dokumentierten Versuchen identifiziert werden.

3.3. Glashalterungen

Im Folgenden werden kurz die prinzipiellen Halterungstypen für Glas vorgestellt.

3.3.1. Linienlagerung

Die klassische Form der Glashalterung ist die Linienlagerung, siehe Bild 22.

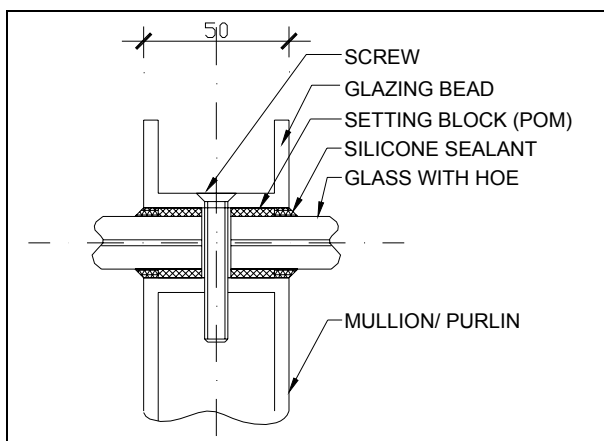


Bild 22: Linienlagerung

Die Glasscheibe wird an mindestens zwei Rändern kontinuierlich aufgelagert und durch eine Glashalteleiste oder eine Glaspresseleiste gehalten. Angaben zu dem erforderlichen Glas- einstand i werden in [DIN 18545] gegeben.

Zur Sicherstellung einer über das Linienlager gleichmäßig und vollflächig verteilten Lasteinleitung und zur Verhinderung des Kontaktes von Glas mit härteren Rahmenmaterialien sind elastische Lagerstreifen anzuordnen. Materialien hierfür sind POM, PA6, EPDM, Silikon, weichgeglühte Aluminiumlegierungen etc.

Die Durchbiegung der Rahmenprofile sollte auf $\frac{1}{200}$ ihrer Länge beschränkt werden.

3.3.2. Punkthalter im Glas

Bei Punkthaltern können die folgenden prinzipiellen Typen unterschieden werden:

- Punkthalter mit durchgehender Bohrung im Glas (durchbindende Punkthalter)
- Punkthalter mit Hinterschnitt-Bohrung (einbindende Punkthalter)

Die durchbindenden Punkthalter bestehen aus einem unterseitigen Auflagerteller mit elastischem Lagerring (z.B. EPDM) und oberseitigem Halteteller in gesenkter oder aufliegender Ausführung.

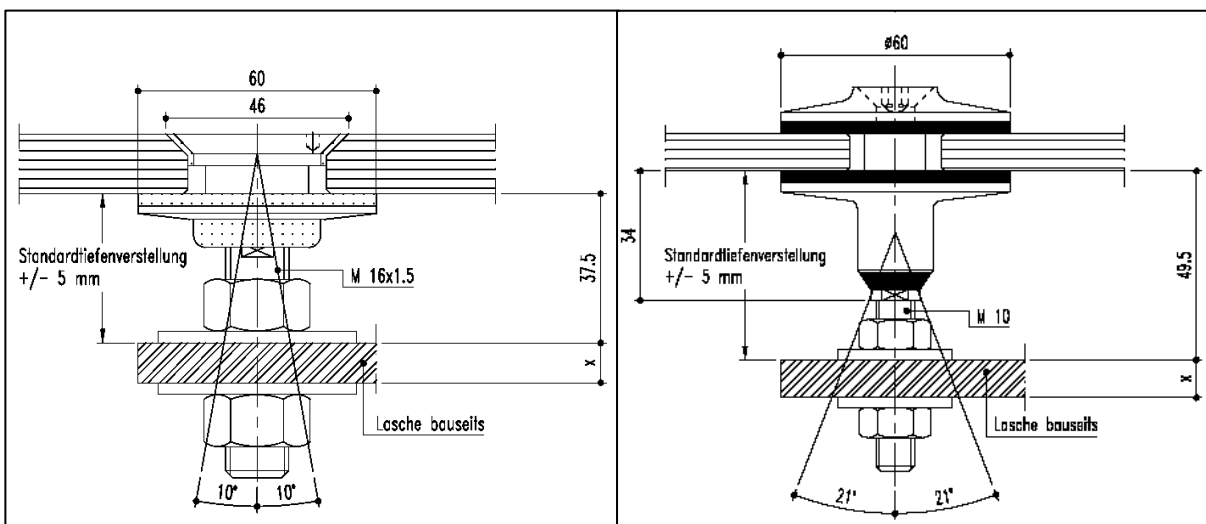


Bild 23: Punkthalter mit unterseitigen oder beidseitigem Teller [SGG]

Im Bereich der Bohrungen verhindern Hülsen aus Lager-Material den Kontakt zwischen Glas und Metall. Der Anschluss an die Fassaden-Unterkonstruktion erfolgt mit einem Bolzen der, je nach Ausführung, mit oder ohne Kugelgelenk mit dem Auflagerteller verbunden ist. Die gelenkige Ausführung dient der möglichst zwängungsfreien Lagerung der Glasscheiben, da

Verdrehungen der Glasscheibe am Auflager nicht behindert werden. Durch Langlöcher in der Unterkonstruktion kann eine ungehinderte Längenänderung bei Temperaturwechsel sichergestellt werden. Hinsichtlich der einzubettenden Funktionen ist die Durchdringung der Zwischenschicht problematisch, da sich die Funktionsfolien teilweise als sehr witterungsempfindlich darstellen und somit einen allseitigen Randabstand erforderlich machen.

Der Punkthalter mit Hinterschnitt zeichnet sich durch eine ungestörte äußere Glasoberfläche aus, Bild 24.

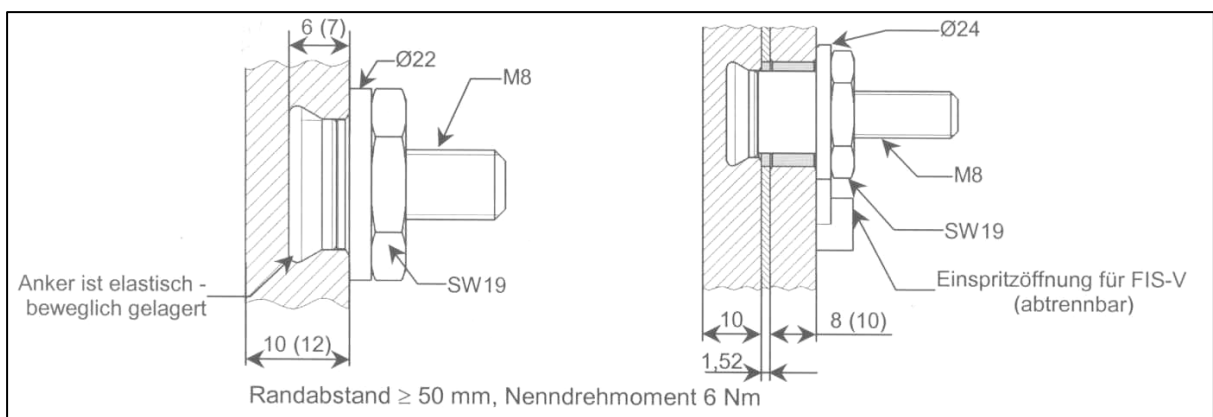


Bild 24: Hinterschnitt-Anker [Fischer 2001]

Der Halter verankert sich im Glas über eine Kegelbohrung. Bei Verbundglas befindet sich die Kegelbohrung in der äußeren Scheibe und in der inneren eine zylindrische Bohrung. Der Vorteil gegenüber den zuvor beschriebenen Haltern besteht in der ungestörten äußeren Glasoberfläche.

3.3.3. Weitere Halterungen

Einige weitere Halterungen sollen nachstehend kurz diskutiert werden:

Klebung zwischen Glas und Glashalterung

Die Klebung ist mit Linienlagerungen und Punktlagerungen der Gläser kombinierbar. Es ist zu beachten, dass, zumindest in der BRD, eine zusätzliche mechanische Sicherung (z.B. Eckklammer) notwendig wird.

Klemmung

Der Vorteil einer Klemmung liegt in der ungestörten Zwischenschicht. Die Klemmung setzt voraus, dass der erforderliche Anpressdruck in der Kontaktfläche dauerhaft vorhanden ist. Dies kann bei den hier behandelten Fassadenelementen wegen den Temperaturschwankungen erhebliche Probleme bereiten und zu der Notwendigkeit einer zusätzlichen mechanischen Sicherung der Verglasung führen, wodurch der genannte Vorteil negiert würde. Aus diesen Gründen wird die Klemmung für innenliegende Bauteile als Variante angesehen.

4. TRAGKONSTRUKTIONEN FÜR LICHTLENK-LAMELLEN

Auf Basis der beschriebenen Anforderungen (Kapitel 2) und Materialeigenschaften (Kapitel 3) werden nachstehend Tragkonstruktionen für lichtlenkende Lamellen entwickelt. Dabei finden verschiedene Möglichkeiten der Lamellenhalterung (starr, nachführbar) und der Glashalterung (liniengelagert, punktgelagert) Berücksichtigung..

4.1. Ebene Einzellamellen

4.1.1. Halterung der Lamelle

Die Halterung der Lamelle ist bestimmt durch die gegebenenfalls notwendige Nachführbarkeit und somit von der Winkelselektivität der HOEs. Damit die Tiefe des Fassadenaufbaus nicht zu groß wird, haben die Lamellen längliche Proportionen und rotieren um die Längsachse, siehe Bild 25.

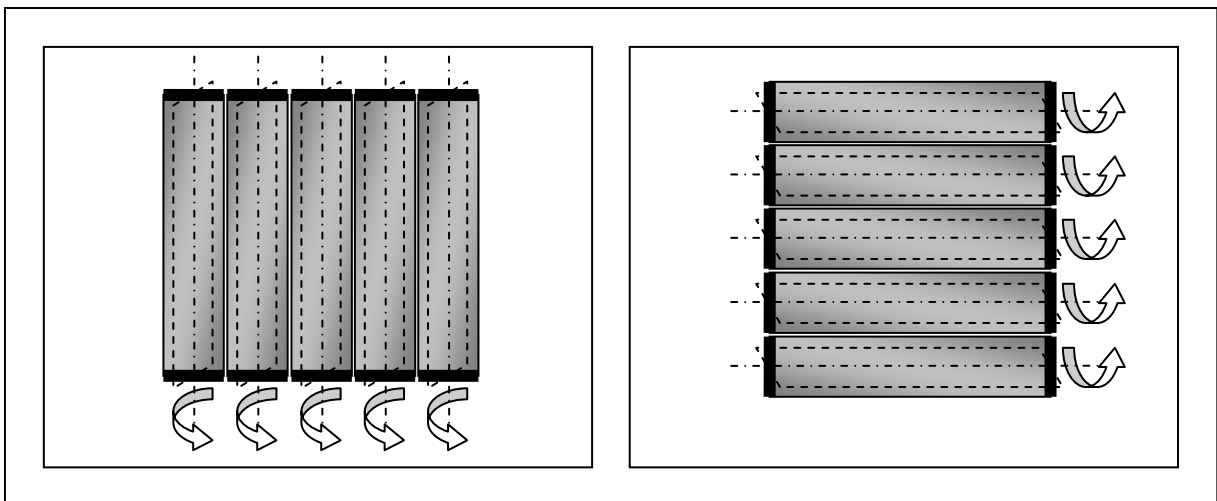


Bild 25: Prinzip nachführbare Lamellen

Die Glasscheiben werden an den Schmalseiten gehalten. Die Antriebsmechanik kann, je nach Lamellenorientierung, verdeckt von der horizontalen bzw. vertikalen Fassaden-

Unterkonstruktionen angebracht werden. Verschiedene Antriebstechniken sind zum Beispiel in [Burg et al. 1996] erläutert.

Konstruktionstypen für Lamellen mit der Spannweite eines Rasters zeigt Bild 26.

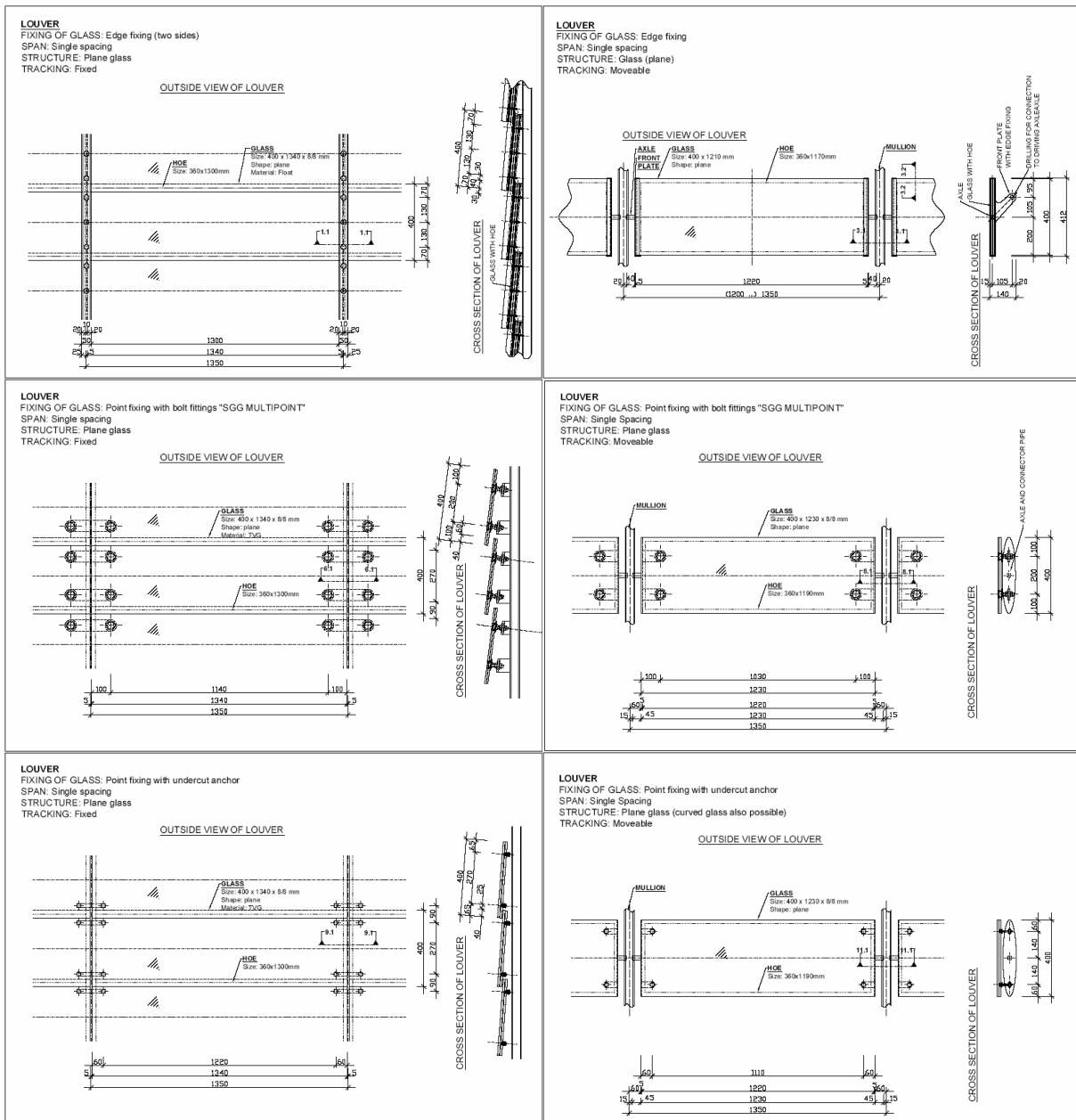


Bild 26: Konstruktionstypen für Einzellamellen in starrer und nachführbarer Ausführung

4.1.2. Glashalterung

Die Halterung der Lamelle ist bei der Auslegung der Glashalterung zu berücksichtigen. Üblicherweise sind Glashalterungen, um Beanspruchungen im Glas aus Verformungsbehinderungen zu minimieren, gelenkig konzipiert, siehe Bild 27.

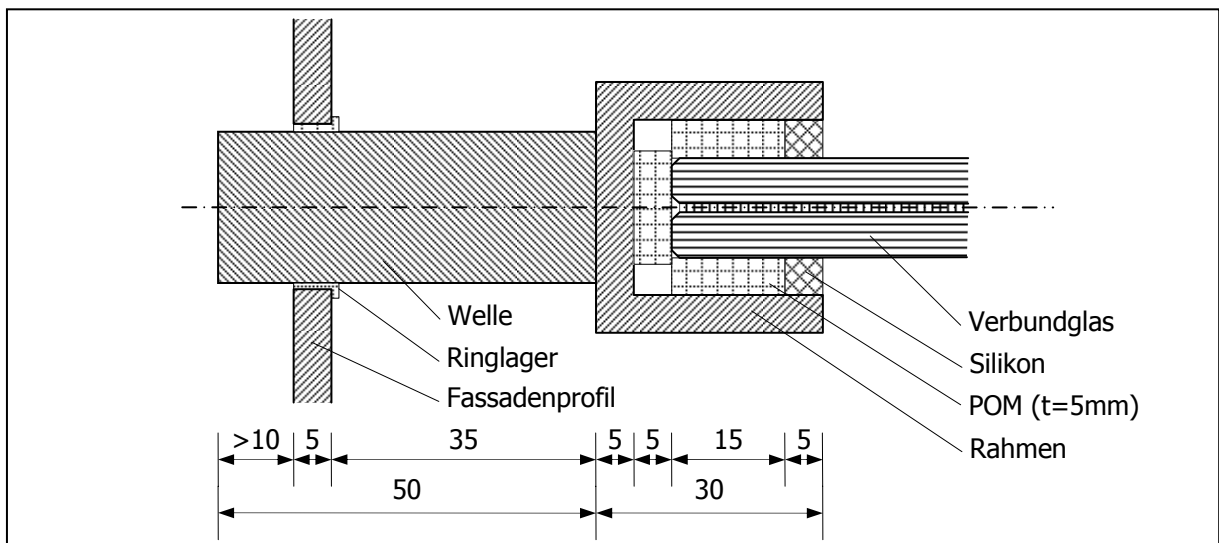


Bild 27: Nachführbare Lamelle mit Linienlagerung des Glases

Bei nachführbaren Lamellen sind Lamellen- und Glashalterung abzustimmen, da entweder Scheibe oder Lamelle gelenkig gelagert werden können, siehe Bild 28.

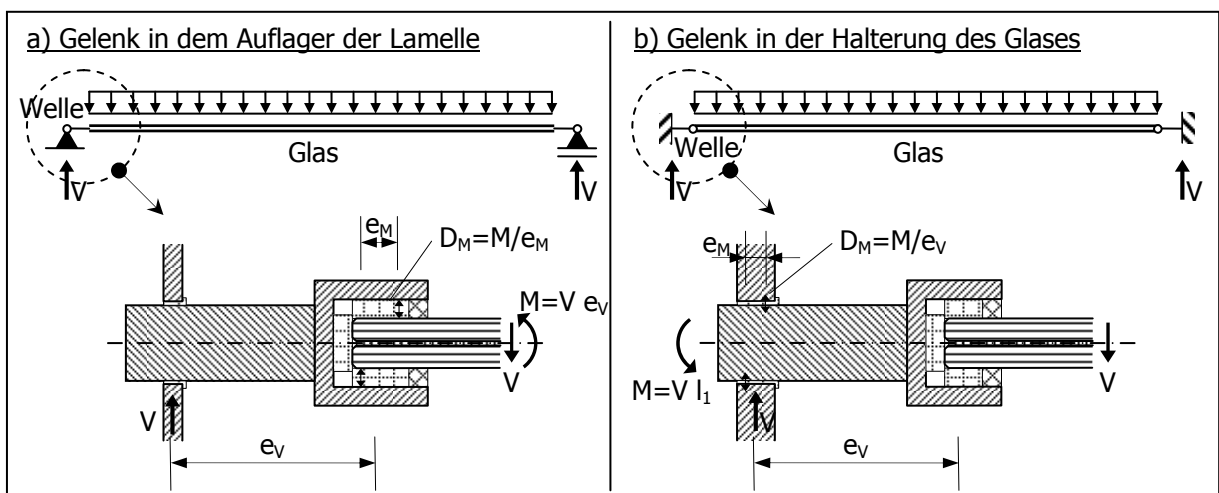


Bild 28: Gelenkige Auflager von nachführbaren Lamellen

Wird die Lamelle gelenkig gelagert, gibt die Welle nur eine Auflagerkraft V an die Unterkonstruktion ab und in der Glashalterung tritt ein Moment M auf. Die Auflager der Gläser (Verklotzung, Versiegelung) müssen in diesem Fall ausreichende Steifigkeit und Abmessungen besitzen, damit sich ein Kräftepaar D_M zur Übertragung von M bei zulässigen Beanspruchungen und Verformungen einstellen kann.

Bei einer gelenkigen Ausbildung der Glashalterung ist die Welle einzuspannen, wodurch sich eine entsprechend kräftigere Unterkonstruktion ergibt.

Die Beanspruchungen in den Glasauflagern bei Einspannung der Glasscheibe und gelenkiger Lagerung der Lamelle sind exemplarisch in Bild 29 abgeschätzt.

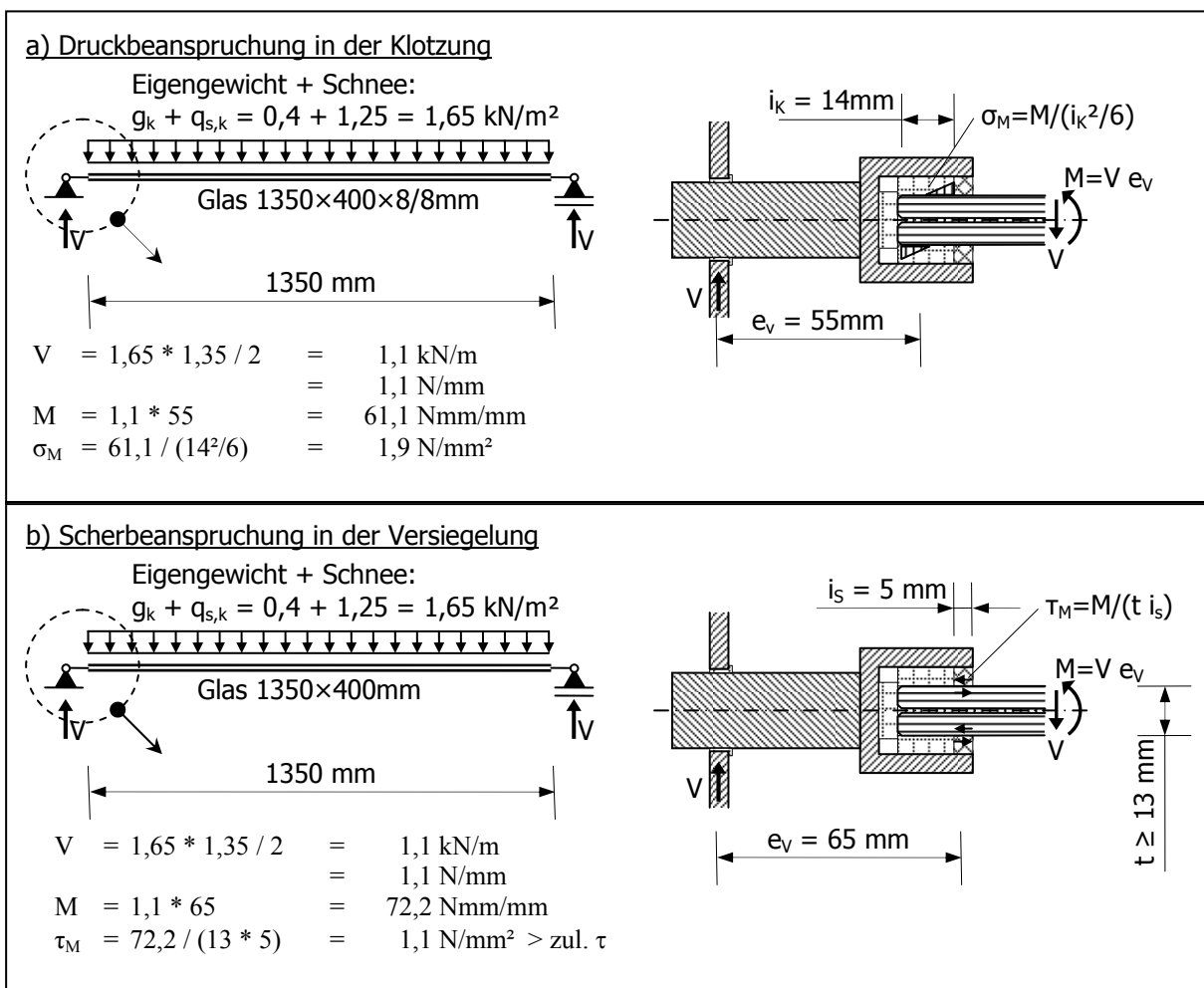


Bild 29: Beanspruchung in der Glashalterung bei eingespannten Gläsern

Die Betrachtungen an den Halterungen (Bild 29) lassen bei der Verklotungen den Schluss auf ein ausreichendes Potenzial zur Aufnahme der Momente zu. Des Weiteren stellt sich eine Einspannung der Welle wegen der beteiligten Bauteile der Antriebsmechanik und der Fassadenkonstruktion als die, auch im Hinblick auf gewünschte Transparenz, weniger sinnfällige Variante dar. Von daher soll mit den experimentellen Untersuchungen an gelenkig gelagerten Einzellamellen die Tragkapazität der Glashalterungen im Hinblick auf die speziellen Anforderungen bei Lichtlenklamellen identifiziert werden (Kapitel 5).

Bei Punkthaltern bestimmen die Überlegungen hinsichtlich der Anordnung des Gelenks die Auswahl des Haltertyps, siehe Bild 30.

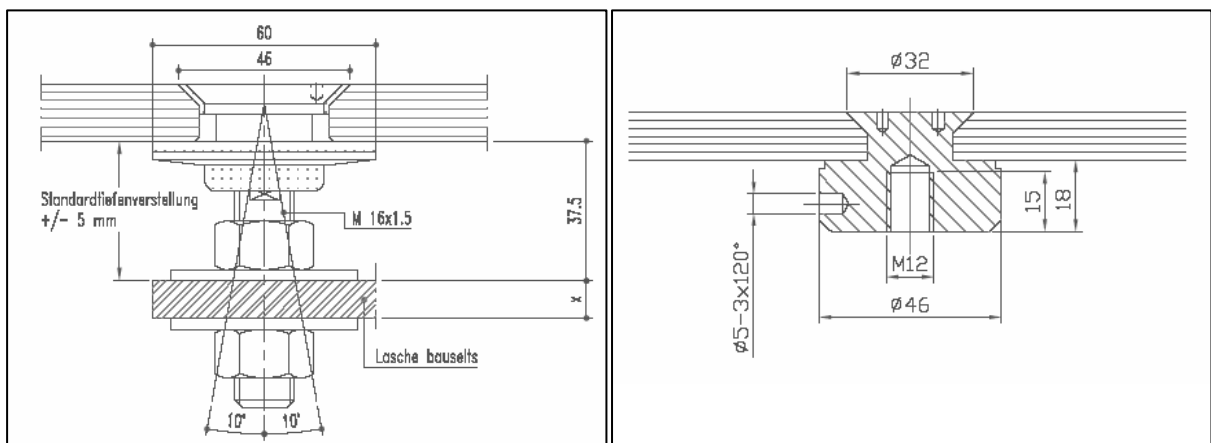


Bild 30: Punkthalter mit und ohne Gelenk [SGG]

Die Halterung des Glases führt zu Anforderungen an das Glasmaterial. Bei Linienlagerungen liegen die größten Beanspruchungen in der Regel im Feld, wogegen sich bei Punkthaltern hohe Beanspruchungen im Halterungsbereich ergeben, die in der Regel die höhere Festigkeit vorgespannter Gläser erfordern.

- Linienlagerung : SPG, (im Falle großer Spannweiten: TVG, ESG)
- Punkthalterung : TVG, ESG

Diese Beanspruchungsverhältnisse treffen bei den punktgehaltenen Lamellen nur bedingt zu.

4.1.3. Lamellen mit Verbindungsrohr

Bei den vorgestellten Konstruktionen übernimmt das Glas Tragaufgaben für die Einwirkungen „Eigengewicht, Schnee, Wind, ...“ sowie infolge des Lamellenantriebs als Verbindung von angetriebener (Festlager) und frei laufender Welle (Loslager), siehe Bild 31.

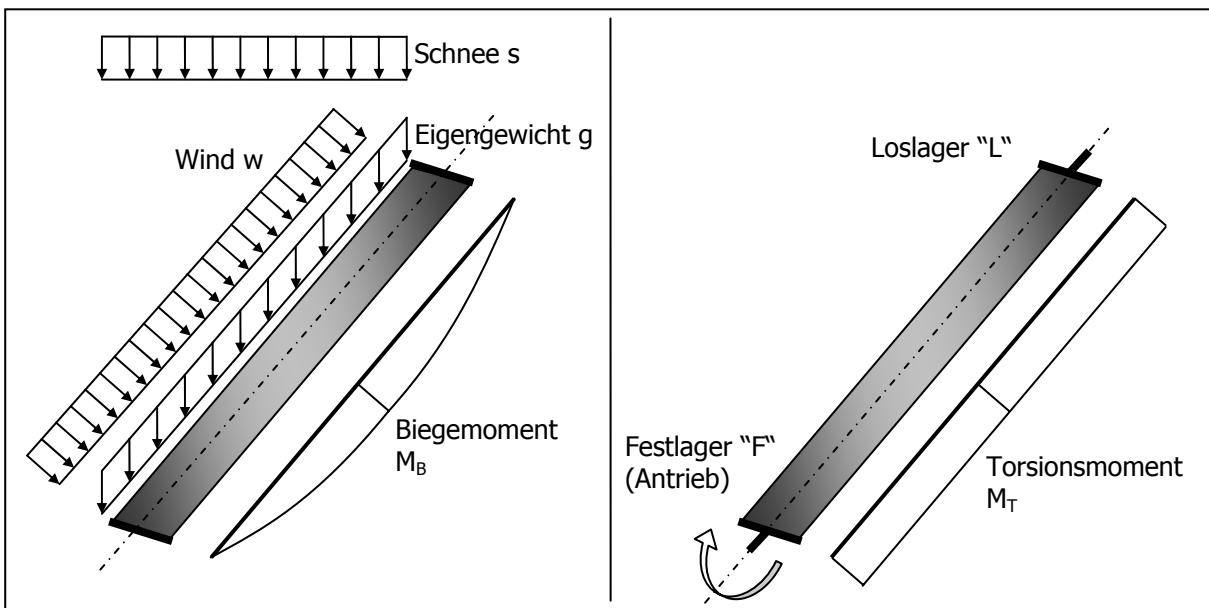


Bild 31: Einwirkungen und Beanspruchungen

Die in Bild 32 dargestellten Lamellen zeigen Konstruktionen mit einer Verbindung der Glashalterungen an den Schmalseiten der Lamellen durch ein Verbindungsrohr.

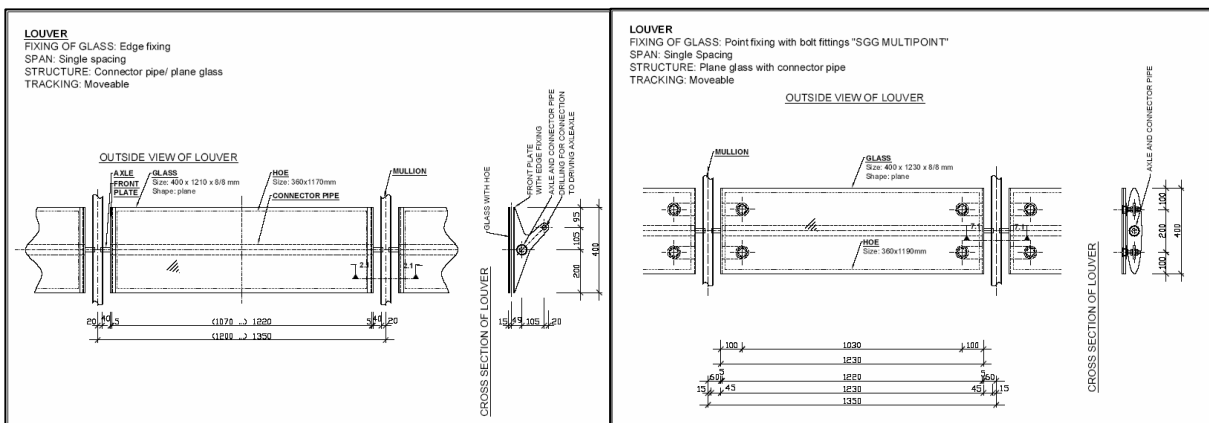


Bild 32: Lamellen mit Verbindungsrohr und Linien- oder Punktverankerung

Dies ermöglicht die Entkopplung der Tragaufgaben (Bild 31) und ergibt für die Glasscheibe nur Biegemomente und für das Verbindungsrohr Torsionsmomente. Weiterhin stellt das Verbindungsrohr ein mit den Auflagerwellen kraftschlüssig verbundenes Tragelement dar und ermöglicht somit eine gelenkige Glashalterung. Diesen konstruktiven Vorteilen steht allerdings der wesentliche Nachteil gegenüber, dass die Transparenz der Lamelle durch die Konstruktionselemente erheblich beeinträchtigt wird. Die Tragrohre sind dann sinnvoll, wenn zur Befestigung zusätzlicher Funktionselemente (z.B. Photovoltaik) ein Profil an den Lamellen notwendig wird.

Die in Bild 33 dargestellte Konstruktion verwendet das Verbindungsrohr zusätzlich als Biegetragelement.

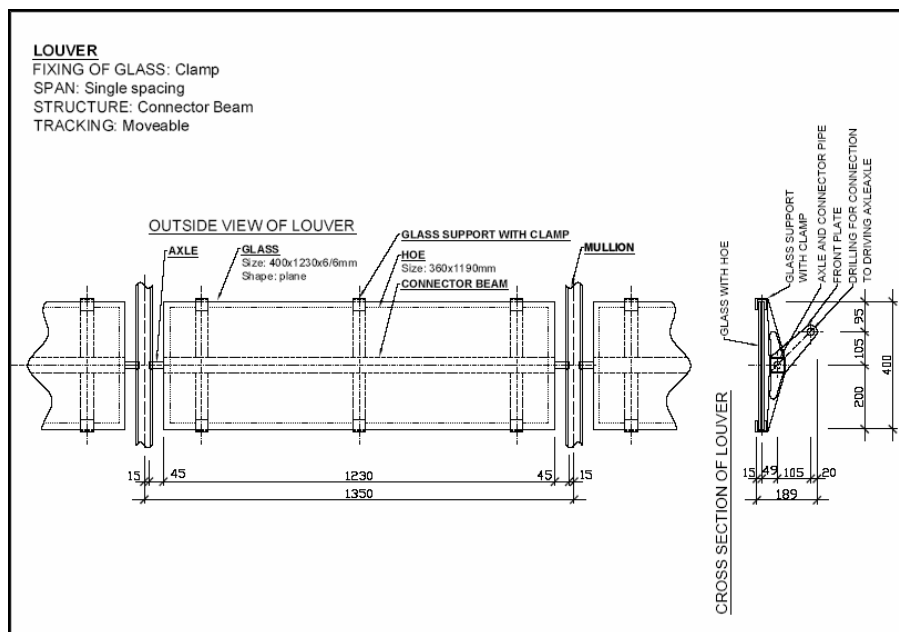


Bild 33:
 Lamelle mit Verbindungsrohr und mehrfacher Halterung am Glaslängsrand

Bei diesem Typus wird das Glas durch das Verbindungsrohr hinsichtlich Biege- und Torsionsbeanspruchung entlastet und die Gläser können dünner ausgeführt werden. Der Lastabtrag des Glases erfolgt in Querrichtung, der kürzeren Richtung. Der wesentliche Vorteil liegt darin, dass eine Verlängerung der Lamelle nur Auswirkungen auf die Dimensionierung des Verbindungsrohres hat. Die Beeinträchtigungen der Transparenz sind allerdings nochmals größer als bei den Konstruktionen in Bild 32.

4.1.4. Glasdimensionierung

Die Beanspruchungen in Verbundgläsern werden nach [TRLV 2006] ohne Berücksichtigung des Schubverbundes ermittelt.

Für Fassadenlamellen mit senkrechter Glasebene ergeben sich die wesentlichen Beanspruchungen aus dem Winddruck auf die Gebäudefassade. Bei liniengelagerten Gläsern lässt sich die aufnehmbare Windlast w_D unter Berücksichtigung der Grenzzustände der Tragfähigkeit (ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (SLS) mit den Beziehungen in Bild 34 angeben.

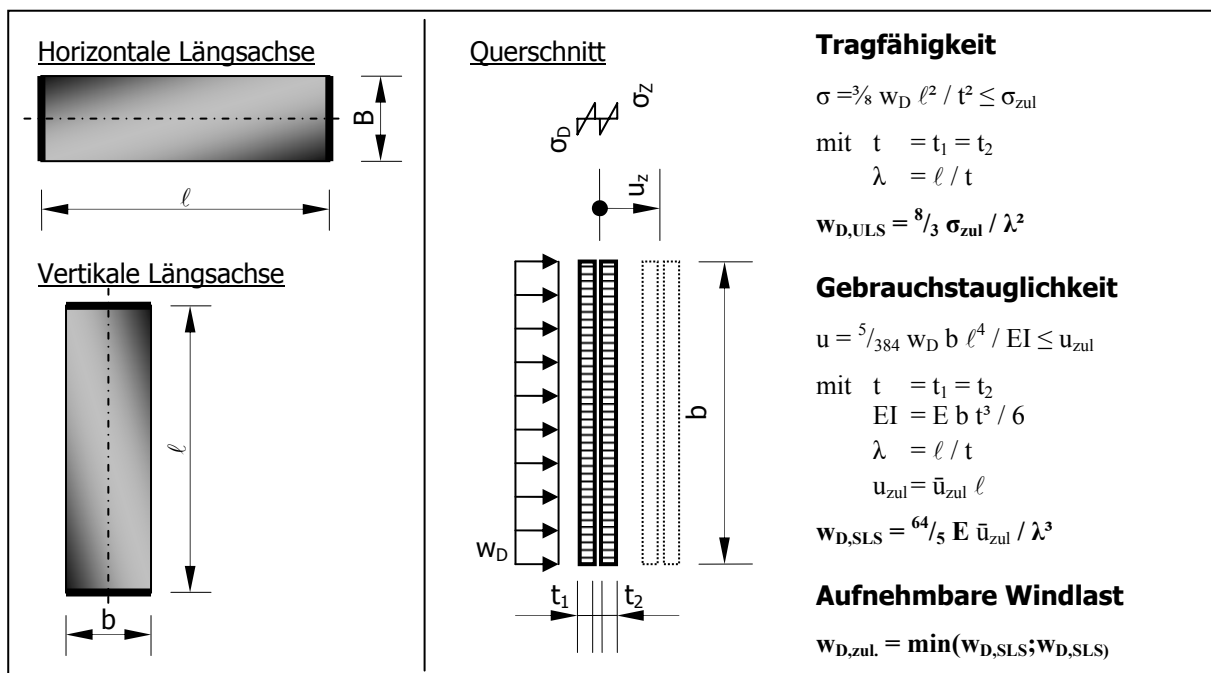


Bild 34: Aufnehmbare Windlast für Fassadenlamelle mit senkrechter Glasebene

Das Eigengewicht wirkt in Scheibenebene und ist nicht dimensionierungsrelevant.

Unter Zugrundelegung der Bedingungen für ein Floatglas (SPG) in [TRLV 2006]:

Tragfähigkeit (ULS):

$$\sigma_{zul} = 15,0 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Überkopfverglasung})$$

$$\sigma_{zul} = 22,5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Vertikalverglasung})$$

und

Gebrauchstauglichkeit (SLS):

$$u_{zul} = \ell / 100$$

ergeben sich für die herstellungsspezifischen Glasdicken (5, 6, 8 und 10 mm) die in Bild 35 dargestellten aufnehmbaren Windlasten.

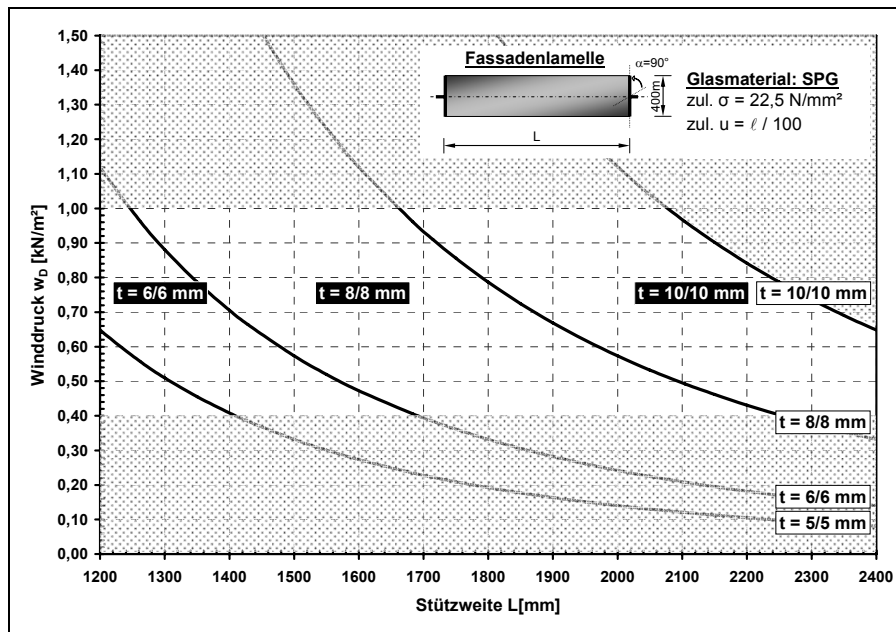


Bild 35:
Glasdicken für
Fassaden-Lamellen
unter Winddruck
mit liniengelagertem
Glas (SPG) und senk-
rechter Glasebene

Der Hauptanwendungsbereich liegt in den Windlastzonen WZ1 und WZ2¹⁹ und bei Gebäudehöhen von maximal 50 m. Dies entspricht Windlasten von 0,38...0,96 kN/m^2 (vgl. Bild 19).

Es zeigt sich, dass mit einem symmetrischen Verbundglas von max. 8/8 mm Dicke Spannweiten in der Größenordnung eines 1-fachen bis 1½-fachen Ausbaurasters überspannt werden können. Maßgeblich für die Querschnittswahl ist die Gebrauchstauglichkeit. Die Kurven aus der Tragfähigkeit ergeben höhere Stützweiten und sind somit nicht relevant. Dies bedeutet auch, dass die Verwendung eines vorgespannten Glases mit einer höheren Glasfestigkeit bei gleicher Biegesteifigkeit EI keine Reduzierung des Glasquerschnitts zur Folge hat.

Für Lamellen im Dachbereich mit waagerechter Glasebene wirken Eigengewicht und Schnee gleichgerichtet und stellen somit die dimensionierungsrelevante Lastkombination dar. Die aufnehmbare Schneelast s wird mit den in Bild 36 angegebenen Beziehungen beschrieben.

¹⁹ Die Windlastzonen WZ1 und WZ2 decken den größten Teil der Bundesrepublik Deutschland ab und beinhalten, im Hinblick auf Gewerbebauten, die Ballungsgebiete und Großstädte.

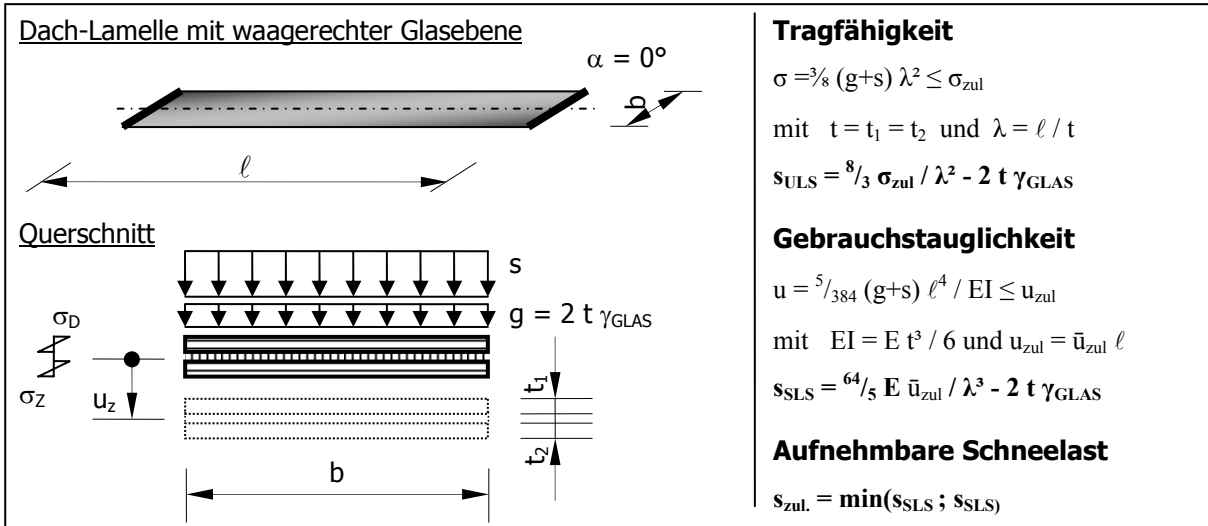


Bild 36: Aufnehmbare Schneelast für Dachlamellen mit waagerechter Glasebene

Ein Abgleich der Schneelastzonenkarte [DIN 1055-5] mit den Geländehöhen ergibt einen Hauptanwendungsbereich für Flachdächer bei Schneelasten $s = 0,52...1,00(1,25)$ kN/m². In Bild 37 sind die Glasdicken 6/6 mm, 8/8 mm und 10/10 mm den Stützweiten L und Schneelasten s zugeordnet, siehe Bild 37. Das Eigengewicht ist in den Graphen berücksichtigt.

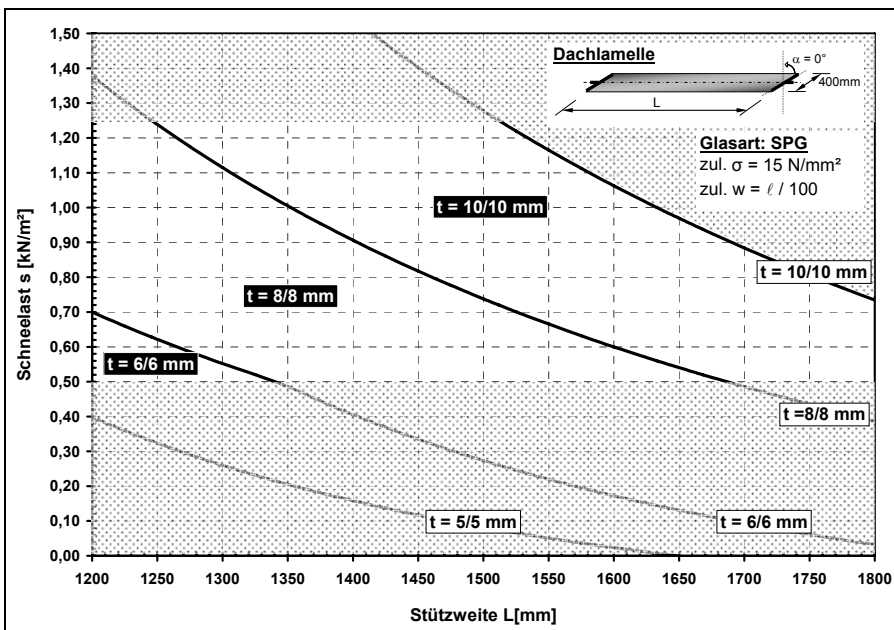


Bild 37: Glasdicken für Dach-Lamellen unter Schnee

Durch die Einführung der Schlankheit λ (siehe Bild 34 und Bild 36) ergeben sich für die Hauptanwendungsbereiche die in Bild 38 dargestellten Werte:

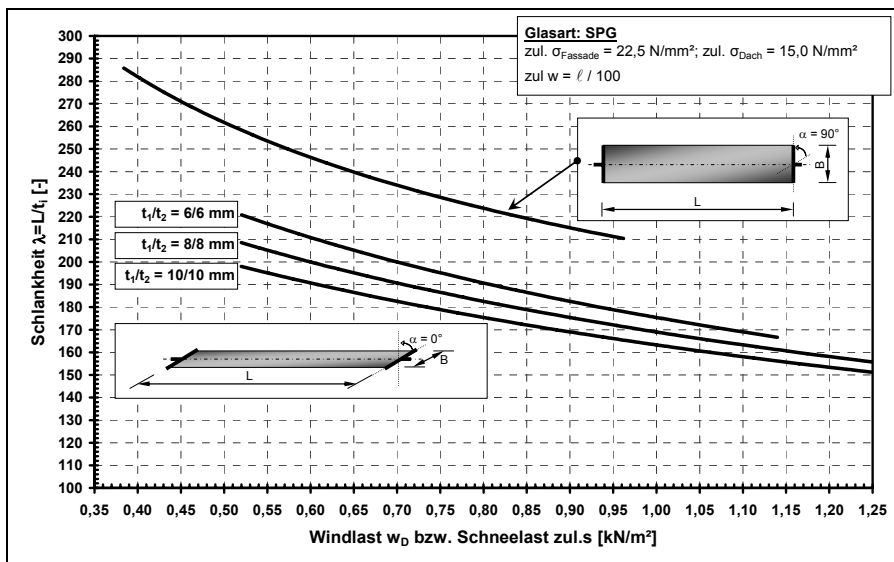


Bild 38:
Schlankheiten für Fassaden- und Dachlamellen

Hieraus lassen sich die folgenden Anhaltswerte für die Dimensionierung ableiten, Zwischenwerte können linear interpoliert werden:

LAGE	VERÄNDERLICHE EINWIRKUNG [kN/m ²]	SCHLANKHEIT λ $\lambda = L / \sum t_i$
FASSADE	0,4	280
	0,5	260
	1,0	210
DACH	0,52	210
	0,70	190
	1,00	170
	1,25	150

Tabelle 6: Schlankheiten für Fassaden- und Dachlamellen

Im Dachbereich führen die Beanspruchungen aus Eigengewicht und Schnee zu größeren Glasdicken, für eine Spannweite von ca. $1 \times$ Ausbauraster ergeben sich Glasdicken von 8/8 bis 10/10mm. Da hier die Tragfähigkeit die Dimensionierung bestimmt, würden vorgespannte Gläser größere Spannweiten oder geringere Querschnitte ermöglichen. Dies ist aber im Hinblick auf die höheren Materialkosten und eventuelle Zwischenschichtprobleme, bedingt durch die Welligkeit der Oberfläche von vorgespannten Gläsern, nicht anzustreben.

Bei nachführbaren Lamellen mit horizontaler Längsachse verändern sich die Beanspruchungen in Abhängigkeit der Scheiben-Stellung ($\alpha = 0^\circ \dots 90^\circ$). Die Gleichungen für die aufnehmbare Verkehrslast sind in Bild 39 angegeben.

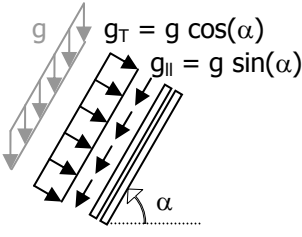
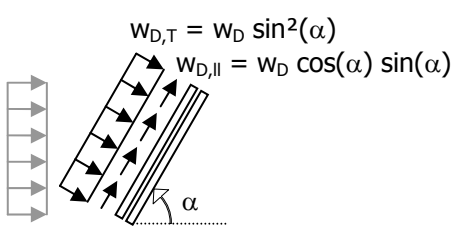
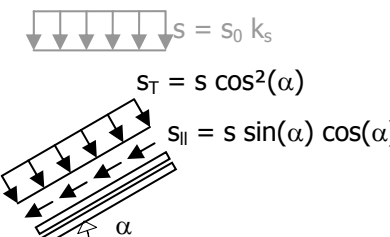
Eigengewicht	Wind	Schnee
 <p>$g_T = g \cos(\alpha)$ $g_{ } = g \sin(\alpha)$</p>	 <p>$w_{D,T} = w_D \sin^2(\alpha)$ $w_{D, } = w_D \cos(\alpha) \sin(\alpha)$</p> <p>$w_D = 1,25 c_p q$</p>	 <p>$s_T = s \cos^2(\alpha)$ $s_{ } = s \sin(\alpha) \cos(\alpha)$</p> <p>$s = s_0 k_s$</p>
Fassade (Eigengewicht + Wind)		
<p>Tragfähigkeit (ULS)</p> $\sigma = \frac{3}{8} \frac{\ell^2}{t} \left[g \left(\frac{\cos(\alpha)}{t} + \frac{\sin(\alpha)}{B} \right) + w \left(\frac{\sin^2(\alpha)}{t} - \frac{\sin(\alpha) \sin(\alpha)}{B} \right) \right]$ $w_{D,ULS} = \frac{\frac{8}{3} \frac{t}{\ell^2} \sigma_{zul} - g \left(\frac{\cos(\alpha)}{t} + \frac{\sin(\alpha)}{B} \right)}{\frac{\sin^2(\alpha)}{t} - \frac{\sin(\alpha) \cos(\alpha)}{B}}$	<p>Gebrauchstauglichkeit (SLS)</p> $u = \frac{5}{384} \frac{\ell^4}{EI} \left(g \cos(\alpha) + w \sin^2(\alpha) \right)$ <p>mit $\bar{u} = \frac{u}{\ell}$; $\lambda = \frac{\ell}{t}$; $I = 2 \frac{t^3}{12}$</p> $w_{D,SLS} = \frac{\frac{64}{5} \bar{u}_{zul} E / \lambda^3 - g \cos(\alpha)}{\sin^2(\alpha)}$	
Dach (Eigengewicht + Schnee)		
<p>Tragfähigkeit (ULS)</p> $\sigma = \frac{3}{8} \frac{\ell^2}{t} \left[g \left(\frac{\cos(\alpha)}{t} + \frac{\sin(\alpha)}{B} \right) + s \left(\frac{\cos^2(\alpha)}{t} + \frac{\sin(\alpha) \sin(\alpha)}{B} \right) \right]$ $s_{0,ULS} = \frac{\frac{8}{3} \frac{t}{\ell^2} \sigma_{zul} - g \left(\frac{\cos(\alpha)}{t} + \frac{\sin(\alpha)}{B} \right)}{k_s \left(\frac{\cos^2(\alpha)}{t} + \frac{\sin(\alpha) \cos(\alpha)}{B} \right)}$	<p>Gebrauchstauglichkeit (SLS)</p> $u = \frac{5}{384} \frac{L^4}{EI} \left(g \cos(\alpha) + s \cos^2(\alpha) \right)$ <p>mit $\bar{u} = \frac{u}{L}$; $\lambda = \frac{\ell}{t}$; $I = 2 \frac{t^3}{12}$</p> $s_{0,SLS} = \frac{\frac{64}{5} \bar{u}_{zul} E / \lambda^3 - g \cos(\alpha)}{k_s \cos^2(\alpha)}$	

Bild 39: Aufnehmbare Wind-/ Schneelasten bei nachführbaren Lamellen

Für eine ein-achsige Fassadenlamelle (1350×400 mm) ergeben sich die in Bild 40 dargestellten Beanspruchungen.

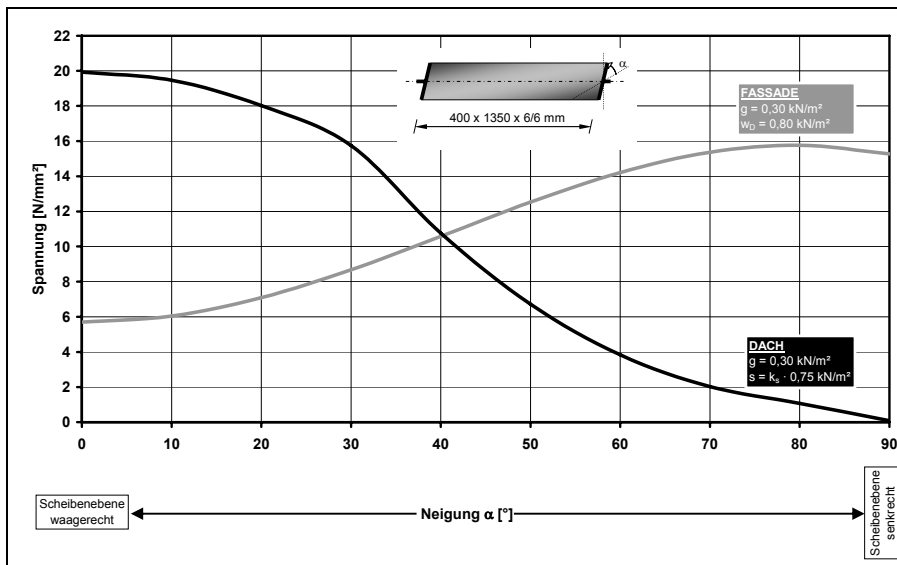


Bild 40:
Beanspruchungen in
Abhängigkeit der La-
mellenstellung

Bei den Dachlamellen (Lamellen unter Schnee und Eigengewicht) stellt sich die größte Beanspruchung bei waagerechter Scheibenstellung ($\alpha = 0^\circ$) ein. Die Glasdicken sind in Bild 37 gezeigt. Für Fassadenlamellen, gekennzeichnet durch die Beanspruchungen infolge Wind und Eigengewicht, ergibt sich die maximale Beanspruchung bei einer Scheibenneigung von $\alpha \approx 80^\circ$, siehe Bild 41 und Bild 43. Die Beanspruchungen infolge der in Scheibenebene wirkenden Lastkomponenten sind sehr gering und können vernachlässigt werden.

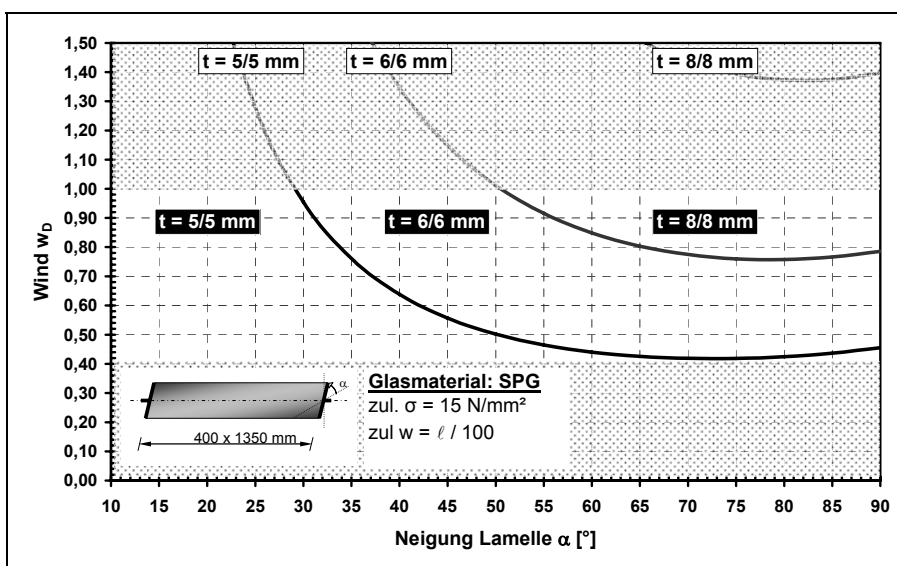


Bild 41:
Glasdicken (SPG) für
Fassaden-Lamelle in
Abhängigkeit der Glas-
flächen-Neigung α

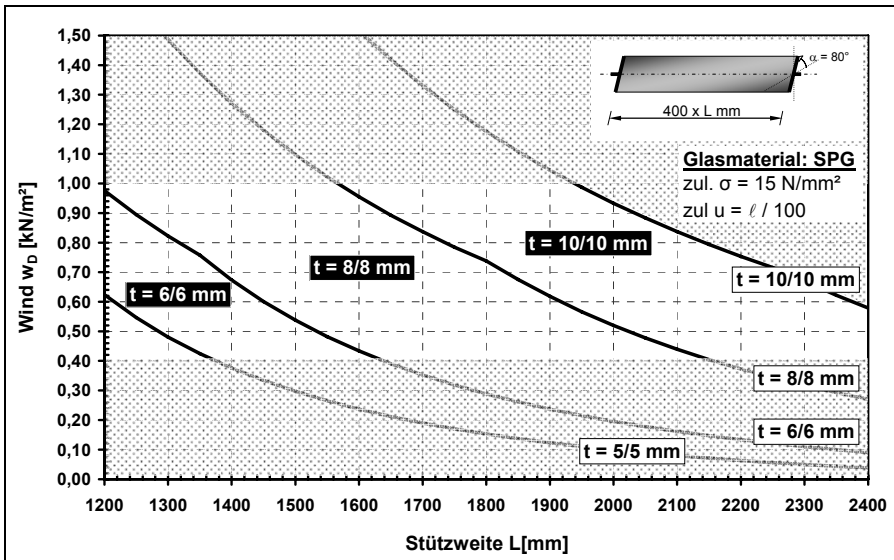


Bild 42:
 Glasdicken (SPG) für geneigte Fassaden-Lamellen in Abhängigkeit der Stützweite ℓ

Mit Glasdicken von 8/8mm sind Spannweiten in der Größenordnung eines 1- bis 1½-fachen Fassadenrasters möglich. Die Bedingungen für Gebrauchs- und Tragfähigkeit ergeben zulässige Windlasten in ähnlicher Größenordnung, daher führt auch hier die Verwendung vorgespannter Gläser zu keiner wesentlichen Reduzierung der Querschnitte oder Erhöhung der Spannweiten, siehe Bild 43.

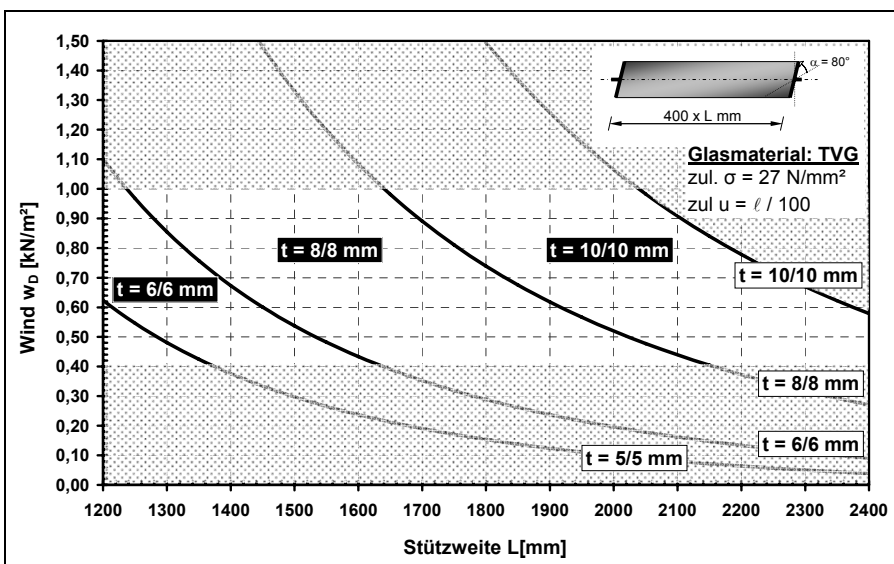


Bild 43:
 Glasdicken (TVG) für geneigte Fassaden-Lamellen in Abhängigkeit der Stützweite L

De facto sind jedoch geringere Spannungs- und Durchbiegungswerte identifizierbar. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass die rechnerische Vernachlässigung des Verbunds zwi-

schen den Glasschichten auf der sicheren Seite liegt. In [BÜV 2001] wird diesem Faktum bereits Rechnung getragen und die Berücksichtigung des Verbunds in Betracht gezogen. Daher gilt es in Kapitel 5 dieser Arbeit, mittels der Ergebnisse experimenteller Untersuchungen, die tragkonstruktive Qualität des Verbundes zu beschreiben.

4.2. Großflächige Lamellenlösungen

Ausgehend von den vorgestellten Einzellamellen lassen sich Gruppen (Lamellenroste) bilden durch Zusammenfassung der Einzellamellen auf einem Grundrahmen, Bild 44.

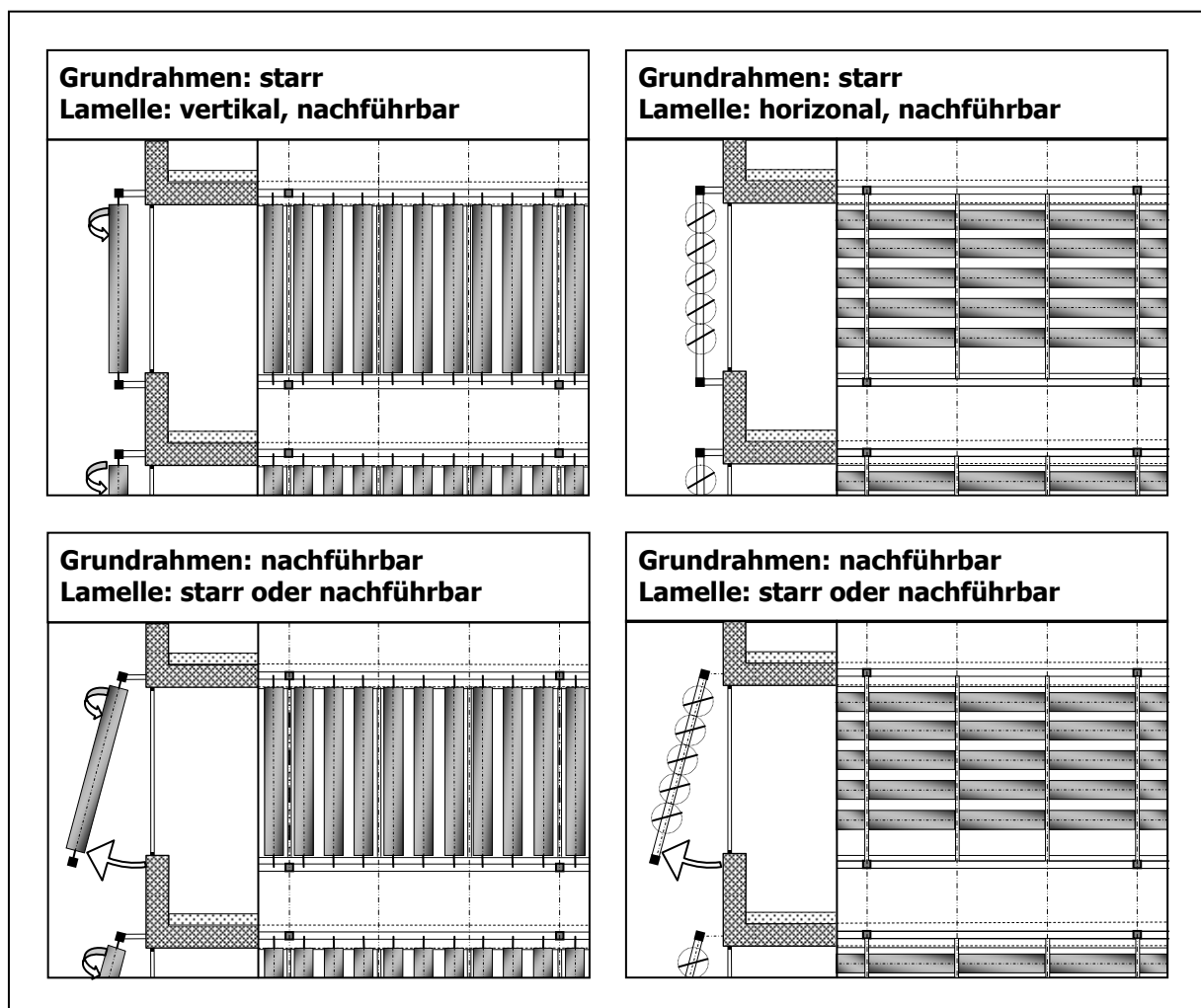


Bild 44: Lamellengruppen für Fassaden

Die Vorteile dieser Konstruktionen stellen sich folgendermaßen dar:

Reduzierung der Anschlusspunkte, die in der Regel auch Durchdringungspunkte der Gebäudehülle darstellen.

Reduzierung der Antriebselemente, da nur die Gruppe bewegt wird und die einzelne Lamelle starr ausgeführt werden kann. Die größere Ausladung bedingt jedoch unter Umständen eine deutlich stärkere Antriebseinheit.

Bi-axiale Nachführung der Lamellen, da durch getrennte Rotation der Einzellamellen und der Gruppenkonstruktion eine Nachführbarkeit bezüglich Azimut und Höhe der Sonne möglich ist.

Werden die Einzellamellen durch großformatigere Verbundgläser ersetzt, entstehen die in Bild 45 dargestellten großformatigen Lamellen.

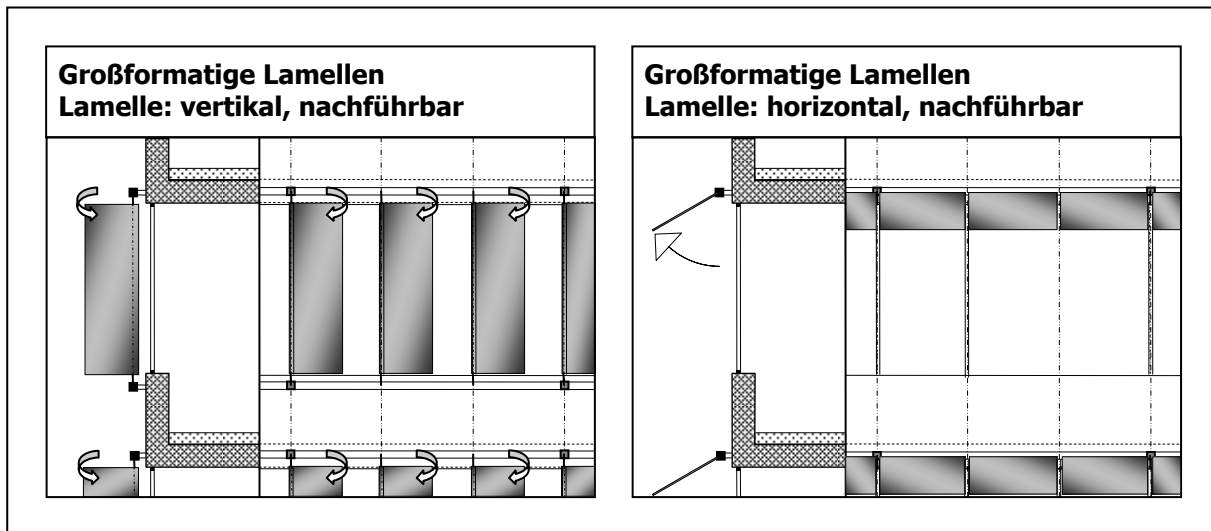


Bild 45: Großformatige Lamellen

Die in Bild 44 skizzierten Fassadenlösungen lassen sich auch auf die Anwendung im Dachbereich übertragen, siehe Bild 46.

Da es sich bei den vorgestellten Lösungen um ein-achsig gespannte Gläser handelt, sind die Überlegungen zur Glasdimensionierung aus 4.1.4 übertragbar, desgleichen gilt für die unter 3.3 erläuterten Halterungen.

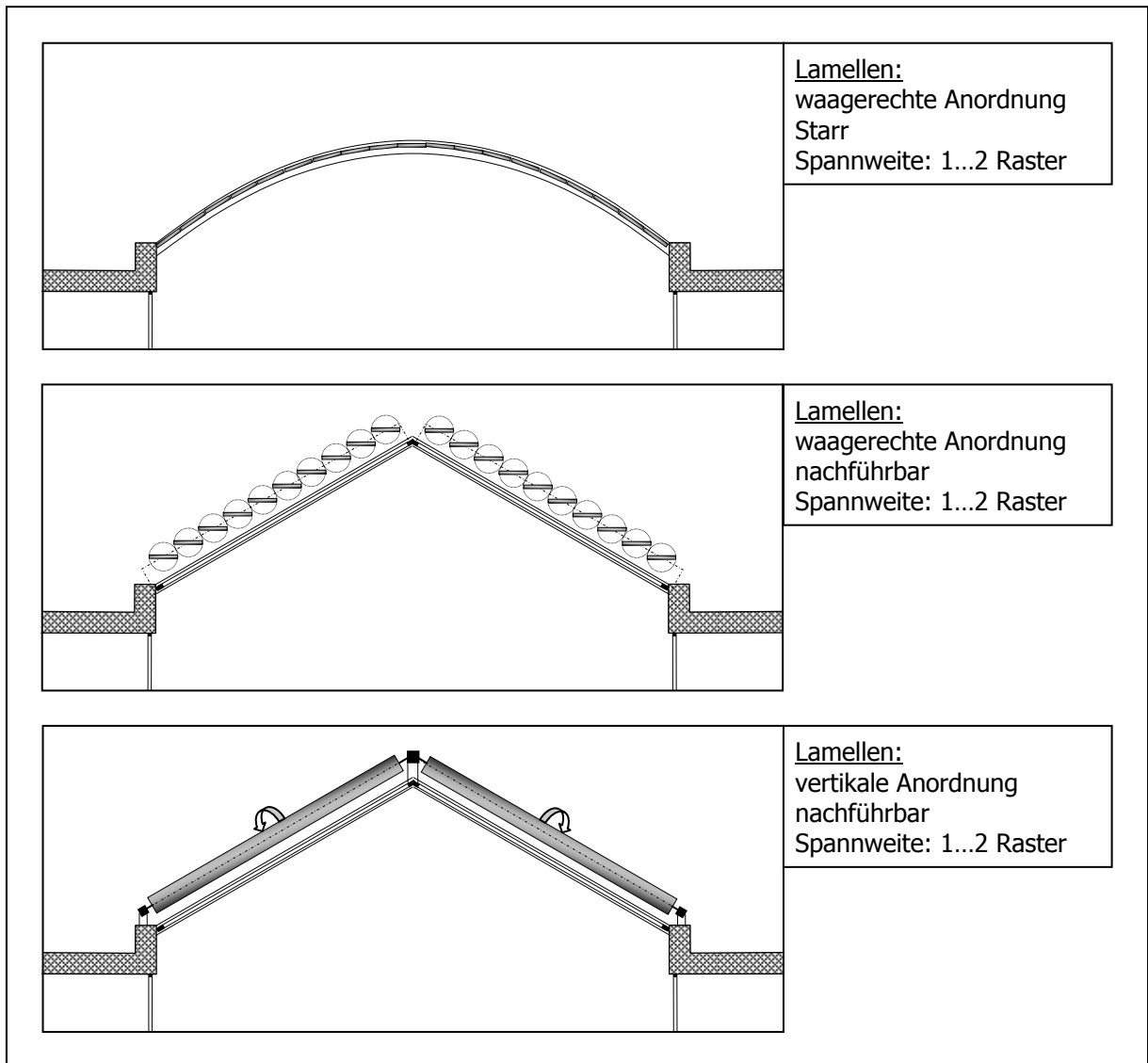


Bild 46: Lamellengruppen im Dachbereich

4.3. Lamellen mit größeren Spannweiten

Die einzelnen Lamellen in 4.1 und 4.2 sind durch Spannweiten bis maximal 2-faches Ausbauraster gekennzeichnet. Bei den folgenden Überlegungen zur Vergrößerung der Spannweiten sollen aus der Lichttechnik resultierende Konstruktionsprinzipien bezüglich ihres Potenzials für die Tragstruktur diskutiert werden.

4.3.1. Verschattungssysteme mit mehreren Funktionsebenen

Die deutlich größere Winkelselektivität der Reflektionshologramme und die daraus resultierende Notwendigkeit der aufwendigen und kostenintensiven Nachführung führt zu Verschattungssystemen unter Verwendung von Transmissionshologrammen. Hierbei wird eine Umlenkebene mit einer Absorptions- oder Reflektionsebene kombiniert, siehe Bild 47.

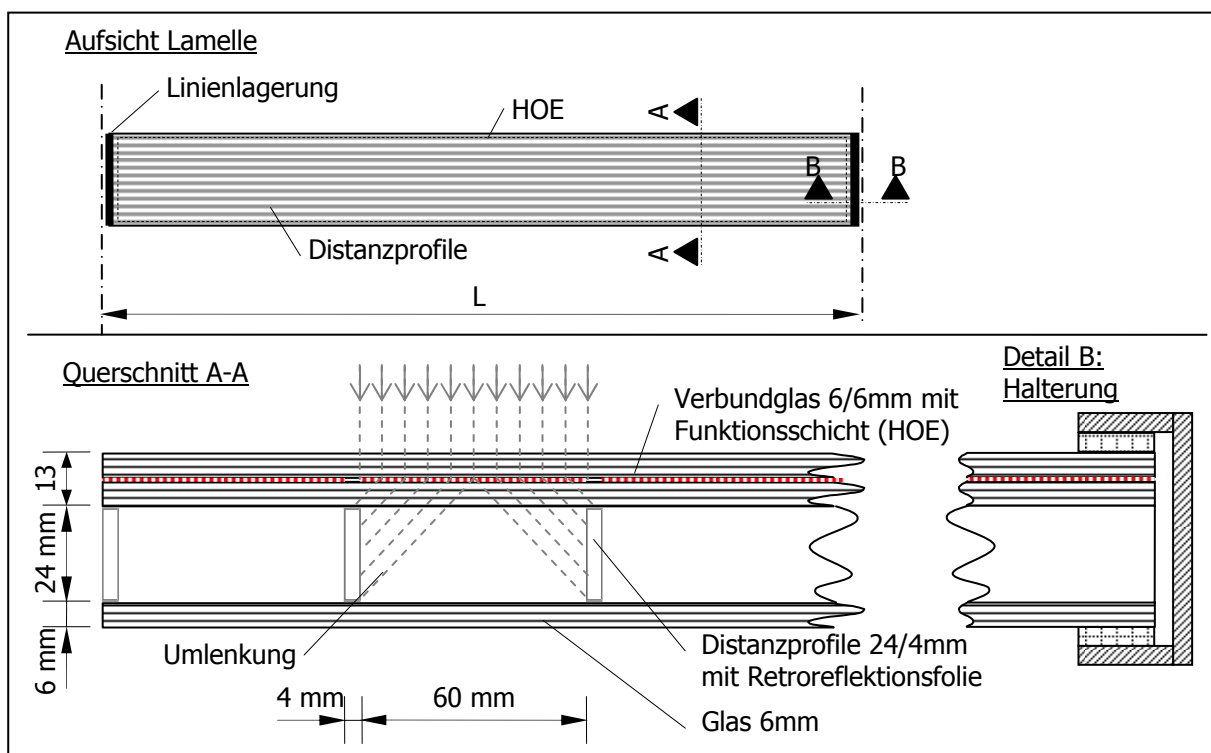
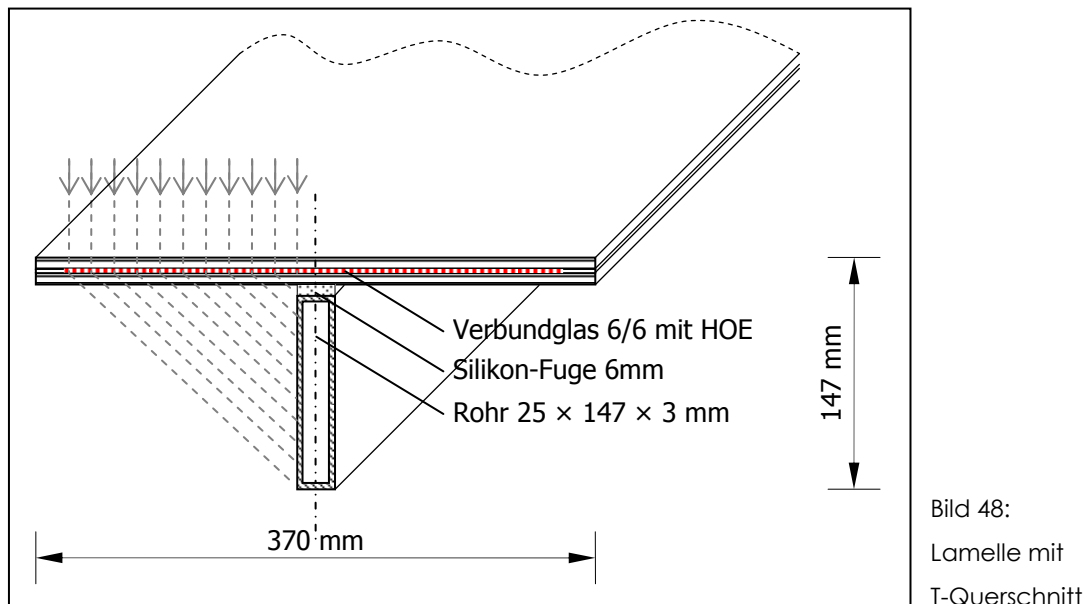


Bild 47: Hohlkammer-Lamelle

Es entsteht ein Querschnitt mit zwei Glasebenen, die linear über Distanzprofile verbunden sind, in Anlehnung an Isoliergläser. Die Distanzprofile dienen sowohl der Verschattungs- als auch der Tragfunktion. Im Falle der ausreichend schubfesten Verbindung der beiden Glasebenen entsteht ein Querschnitt mit einer erheblich höheren Biegesteifigkeit sowohl aus dem Steiner-Anteil der beiden Glasscheiben als auch aus der Biegesteifigkeit der Distanzprofile. Für den Anschluss „Glas an Profil“ ist zweckmäßigerweise eine Klebung anzustreben, um Durchdringungen der Zwischenschichten zu vermeiden und somit die Dauerhaftigkeit der Funktionsfolie und die Dichtigkeit der Hohlkammern sicherstellen zu können.

Fasst man die Reflektionsebenen auf einem Steg zusammen, erfordert dies wegen der Umlenkung der direkten Sonnenstrahlung einen Querschnitt mit einer deutlich höheren Bauhöhe und somit einer höheren Biegesteifigkeit, siehe Bild 48.



Die Verbindung zwischen dem Lichtlenkglas und dem Steg erfolgt, aus den bereits für das Hohlkammer-Element erläuterten Gründen, über eine Klebung.

Die Klebefuge ist so zu dimensionieren, dass eine möglichst kraftschlüssige Verbindung von Steg und Flansch gegeben ist und die unterschiedlichen Längenausdehnungen von Glas-Steg und Metall-Flansch kompensiert werden können. Dies bestimmt unter anderem auch die Material-Wahl des Stegs.

Eine weitere Möglichkeit ist die Ausführung von Steg und Flansch in Glas. Die Vorteile liegen in dem identischen Temperaturausdehnungskoeffizienten α_T . Da der Steg aber wegen der erforderlichen Absorption der Sonnenstrahlung mit stark gefärbtem Glas ausgeführt werden müsste, gibt es keine Vorteile für Glas hinsichtlich Transparenz. Mögliche Ausführungen für eine Glas-Glas-Klebung sind in [Pye/Ledbetter 1998] dokumentiert.

4.3.2. Konzentrierende Systeme mit gekrümmten Gläsern

Der Einsatz von konzentrierenden Systemen in Verbindung mit Photovoltaik-Elementen wird durch gebogene Verbundgläser begünstigt, siehe Bild 49.

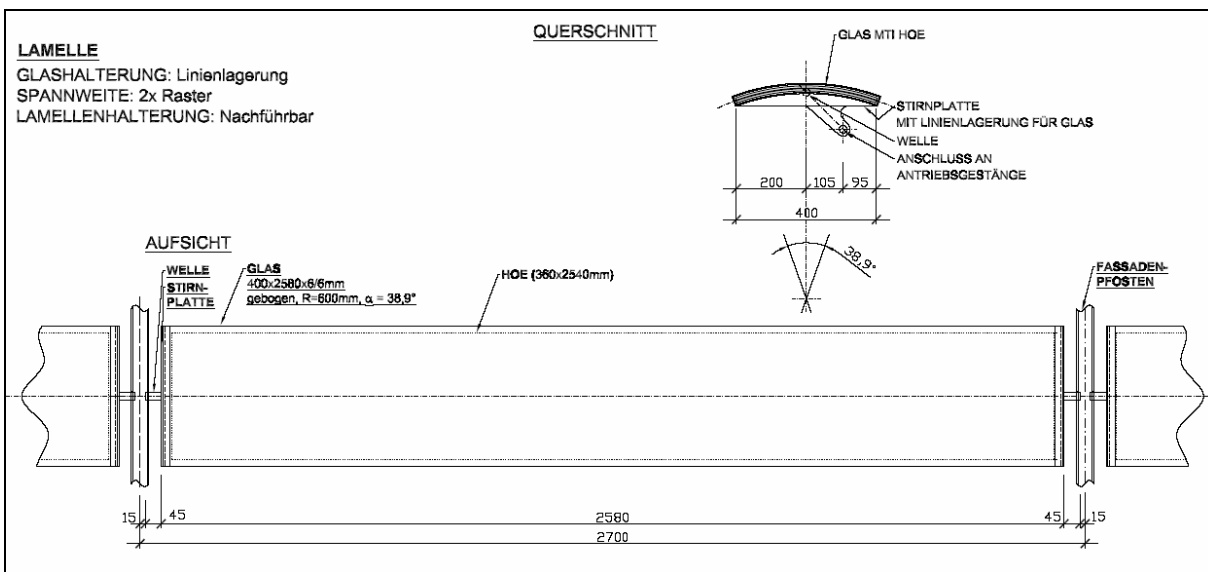


Bild 49: Lamellen mit gekrümmten Gläsern

Die gekrümmten Gläser besitzen gegenüber den ebenen eine deutlich größere Biegesteifigkeit des Querschnitts, womit größere Stützweiten ermöglicht werden, siehe Bild 50.

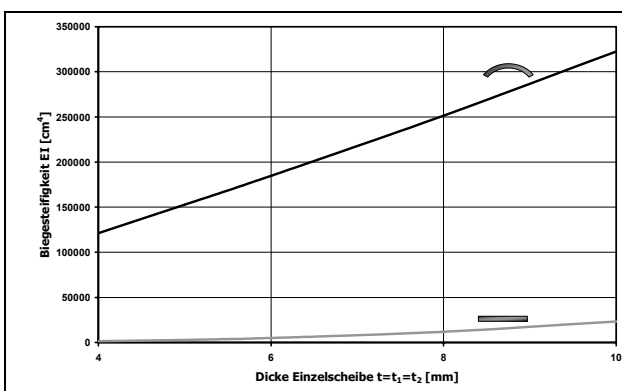


Bild 50: Trägheitsmoment von Lamellen mit ebenen und gekrümmten Gläsern

Es sei aber darauf hingewiesen, dass Biege- und Laminationsprozess bei den gebogenen Gläsern einen erheblichen Mehraufwand darstellen.

5. TRAGVERHALTEN VON EBENEN EINZELAMELLEN

Für die in Kapitel 4.1 aufgezeigten Konstruktionslösungen wird das Tragverhalten untersucht. Die mechanischen Modelle zur Abbildung des Tragverhaltens von polymeren Zwischenschichten werden erläutert. Die aktuellen Bemessungsverfahren von Verbund-Sicherheitsglas (VSG) werden im Hinblick auf die Berücksichtigung der Zwischenschicht dargestellt. Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten von HOE-Verbundgläsern werden erläutert. Auf Basis der Ergebnisse dieser Untersuchungen werden Aussagen zur konstruktiven Ausbildung und zur rechnerischen Beschreibung des Tragverhaltens unter Berücksichtigung der HOE-Zwischenschicht sowie der Glas- und Lamellenhalterungen formuliert.

5.1. Tragverhalten der Zwischenschichten

5.1.1. Mechanische Modelle für die Zwischenschicht

Die polymeren Werkstoffe der Zwischenschichten weisen ein Materialverhalten mit den Grundeigenschaften Elastizität, Viskosität und Plastizität auf. Deren Ausprägung ist abhängig von der Temperatur und der Beanspruchung (Art, Höhe, Dauer). Mit Aufbringung und Steigerung der Beanspruchung verhalten sich die Kunststoffe bis zum Erreichen der Fließgrenze viskoelastisch. Das Verhalten ist gekennzeichnet durch einen elastischen und einen viskosen Anteil [Pahl et al. 1991] [Retting 1991]. Das elastische Materialverhalten lässt sich durch ein Feder-Element (Hooksches Element) und das viskose Verhalten durch ein Dämpfer-Element (Newton-Element) abbilden, siehe Bild 51.

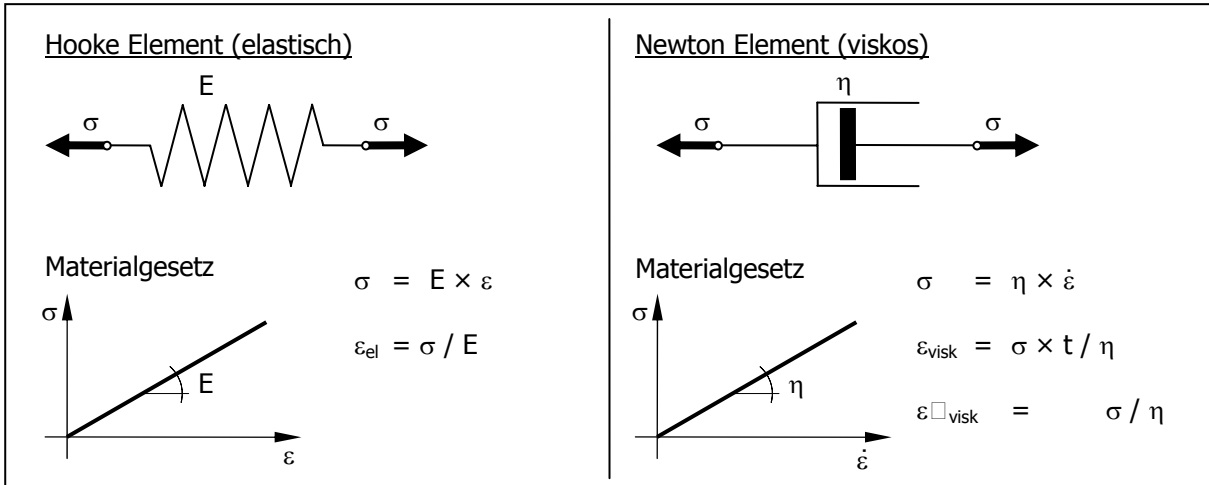


Bild 51: Rheologische Grundkörper: Feder-Element und Dämpfer-Element

Zur Abbildung des rheologischen Verhaltens der Kunststoffe können die Grundelemente durch die im Folgenden beschriebenen Reihen- und Parallelschaltungen kombiniert werden.

Das Maxwell-Modell, die Serienschaltung von Feder und Dämpfer, ist geeignet inelastische Deformationen nach Entlastung darzustellen, siehe Bild 52.

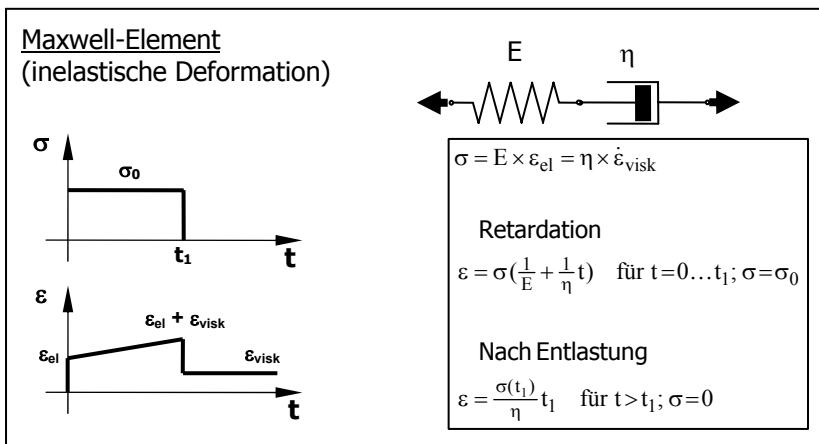


Bild 52: Maxwell-Element

Bei gegebener Deformation ε können mit dem Maxwell-Element auch Relaxationsvorgänge nachvollzogen werden.

Rheologische Rückverformungen nach Entlastung werden durch das Maxwell-Element nicht abgebildet. Hierzu ist das Kelvin-Voigt-Element, die Parallelschaltung von Feder und Dämpfer, geeignet, siehe Bild 53.

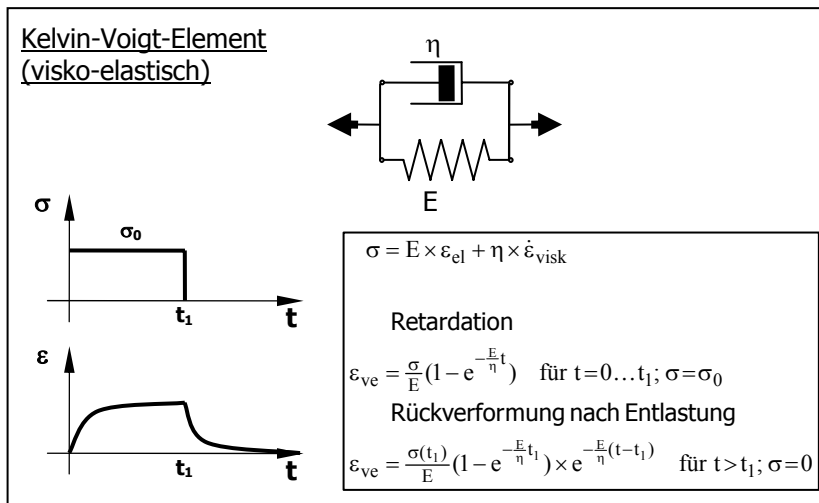


Bild 53:

Kelvin-Voigt-Element

Das Kelvin-Voigt-Element beschreibt den viskoelastischen Werkstoff mit einem verzögert elastischem Deformationsverhalten. Die Verformungskurve ist gekennzeichnet durch das Übergangskriechen²⁰, welches zu Beginn der Belastung auftritt und elastisch ist, sowie die asymptotische und zeitabhängige Rückverformung nach der Entlastung. Es werden keine inelastischen Deformationen dargestellt.

Die Reihenschaltung von Kelvin-Voigt-Element und Maxwell-Element bildet das viskoelastische Verhalten der Polymere ab, siehe Bild 54.

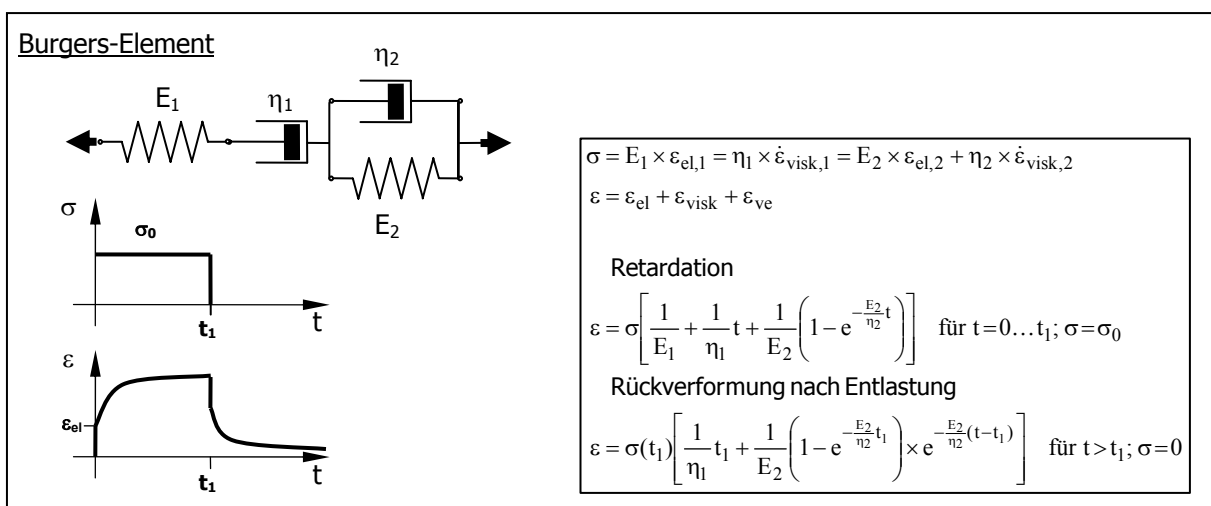


Bild 54: Burgers-Element

²⁰ Übergangskriechen = primäres Kriechen

Das in Reihe geschaltete Newton-Element (η_1) stellt das bei konstanter Last mit einer konstanten Verformungsrate linear zunehmende Sekundärkriechen²¹ dar.

Ähnliche Ergebnisse können auch mit dem Deformationsmodell, der Parallelschaltung eines Hook-Elements und mehrerer Maxwell-Elemente erzielt werden.

Zur Präzisierung der Beschreibung des viskoelastischen Materialverhaltens ist es in der Regel notwendig das Burgers-Element durch zusätzliche in Reihe geschaltete Kelvin-Voigt-Elemente zu erweitern.

Die Dehnung während des Retardationsvorgangs ergibt sich dann zu:

$$\begin{aligned}
 &\text{Retardation} \\
 \varepsilon &= \sigma \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \sum_{i=2}^n \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{E_i}{\eta_i} t} \right) \right] \quad \text{für } t=0 \dots t_1; \sigma=\sigma_0 \\
 &\text{Rückverformung nach Entlastung} \\
 \varepsilon &= \sigma(t_1) \left[\frac{1}{\eta_1} t_1 + \sum_{i=2}^n \left(\frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{E_i}{\eta_i} t_1} \right) \times e^{-\frac{E_i}{\eta_i} (t-t_1)} \right) \right] \quad \text{für } t > t_1; \sigma=0
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Hierbei wird der Quotient aus Elastizitätsmodul E_i und Viskositätsmodul η_i als Retardationszeit τ_i bezeichnet.

Zur Abbildung komplexer Beanspruchungszustände können diese in einfach beschreibbare Teilfunktionen zerlegt werden und die Dehnungsantwort aus der Summe der Dehnungsantworten der Teilfunktionen ermittelt werden. Dieses Vorgehen für viskoelastische Werkstoffe wird als Boltzmannsches Superpositionsprinzip bezeichnet.

Die Übertragung der aus der Elastizitätstheorie bekannten Gleichungen auf linear viskoelastische Werkstoffe durch Verwendung der zeitabhängigen Spannungs-, Dehnungs- und Kennwertfunktionen $[\sigma(t), \varepsilon(t), E(t)]$ erfolgt gemäß dem Korrespondenzprinzip.

²¹ Stationäres Kriechen = sekundäres Kriechen

5.1.2. Berücksichtigung der Zwischenschicht bei der Bemessung von VSG

Das zurzeit gültige Bemessungsverfahren für Verbundgläser ist in [TRLV 2006] und [TRPV 2006] angegeben. Hier findet der Schubverbund keine Berücksichtigung bei der Ermittlung der Beanspruchungen im VSG. Es wird der jeweils ungünstige Grenzzustand (ohne Verbund oder voller Verbund) angesetzt. Das Nachweisformat basiert auf einem globalen Sicherheitskonzept.

Zwischenzeitlich konnte in den nachstehend beschriebenen Untersuchungen an VSG mit PVB das Potenzial des Schubverbundes aufgezeigt werden.

In [Sobek et al. 2000] wird auf Basis von experimentellen Untersuchungen an VSG-Bohrkernen (30 mm) folgende untere Grenze für den Schubmodul in Abhängigkeit der Belastungsdauer definiert:

$$\begin{aligned}
 G(T \geq 20^\circ\text{C}) &= 0,008 \times (100 - T) - 0,0011 \times (50 + T) \times \log(t) \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \\
 G(T < 10^\circ\text{C}) &= 2,0 - 0,2 \times \log(t) \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

mit:

T : Belastungszeit [sec]

t : Temperatur [°C]

Hiervon ausgehend wird in [Kutterer 2003] das Zusammenwirken von Schubverbund und Membrantragwirkung bei vierseitig gelagerten Platten betrachtet. Es wird gezeigt, dass ein Rückgang des Schubmoduls mit einer wachsenden Membrantragwirkung einhergeht und daraus der Vorschlag abgeleitet, dass in der Regel auf eine Berücksichtigung des Schubverbundes zugunsten der nichtlinearen Betrachtung von Biege- und Membrantragverhalten verzichtet werden kann.

In [Schuler 2003] sind Schertest an Kleinproben (50 × 80 mm) bei Temperaturen zwischen 5 bis 60 °C und Biegeversuche an zweiseitig gelagerten Scheiben dokumentiert. Aus diesen experimentellen Untersuchungen konnten geringfügig günstigere Ansätze für den Schubmodul von PVB entwickelt werden, siehe zum Vergleich Bild 55.

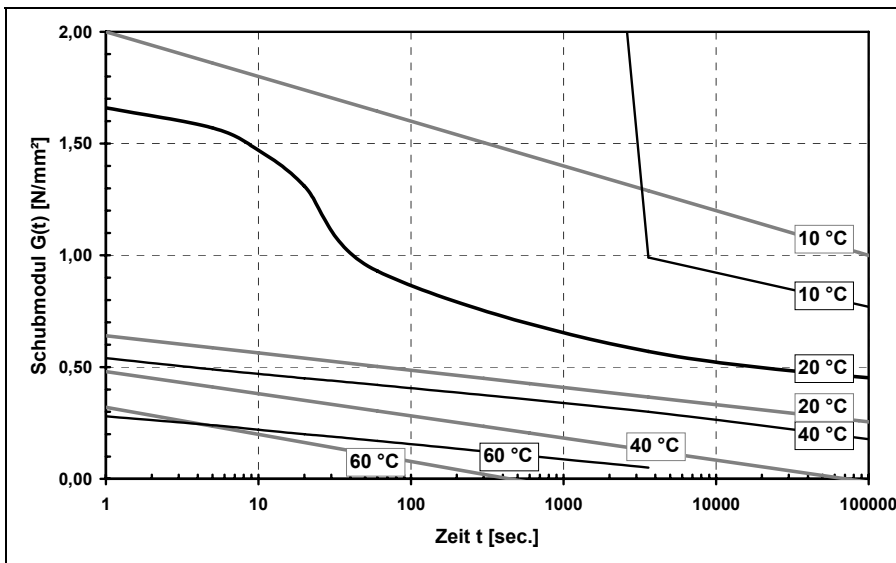


Bild 55:
Schubmodul nach
Schuler (schwarz)
Kutterer (grau)

Die in Bild 55 dargestellten Schubmodulverläufe $G(t, T)$ machen den Einfluss von Bauteiltemperatur T und Lasteinwirkungsdauer t auf das Tragverhalten der PVB-Zwischenschicht deutlich. Der Schubmodul G und damit auch die Steifigkeit des Verbundquerschnitts nehmen mit zunehmender Bauteiltemperatur und mit zunehmender Lastdauer ab, die beiden Parameter sind positiv korreliert. Dagegen sind Windlasten und Lufttemperaturen eher negativ korreliert, steigende Windlasten (z.B. Sturmtief) gehen mit fallenden Lufttemperaturen einher. Diese Korrelationsprinzipien treffen in analoger und materialspezifischer Weise auf das Tragverhalten aller polymeren Zwischenschichten zu. Daher ist die Berücksichtigung der negativen Korrelation, im Sinne eines wirtschaftlicheren Bemessungsansatzes, sinnvoll.

Hierzu werden, auf Basis einer Quantifizierung der Korrelation von Windlast und Lufttemperatur, Windlast-Temperatur-Szenarien definiert. Diese zeitabhängigen Einwirkungen $w(t)$ und $T(t)$ liefern mit rechnerischen Betrachtungen an exemplarischen Systemen maximale Oberflächenspannungen, aus denen sich durch Rückrechnung mit maximalen Windlasten ein zeitunabhängiger Schubmodul identifizieren lässt. Eine detaillierte Methodik hierfür ist in [Wellershoff 2006] dokumentiert und wird nachstehend zusammengefasst.

Tagesmaximalwerte von Lufttemperatur und Böenwindgeschwindigkeit sind zum Beispiel als Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verfügbar, siehe Bild 56.

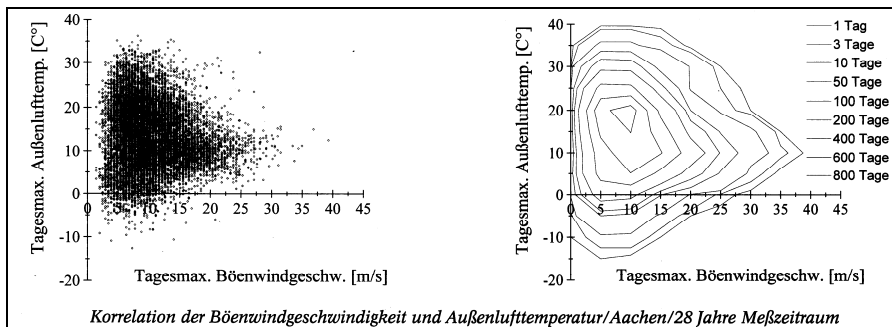


Bild 56:
Böengeschwindigkeit
und Außenlufttempera-
tur für Aachen, Anzahl
der Tagesextremwerte
[Wellershoff 2007]

Die Zusammenfassung der Datenmengen mehrere Stationen erfolgt zum Beispiel mittels Matrixaddition. Dies wird ermöglicht durch die Bildung von Temperatur- und Windklassen ($\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta v = 5 \text{ m/s}$) sowie die Einführung einer bezogenen Böenwindgeschwindigkeit und einer bezogenen Windlast²² entsprechend der folgenden Beziehung

$$\frac{w}{w_{\max}} = \frac{v^2}{v_{\max}^2} \quad (5.3)$$

und liefert die in Bild 57 dargestellten Zuordnungen.

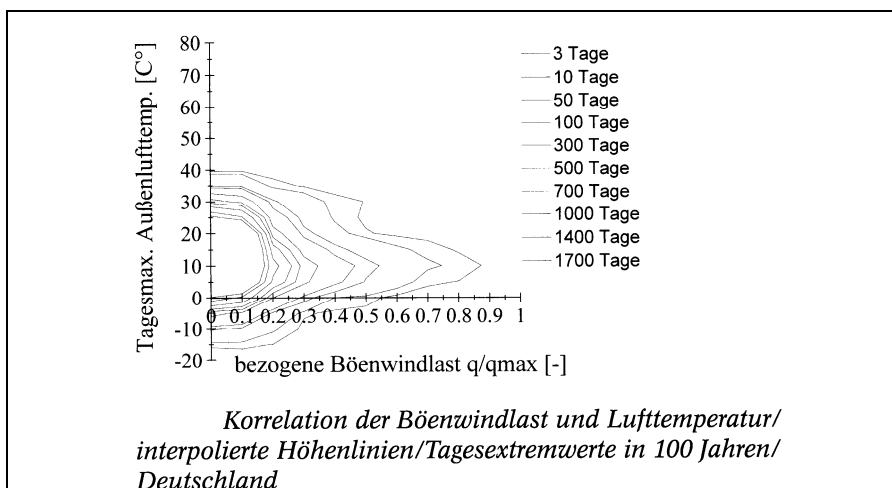


Bild 57:
Bezogene Böenwindlast
und Außenlufttempera-
tur für Deutschland, An-
zahl der Tagesextrem-
werte
[Wellershoff 2007]

Das bis hierhin beschriebene Vorgehen liefert regional spezifische Ergebnisse, die auch auf andere Bauteile anwendbar sind.

²² Der Maximalwert bestimmt sich aus den Wetterdaten, analog zum 50-Jahres Wind der Norm, als Jahresmaxima mit 50-Jahres Wiederkehrperiode und 2%-Quantile.

Da der Schubmodul in Abhängigkeit der Bauteiltemperatur beschrieben ist, die Wetterdaten aber nur Lufttemperaturen beinhalten, müssen die Daten nochmals angepasst werden. Aus diesem Grund wird die Differenztemperatur T_{Δ} eingeführt, die die Differenz zwischen Bauteil- und Lufttemperatur beschreibt. Die gesuchte Beziehung kann auf Basis von Temperatur- und Windmessungen gefunden werden, zum Beispiel einjährige Untersuchungen der Universität Stuttgart an Kästen aus VSG-Scheiben, siehe Bild 58.

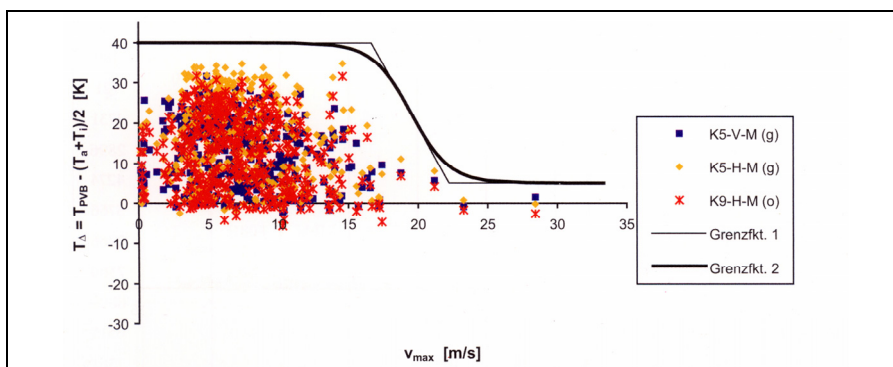


Bild 58:
Korrelation Böenge-
schwindigkeit und Diffe-
renztemperatur, am
Beispiel Schwarzemil-
glas [Wellershoff 2007]

Um die Messwerte auf die Zuordnungen in Bild 57 anwenden zu können, ist eine beschreibende Funktion notwendig. In diesem Beispiel die einhüllende Grenzfunktion

$$T_{\Delta, \max} = 22,5 - 17,5 \times \tanh\left(\frac{v-19,5}{2,8}\right)$$

$$T_{\Delta}(T_L > 0^{\circ}\text{C}) = T_{\Delta, \max} \times \frac{T_L}{T_{L, \max}} \quad (5.4)$$

Der interessierende Wert, die Temperatur der Zwischenschicht, kann dann aus der bereits bekannten Lufttemperatur T_L ermittelt werden, bei unbeheizten Bauteilen mit gleicher Lufttemperatur auf beiden Bauteilseiten mit

$$T_Z = T_L + T_{\Delta} \quad (5.5)$$

Bei Fassadenbauteilen beheizter Räume ist die Temperaturdifferenz von Innenluft (T_I , hier: 23 °C) und Außenluft (T_L) zu berücksichtigen mit

$$T_Z = \frac{T_L + T_I}{2} + T_\Delta \quad (5.6)$$

Hier sei anzumerken, dass dieser Ansatz im Hinblick auf Isoliergläser mit innenseitiger VSG-Scheibe eine nicht ganz realistische Näherung darstellt, da dort wahrscheinlich bei gleicher Lufttemperatur höhere und ungünstigere Zwischenschichttemperaturen vorliegen.

Mit den Ausdrücken lassen sich die Werte entsprechend Bild 57 in eine Zuordnung von Zwischenschichttemperatur und Windlast übertragen, siehe Bild 59.

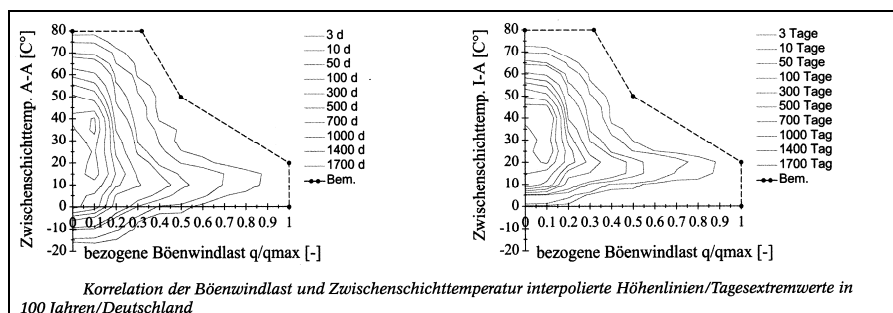


Bild 59:

Bezogene Böenwindlast und Zwischenschichttemperatur für Deutschland, Anzahl der Tagesextremwerte

[Wellershoff 2007]

Da die Belastungskollektive keine Aussage zur zeitlichen Abfolge der Werte ermöglichen, das Zwischenschichtverhalten aber zeitabhängige Retardationsvorgänge beinhaltet, sind zur Ermittlung der Oberflächenspannungen Windlast-Szenarien $w(t,T)$ erforderlich, siehe Bild 60.

Für Deutschland beträgt die durchschnittliche Durchzugszeit eines Sturmtiefs 4 Tage (96 Stunden). Dies kann in je ein 3 sec., 10 min. und 24 h Intervall eingeteilt werden. Hieraus folgt ein Windlastverlauf, der für bestimmte Temperaturen (z.B.: 20, 50 und 80 °C) und unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Wind-Temperatur-Zuordnung (vgl. Bild 59) das gesuchte Windlast-Szenario ergibt (vgl. Bild 60).

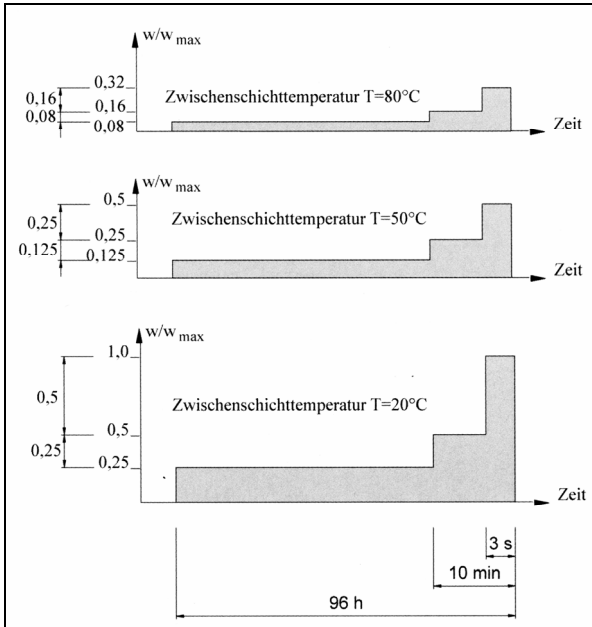


Bild 60:
Windlast-Temperatur-Zeitverläufe zur
VG-Bemessung in Deutschland
[Wellershoff 2007]

Mit diesen Belastungsszenarien sind mit einem für Verbundglas geeigneten Rechenansatz Oberflächenspannungen ermittelbar, wobei Berechnungen durch die Gültigkeit des Boltzmannschen Superpositionsprinzips vereinfacht werden.

Die Berücksichtigung der Restspannungen kann durch eine vorangehende Betrachtung des von der Belastungsdauer abhängigen Retardationsverhaltens vereinfacht werden. Für PVB bedeutet dies zum Beispiel, dass die Restspannungen der 3 sec. und 10 min. Ereignisse nach einem Tag und die der 24 h Ereignisse nach zwei Tagen abgeklungen sind. Dies ermöglicht die Definition einer materialspezifischen Überlagerungsvorschrift (für PVB: Spitzenspannungen aus 3 sec., 10 min. und 24 h Ereignissen des aktuellen Tages und Restspannungen der 24 h Ereignisse der beiden vorangegangenen Tage).

Diese auf Tagesmaxima beruhenden Spannungen $\sigma(G(t,T),w(t,T))$ können dann in Jahresmaxima mit 50-Jahres Wiederkehrperiode umgerechnet werden.

Das Vorgehen schließt mit der Ermittlung eines Schubmoduls. Hierzu wird der gewählte Rechenansatz entsprechend $G(\sigma, w_{\max})$ umgeformt. Aus den für verschiedene Geometrien ermittelten Schubmoduln sollten für die Anwendung geeignete Beziehungen identifiziert werden.

In [Wellershoff 2006] konnte mit dieser Methodik der Schubmodulansatz aus [Kutterer 2003] für vierseitig gelagerte VSG-Scheiben eingegrenzt werden. Als Ergebnis wurden auf Basis der kleinsten Schubmodulwerte die folgenden konstanten Bemessungswerte für PVB vorgeschlagen:

$$G_{\text{PVB,Wind}} = 0,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$
$$G_{\text{PVB,Schnee}} = 0,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Dies findet teilweise Berücksichtigung in dem aktuellem Normenentwurf [E DIN 18008]. Neben der Regelbemessung ohne Ansatz des Verbundes, werden für Verbund-Sicherheitsglas einwirkungsspezifische Abweichungen bei dem rechnerischen Ansatz des Schubverbundes zugelassen. Diese geben bei kurzzeitigen Belastungen (Wind) einen Schubmodul von $G_{\text{PVB, kurzzeitig}} = 0,4 \text{ N/mm}^2$ und bei Stoßbelastungen vollen Schubverbund an.

Weiterhin wird in dem Normenentwurf das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte eingeführt. Hierbei wird, wegen der unterschiedlichen Auswirkungen von Oberflächenschäden auf die Glasfestigkeit, in Gläser mit und ohne thermische Vorspannung unterschieden.

Für Gläser mit thermischer Vorspannung ergibt sich der Tragwiderstand zu:

$$R_d = \frac{f_k}{\gamma_M}$$

mit :

$$\gamma_M = 1,5$$
$$\gamma_M = 1,1 \quad \text{allseitig liniengelagerte Verglasungen}$$
(5.7)

Bei Gläsern ohne thermische Vorspannung finden die in Kapitel 3.1 beschriebenen Einflüsse von Oberflächenschäden auf Risswachstum und Bruch ihre Berücksichtigung in einem größeren Materialteilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,r}$, in einem k_{mod} -Wert zur Abbildung der Lastdauer und in der Reduzierung der Biegefestigkeit auf 80% des charakteristischen Wertes bei einachsig gespannten Bauteilen²³.

²³ Die allgemeine Formulierung lautet: „Bei planmäßig unter Zugbeanspruchung stehenden Kanten...“

$$R_d = \frac{k_{\text{mod}} \times f_k}{\gamma_M}$$

mit :

$$\gamma_M = 1,8$$

(5.8)

$$\gamma_M = 1,1 \quad \text{allseitig liniengelagerte Verglasungen}$$

$$k_{\text{mod}} = 0,7 \quad \text{Kombinationen mit kurzzeitigen Einwirkungen}$$

$$k_{\text{mod}} = 0,4 \quad \text{nur ständig, mittel und lang andauernde Einwirkung}$$

Bei Verbund-Sicherheitsglas darf wegen der geschützten Oberflächen an der Zwischenschichtseite die charakteristische Biegefestigkeit aller Glasmaterialien um 10% erhöht werden. Hier findet sich vom Prinzip die Vorgabe der [TRLV 2006] zur Erhöhung der zulässigen Biegezugspannungen bei VSG aus SPG wieder.

Exemplarische Bemessungen gemäß TRLV und gemäß Normenentwurf sind in [Siebert 2006] gegenübergestellt und zeigen, dass der Normenentwurf bei den vorgespannten Gläsern in der Regel zu einem wirtschaftlicheren Bemessungsergebnis führt. Für nicht vorgespanntes Glas ist allerdings zum Teil eine Verschärfung gegeben.

5.2. Scherversuche an Kleinproben

5.2.1. Versuchsaufbau

Zur Bestimmung von Qualität und Eignung des Schubverbunds der mehrlagigen HOE-Zwischenschicht wurden Scherversuche an Kleinproben 100×100 mm durchgeführt, siehe Bild 61. Bei der Dimensionierung der Probekörper ist zu berücksichtigen, dass im Randbereich der Proben herstellungsbedingt eine Störung des Verbundaufbaus auftreten kann. Die Proben sind daher so groß zu wählen, dass der Anteil der Randbereiche an der Gesamtscherfläche minimiert wird. Die Verwendung von Bohrkernen wurde ausgeschlossen, da bei dem Bohrvorgang die Zwischenschichten im Randbereich gestört werden und der Randbereich bei der geringen Größe der Bohrkern ($\varnothing \approx 30$ mm) einen erheblichen Einfluss hat. Gleichzeitig ergibt sich über die Beanspruchung der Glasstirnflächen infolge der Lasteinleitung eine maximale Probengröße. Der symmetrische Schichtaufbau der Proben, bestehend aus drei Scheiben $t_1/t_2/t_3 = 8/12/8$ mm und zwei Zwischenschichten, macht zusätzliche Zentrierungsmaßnahmen zur Aufnahme von Versatzmomente überflüssig, da die Lasteinleitung in die Innenscheibe und die Auflagerung unter den beiden Außenscheiben erfolgt.

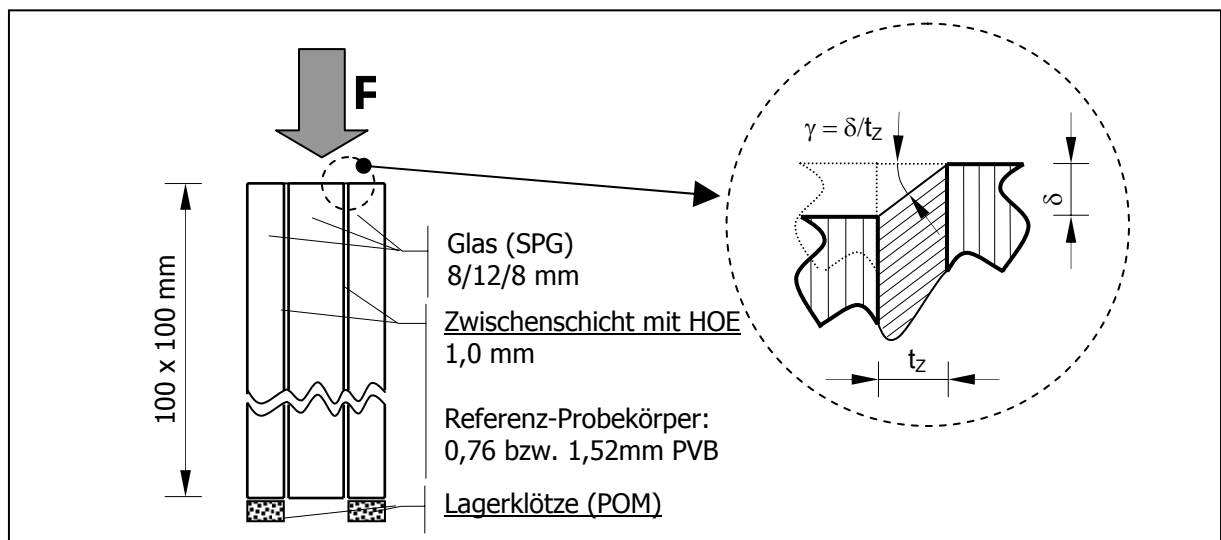


Bild 61: Scher-Test – Versuchskörper und Verzerrungsermittlung

Der Probekörper einschließlich des Lasteinleitungswerkzeuges und der Messinstrumentierung wurde in einen Klimaschrank eingebaut, siehe Bild 62.

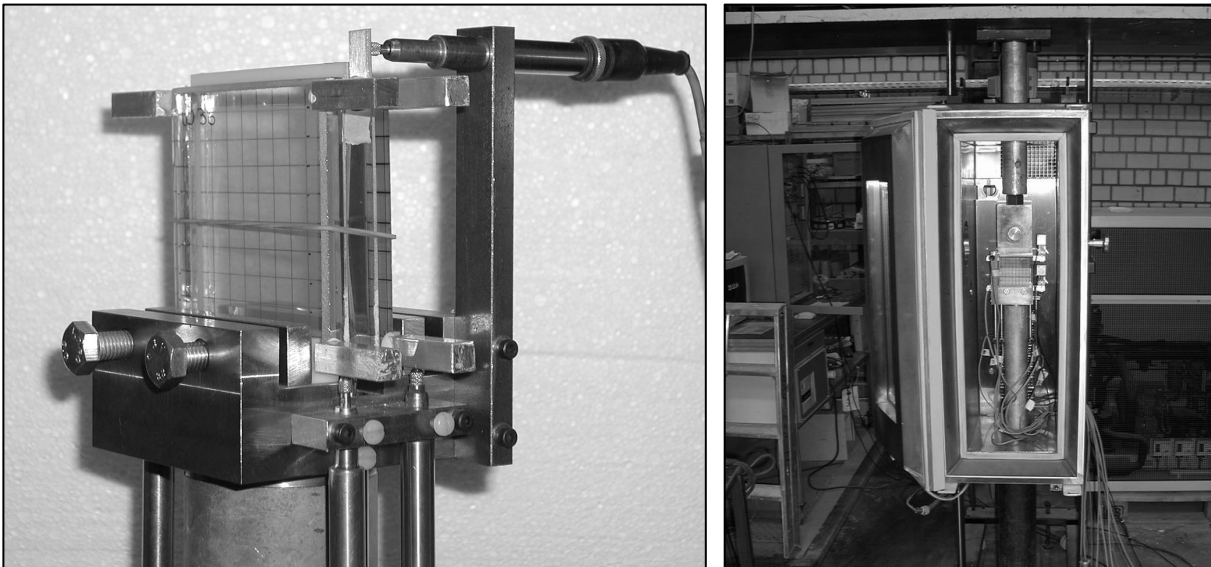


Bild 62: Scher-Test – Probekörper mit Instrumentierung und Klimaschrank

Die Aufbringung der Kraft erfolgte mittels Wegsteuerung in mehreren Be- und Entlastungsschritten mit jeweils zunehmenden Spitzenwerten, siehe Bild 63.

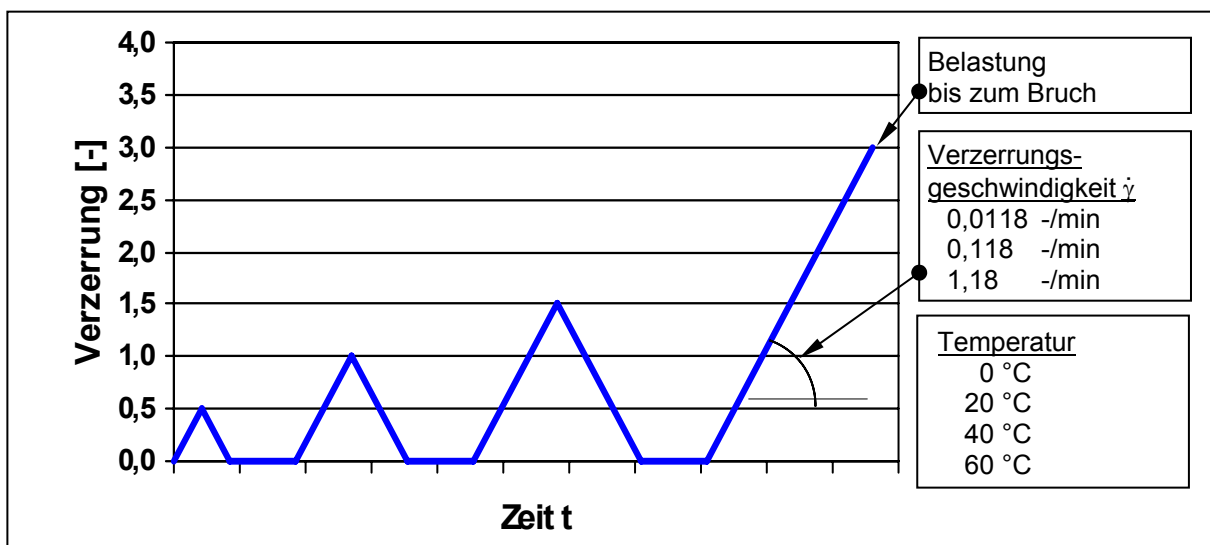


Bild 63: Scher-Test – Sollkurve für die Versuchssteuerung

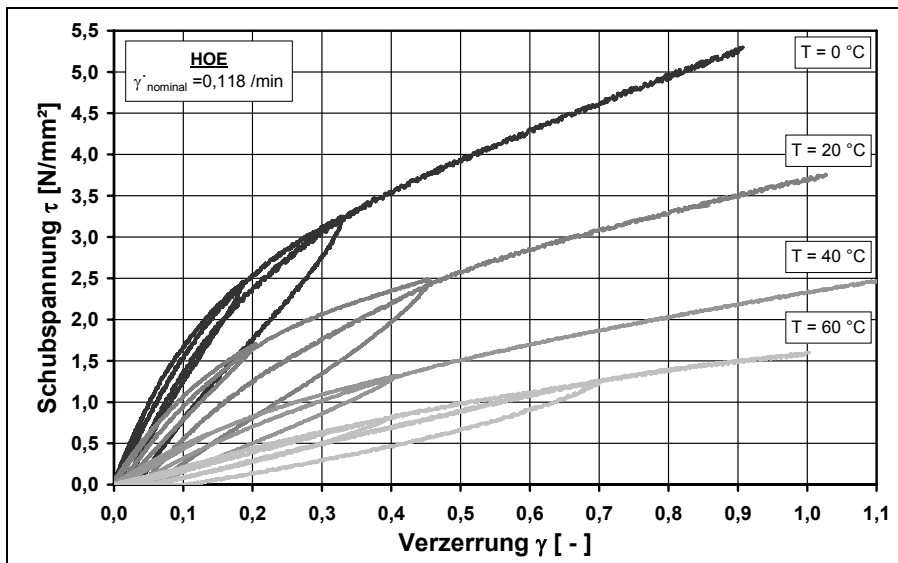


Bild 64:
Scher-Test (HOE)
Spannungs-Verzerrungs-
Diagramme für
 $T = 0 / 20 / 40 / 60^\circ\text{C}$

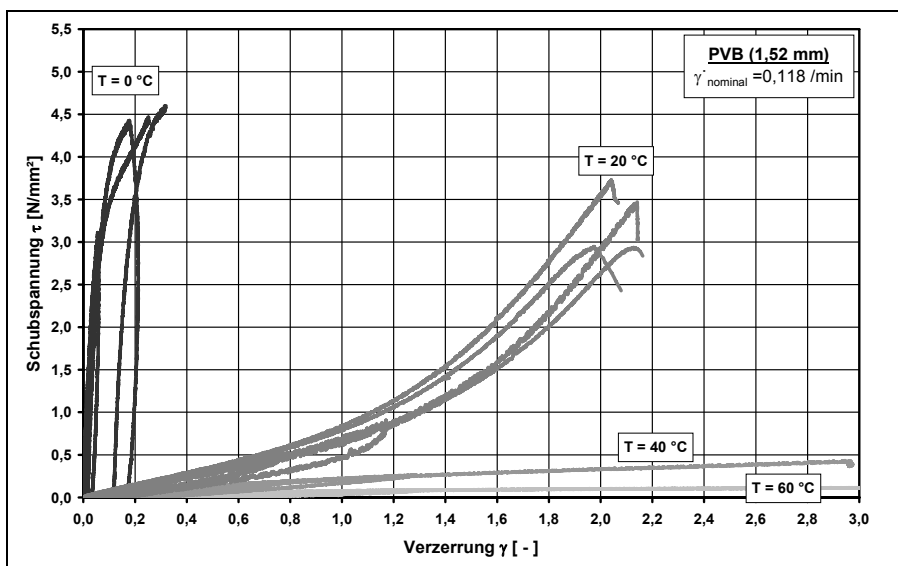


Bild 65:
Scher-Test (PVB)
Spannungs-Verzerrungs-
Diagramme für
 $T = 0 / 20 / 40 / 60^\circ\text{C}$

Die für Kunststoffe typische Temperaturabhängigkeit ist an der abnehmenden Steifigkeit bei zunehmender Temperatur zu erkennen. Der Steifigkeitsabfall der HOE-Zwischenschicht ist im Bereich $T = 0 \dots 60^\circ\text{C}$ annähernd gleichmäßig, da der Glasübergang ($T_{g,EVA} = -28^\circ\text{C}$) bereits überschritten ist. Dieses Merkmal ist hinsichtlich der Nutzung im Bauwesen deutlich günstiger als der erhebliche Steifigkeitsabfall des PVB bei $T_{g,PVB} \approx 20^\circ\text{C}$ (Bild 21), der auch bei den Vergleichsprobekörpern mit PVB-Verbundfolie zu beobachten war, siehe Bild 65.

5.2.2.1 Versagen der Proben

Alle Proben versagten mit einem Adhäsionsbruch der Zwischenschicht. Delaminationen (Blasenbildungen) konnten nur kurzzeitig vor dem Adhäsionsbruch beobachtet werden. Die zugehörigen maximalen Schubspannungen τ sind mit den korrespondierenden Verzerrungen γ der Zwischenschicht in Bild 66 dargestellt.

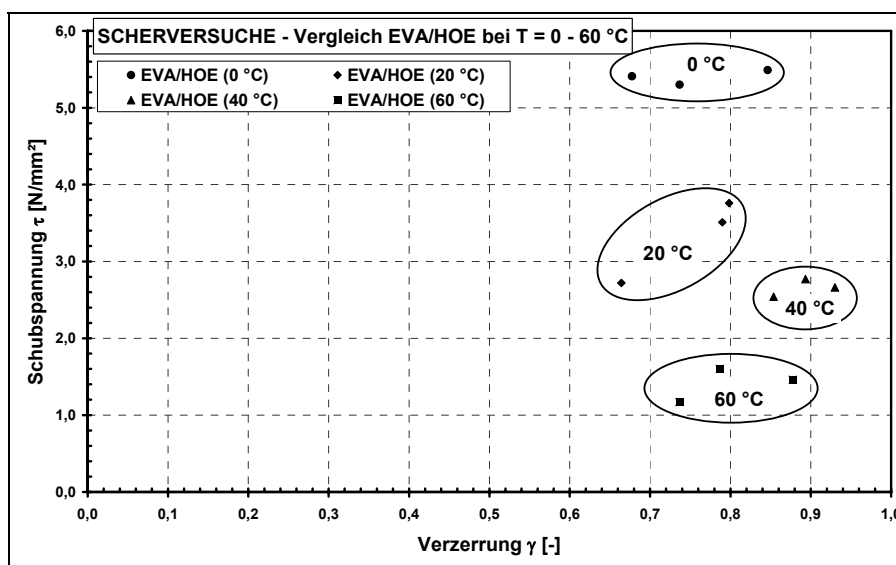


Bild 66:
Max. Schubspannung
mit zugehöriger
Verzerrung

Es zeigt sich, dass τ_{\max} unabhängig von der Temperatur, jeweils im gleichen Verzerrungsbereich ($\gamma = 0,65-0,95$) auftritt und die Schubspannung τ_{\max} - wie auch in Bild 64 gezeigt - mit zunehmender Temperatur abnimmt. Die Datentripel je Temperaturschritt stellen die Ergebnisse für die drei untersuchten Verzerrungsgeschwindigkeiten (1,18; 0,118; 0,0118 -/min) dar. Die Zuordnung von τ und γ zu den Verzerrungsgeschwindigkeiten (siehe Bild 67) zeigt, dass die Verzerrungsgeschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss hat. Innerhalb der vier durch die Prüftemperatur gekennzeichneten Versuchsgruppen treten die maximalen Schubspannungen jeweils bei unterschiedlichen Verzerrungsgeschwindigkeiten auf.

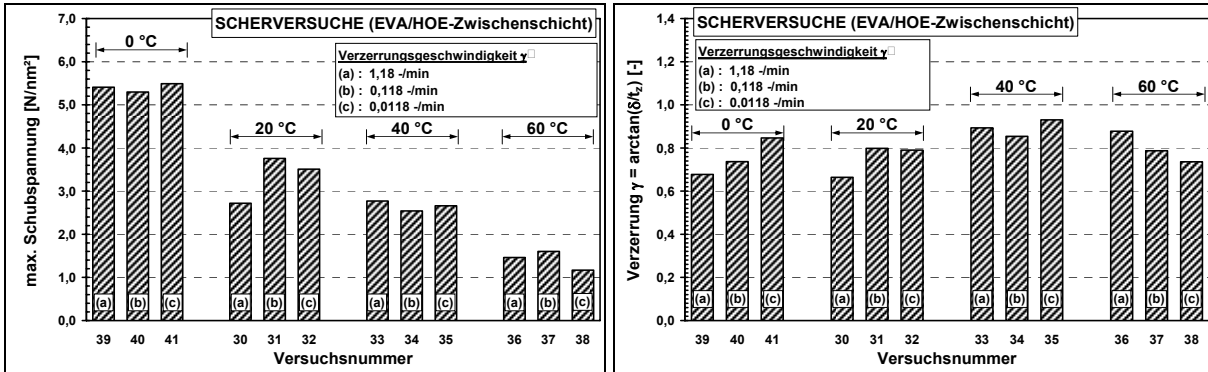


Bild 67: Einfluss der Verzerrungsgeschwindigkeit (max. Schubspannung und Verzerrung)

Zur Überprüfung des Einflusses des Belastungsszenarios wurden, in Ergänzung der zyklischen Be- und Entlastung, zusätzliche Proben ausschließlich mit einer bis zum Versagen kontinuierlich ansteigenden Last beaufschlagt, siehe Bild 68.

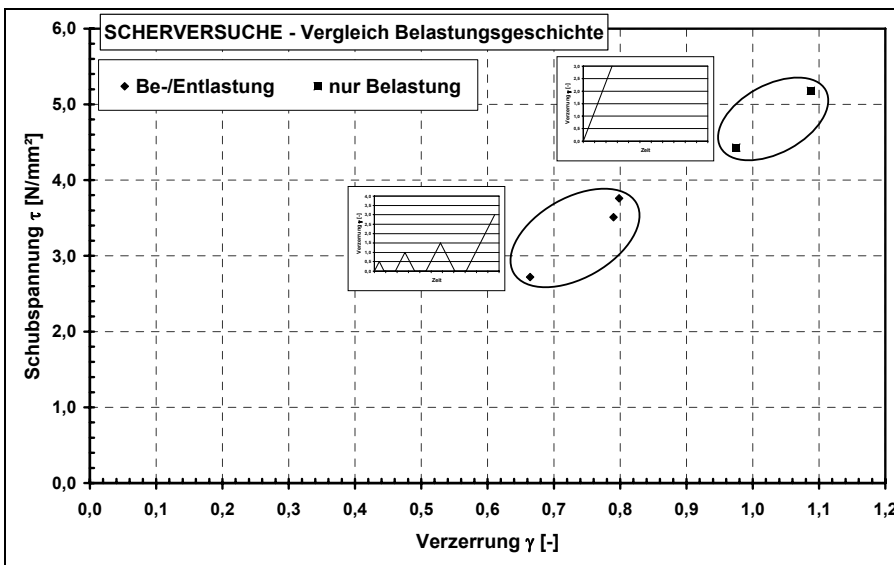


Bild 68: Max. Schubspannung bei unterschiedlicher Belastungskurve

Bei den Tests mit Be- und Entlastungsphasen versagten die Proben bei kleineren Verzerrungen und Schubspannungen als bei den Tests mit konstant ansteigender Beanspruchung. Der Schubmodul ($G = \tau/\gamma$) ist jedoch bei beiden Belastungsgeschichten in etwa gleich.

Der Auf- und Abbau der Schubverzerrungen im Verlauf des Versuchsszenarios ist in Bild 69 dargestellt und nachstehend unter Bezugnahme auf die in Kapitel 5.1.1 vorgestellten mechanischen Modelle erläutert.

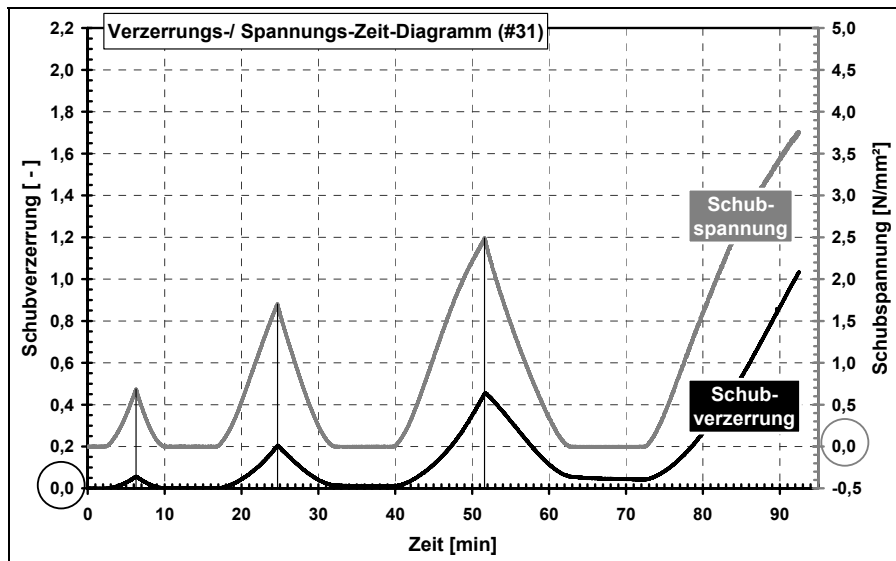


Bild 69:

Schubverzerrungen und -spannungen bei Be- und Entlastung

- Belastung: Eine Verzerrung mit den zugehörigen Schubspannungen wird aufgebaut.
- Entlastung: Der elastische Verformungsanteil wird sofort, der viskoelastische Anteil verzögert abgebaut, siehe Burgers-Element (Bild 54, Seite 57).
- Wiederbelastung: Die erneuten Verzerrungen und Spannungen überlagern sich mit den noch vorhandenen Restverzerrungen, Boltzmann Prinzip.
- Der Entlastungs- und Wiederbelastungsvorgang wird mehrfach wiederholt.
- Die Verzerrungen zum Zeitpunkt des Versagens setzen sich zusammen aus den Verzerrungen des Wiederbelastungsvorgang sowie den verbliebenen viskosen und viskoelastischen Verzerrungsanteilen der vorangegangenen Be- und Entlastungsschritte.

5.2.2.2 Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen

Die zu den verschiedenen Belastungsphasen einer Probe gehörenden τ - γ -Verläufe sind annähernd deckungsgleich. Dies ermöglicht die Versuchsergebnisse in eine Funktion zu überführen. Hierzu wird die folgende Regressionsfunktion [Menges et al. 2002] verwandt.

$$\tau = E_0 \gamma \frac{1 - D_1 \gamma}{1 + D_2 \gamma} \quad (5.11)$$

Die Koeffizienten E_0 , D_1 und D_2 können unter Verwendung des dreidimensionalen Newton-Verfahrens bestimmt werden.

Die gewonnenen Funktionen, siehe Bild 70, zeigen eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten.

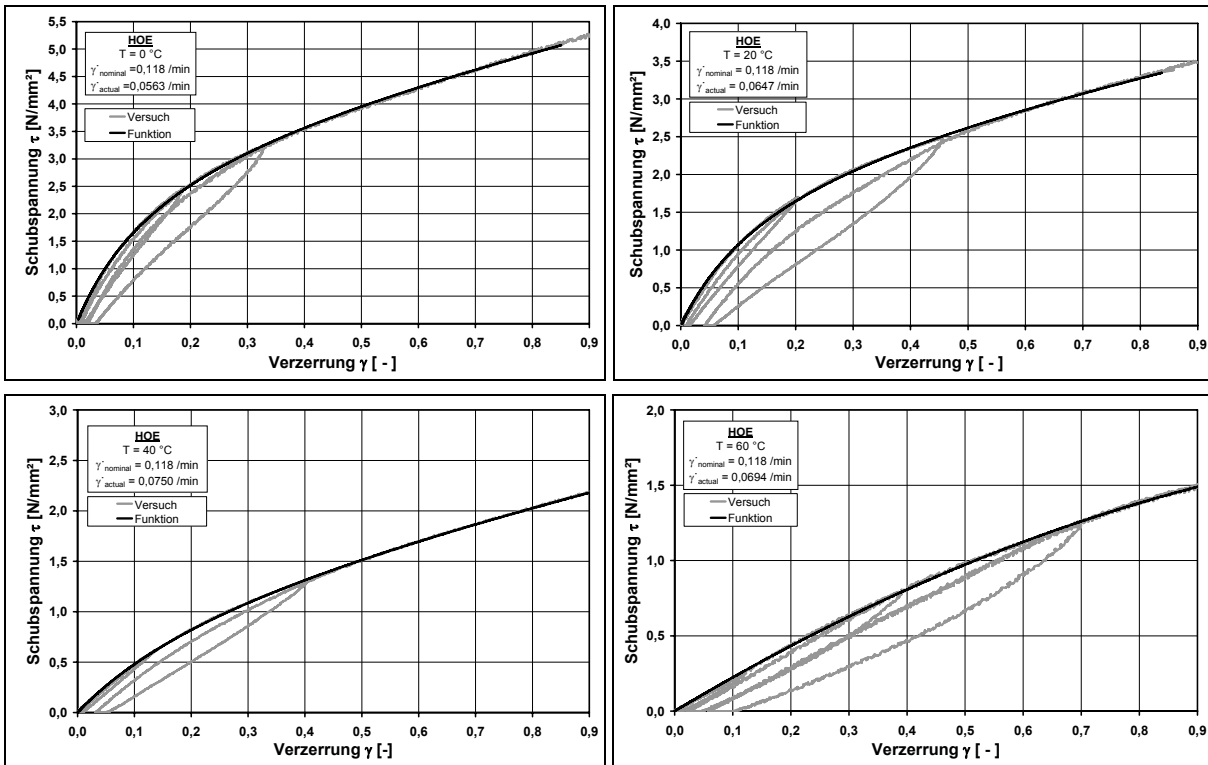


Bild 70: Spannungs-Verzerrungs-Diagramm mit Versuchs- und Funktionsdaten [Wrede 2003]

Mit der folgenden Betrachtung an der in Bild 71 dargestellten Lamelle wird der baupraktisch relevante Bereich der Verzerrungen ermittelt.

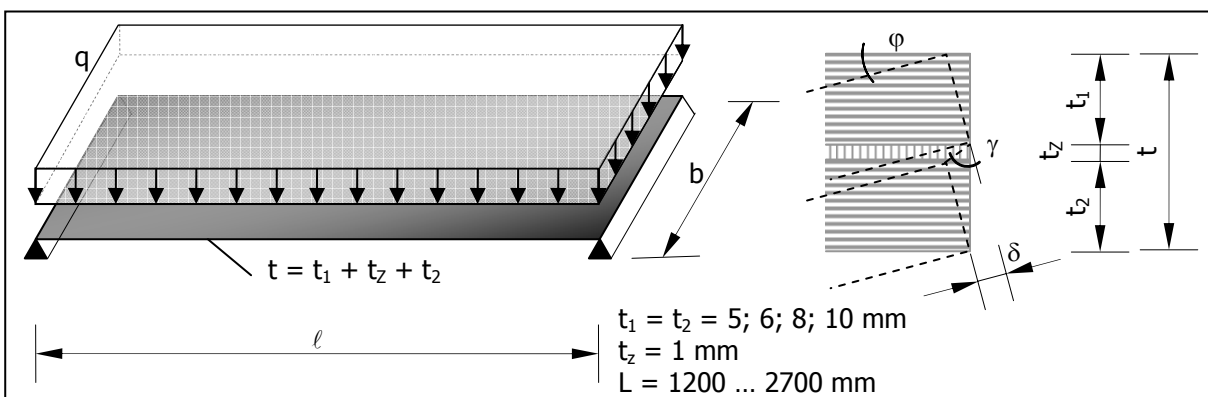


Bild 71: Liniengelagerte Lamelle

Die maximale Verzerrung der Zwischenschicht ergibt sich für $G = 0$ und lässt sich in Abhängigkeit der Durchbiegung und der Biegespannung ausdrücken:

$u = \frac{5 \cdot q \cdot \ell^4}{384 \cdot EI} \quad \text{Durchbiegung}$ $\bar{u} = \frac{u}{\ell} \quad \text{bezogene Durchbiegung}$ $\varphi = \frac{q \cdot \ell^3}{24 \cdot EI} \quad \text{Auflagerverdrehung}$ <p>einsetzen von $q(u)$ ergibt</p> $\varphi = \frac{16}{5} \cdot \bar{u}$ $\delta = (t_2 + t_Z) \tan(\varphi) \quad \text{Versatz der Glasscheiben}$ $\gamma_{SLS} = \arctan\left(\frac{t_2 + t_Z}{t_Z} \cdot \tan\left(\frac{16}{5} \cdot \bar{u}\right)\right) \quad \text{Verzerrung}$ <p>Vereinfachter näherungsweise Ausdruck</p> $\gamma_{SLS} \approx \frac{16}{5} \cdot \frac{t_2 + t_Z}{t_Z} \cdot \bar{u} \quad \text{Verzerrung}$	$\sigma = \frac{M}{W} \quad \text{Biegespannung}$ <p>mit</p> $M = \frac{q \cdot b \cdot \ell^2}{8}$ $W = \frac{b \cdot t_{1,2}^2}{3}$ $\varphi = \frac{q \cdot \ell^3}{24 \cdot EI} \quad \text{Auflagerverdrehung}$ <p>mit $q(\sigma)$ und</p> $EI = E \sum_i \frac{b \cdot t_i^3}{12} \quad \text{Biegesteifigkeit der Glasscheiben}$ <p>ergibt sich</p> $\varphi = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \ell}{3 \cdot t_{1,2} \cdot E \cdot b}$ $\delta = (t_2 + t_Z) \tan(\varphi) \quad \text{Versatz der Glasscheiben}$ $\gamma_{ULS} = \arctan\left(\frac{t_2 + t_Z}{t_Z} \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot \ell}{3 \cdot t_{1,2} \cdot E \cdot b}\right)\right) \quad \text{Verzerrung}$ <p>Vereinfachter näherungsweise Ausdruck</p> $\gamma_{ULS} \approx \frac{2}{3} \cdot \frac{t_2 + t_Z}{t_Z} \cdot \frac{\sigma \cdot \ell}{t_{1,2} \cdot E \cdot b} \quad \text{Verzerrung}$
--	--

Mit den zulässigen Durchbiegungen und Biegespannungen gemäß [TRLV 2006] ergeben sich für eine Zwischenschicht mit $t_Z = 1$ mm die in Bild 72 dargestellten maximalen Verzerrungen.

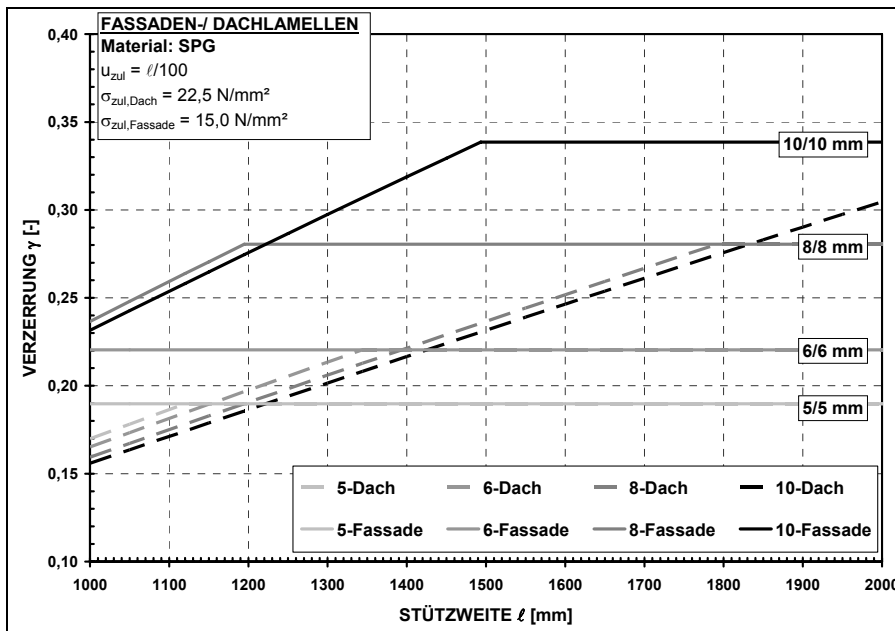


Bild 72:

Maximale Verzerrung für Fassaden- und Dachlamellen mit Zwischenschicht $t_z = 1 \text{ mm}$

Die über die Stützweite konstanten Werte resultieren aus der Bedingung für die Gebrauchstauglichkeit (Begrenzung der Durchbiegung), die ansteigenden Graphen aus der Bedingung für die Tragfähigkeit (Begrenzung der Biegespannung).

Der maximale Wert der Verzerrung ergibt sich für den Schubmodul $G = 0$ und beträgt $\gamma = 0,34$ für $t_1/t_2 = 10/10 \text{ mm}$ (vgl. Bild 74). Ein maximaler Wert für die Schubspannung τ lässt sich bei Ansatz von $G \rightarrow \infty$ ermitteln:

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot b}$$

mit:

$$V = \frac{q \cdot b \cdot \ell}{2}$$

$$S = t_{1,2} \cdot b \cdot \frac{t_{1,2} + t_z}{2} \tag{5.12}$$

$$I = 2 \cdot b \cdot \left(\frac{t_{1,2}^3}{12} + t_{1,2} \cdot \left(\frac{t_{1,2} + t_z}{2} \right)^2 \right)$$

$$\tau_{\max} \leq \frac{3 \cdot q \cdot \ell}{2} \frac{t_{1,2} + t_z}{4t_{1,2}^2 + 6t_{1,2}t_z + 3t_z^2}$$

Die Auswertung für Lamellen mit $l = 1350 \text{ mm}$ und 2700 mm ist in Bild 73 in Abhängigkeit der Flächenlast für Glasdicken $t_1/t_2 = 6/6 \dots 10/10 \text{ mm}$ dargestellt.

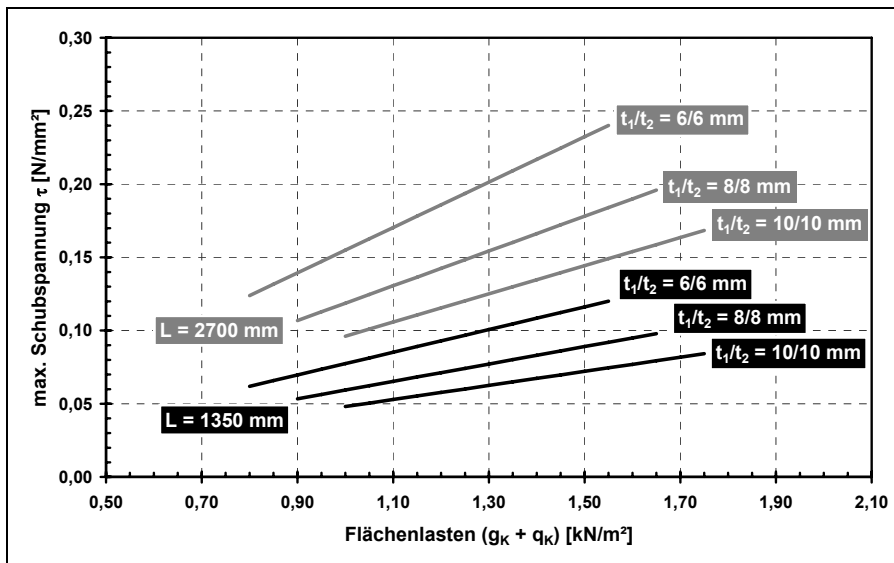
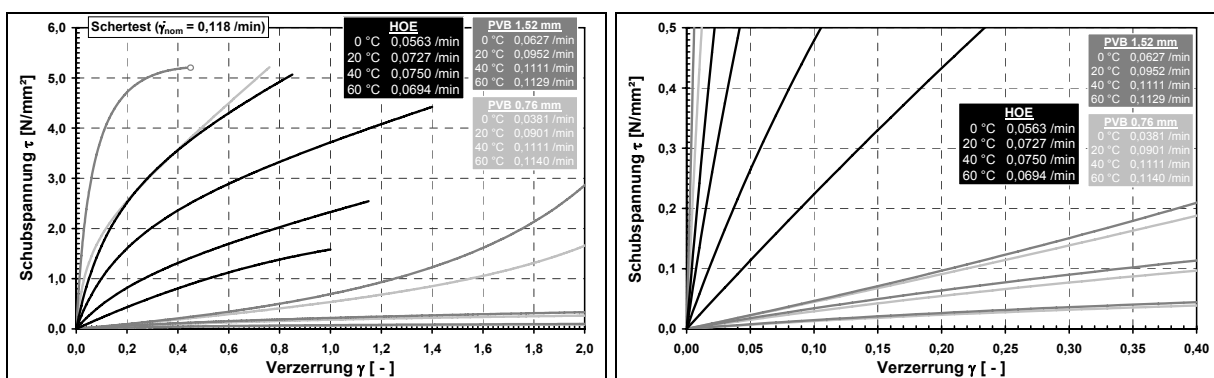


Bild 73:

Maximale Schubspannung bei Zwischenschicht $t_z = 1 \text{ mm}$

Für Verbundgläser mit einer Spannweite $l \leq 2700 \text{ mm}$ und Dicken der Einzelscheiben $t_{1,2} \geq 6 \text{ mm}$ ergeben sich Schubspannungen von $\tau \leq 0,24 \text{ N/mm}^2$.

Der Vergleich mit den auf Basis der Versuchsergebnisse erstellten Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen für HOE- und PVB-Zwischenschicht (Bild 74) zeigt, dass die Größenordnungen der Verzerrungen zum Zeitpunkt des Versagens deutlich über dem zuvor ermittelten baupraktischen Verzerrungsbereich liegen. Es kann somit von einer grundsätzlichen Eignung der Folie ausgegangen werden. Des Weiteren zeigen die Diagramme in dem baupraktisch relevanten Ausschnitt (vgl. Bild 74 b) einen linearen Verlauf.

Bild 74: Spannungs-Verzerrungs-Diagramme von HOE und PVB für $T = 0 \dots 60 \text{ } ^\circ\text{C}$

a) gesamter Messbereich, b) Ausschnitt des baupraktisch relevanten Bereichs

Der Vergleich der Ergebnisse für HOE- und PVB-Zwischenschichten zeigt, dass sich bei 0 °C annähernd gleiche Steifigkeiten und bei höheren Temperaturen (20 / 40 / 60 °C) für HOE größere Steifigkeiten einstellen. Es liegt somit ein Tragverhalten vor, dass dem der PVB-Folie mindest gleichwertig und bei höheren Temperaturen sogar überlegen ist.

Als weiterer Parameter wurde die Verzerrungsgeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ untersucht. Die zugehörigen τ - $\dot{\gamma}$ -Diagramme für verschiedene Verzerrungsgeschwindigkeiten sind in Bild 75 angegeben.

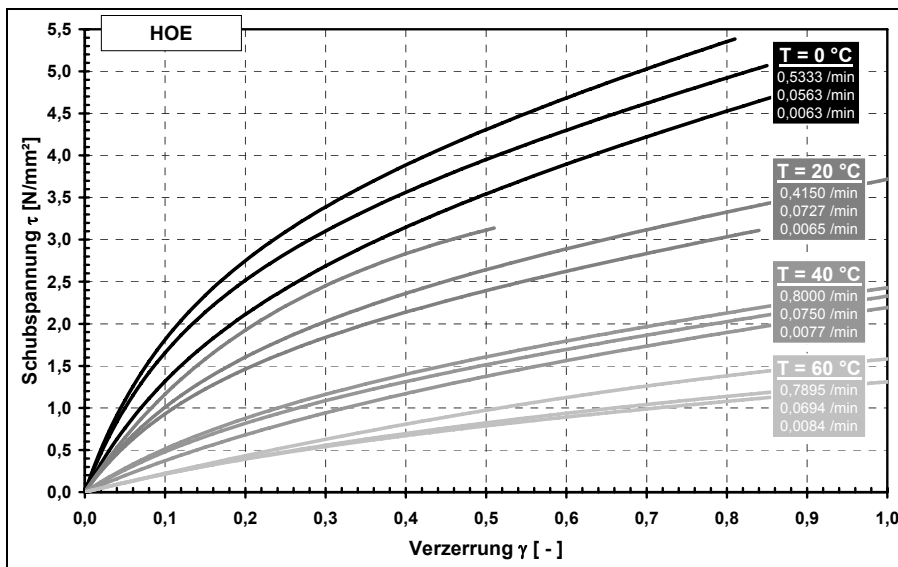


Bild 75:
Spannungs-Verzerrungs-
Diagramm für HOE
bei versch. Temperatu-
ren und Verzerrungsges-
chwindigkeiten

Es zeigt sich, dass die Verzerrungsgeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ im Gegensatz zu der Temperatur nur einen eher geringen Einfluss hat. Es ist eine deutliche Gruppierung hinsichtlich der Temperatur T zu erkennen, wogegen die Graphen für verschiedene $\dot{\gamma}$ bei gleicher Temperatur T dicht beieinander liegen. Prinzipiell ist jedoch mit steigender Verzerrungsgeschwindigkeit eine gewisse Zunahme der Steifigkeit zu beobachten.

5.2.3. Zusammenfassung der Ergebnisse der Schertests

Die HOE-Zwischenschicht zeigte eine gleichmäßige Temperaturabhängigkeit über den Bereich 0...60 °C. Die Proben versagten unter unterschiedlichen Temperaturen bei in etwa gleichen Verzerrungen.

Der Einfluss der Verzerrungsgeschwindigkeit auf den Schubmodul ist gering.

Auch bei mehreren Be- und Entlastungsphasen stellt sich das gleiche Verzerrungsverhalten ein, die Schersteifigkeit bleibt gleich.

Bei Temperaturen unterhalb des Glasübergangs von PVB sind die Verzerrungen bei PVB und HOE ähnlich, oberhalb des PVB-Glasübergangs ist PVB deutlich weicher.

5.3. Untersuchungen an Lamellen

5.3.1. Untersuchte Konstruktionen

Die experimentellen Untersuchungen an Funktionsglas-Lamellen einschließlich Halterung wurden mit dem Ziel durchgeführt, die folgenden Eigenschaften zu identifizieren:

- Tragverhalten mit intakter Glasscheibe
 - Verformungen bei Be- und Entlastung
 - Bruchlast der Glasscheibe
 - Verhalten der Zwischenschicht
 - Verhalten der Halterungen und der Glasscheibe im Halterungsbereich
- Tragverhalten mit gebrochener Glasscheibe
 - Resttragverhalten
 - Splitterbindung

Es wurden Biegeversuche an ausgewählten Konstruktionen aus Kapitel 4.1 durchgeführt, siehe Tabelle 7.

Die Größe der Glaselemente betrug 1350×400 mm, entsprechend den maximalen Pfostenabständen gängiger Fassadenraster. Die Gläser wurden mittels Linienlagerung oder Punktlagerung (gesenkter Punkthalter und Hinterschnittanker) befestigt.







TEST-REIHE	GLASHALTERUNG	LAMELLEN-HALTERUNG	
		Starr	Nachführbar
	Linienlagerung		
200	2-seitig liniengelagert		
	Punktlagerung		
300	Durchbindender Punkthalter		
400	Hinterschnittanker		

Tabelle 7: Konstruktionen für Biegeversuche

Die wesentlichen Daten der Scheiben sind in Tabelle 8 und Bild 76 angegeben.

	GLASHALTERUNG		
	Linienlagerung	Punktlagerung	
		Durchgebohrter Punkthalter	Hinterschnittanker
Test Reihe	200	300	400
Glas abmessungen	1350 × 400 mm		
Glasdicke	6/6 und 10/10 mm	8/8 mm	8/10 mm (auflagerseitig 8 mm)
Glasmaterial	SPG	TVG	TVG
Zwischenschicht	HOE Referenz: PVB (0,76/1,52 mm)	HOE Referenz: PVB (0,76/1,52 mm)	HOE Referenz: PVB (1,52 mm)
Glashalterung	Glashalteleiste mit POM-Klotzung	Gesenkter Telleranker mit Gelenk	Hinterschnittanker
Randabstand Auflagerachse	7,5 mm	100 mm	60 mm

Tabelle 8: Wesentliche Daten der Glasprobekörper

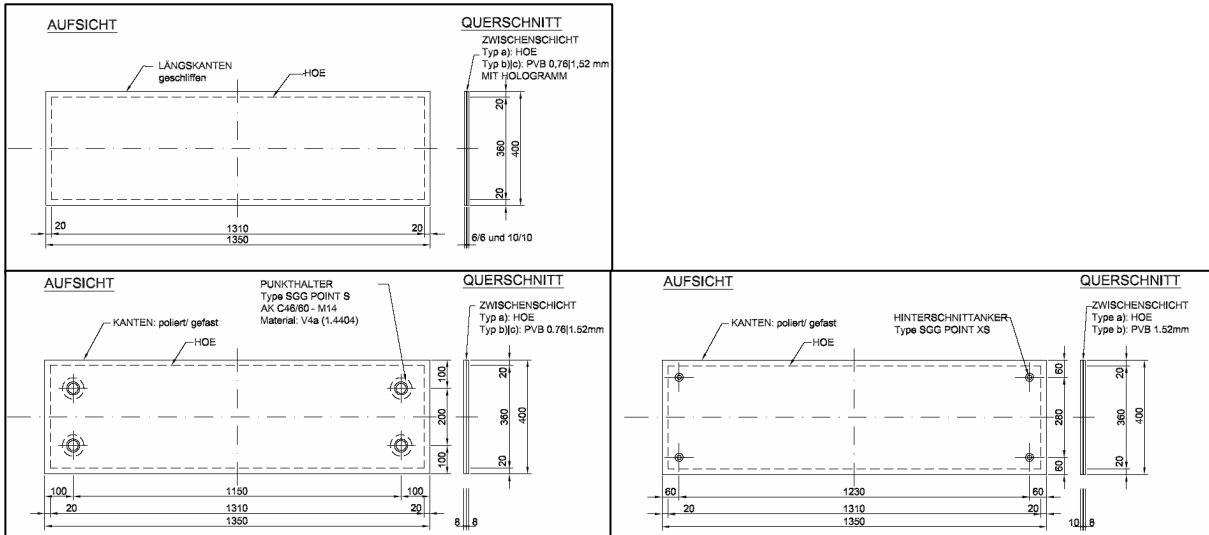


Bild 76: Glas-Probekörper für Biegeversuche

Die Lamellen wurden als starre und als nachführbare Lamellen (um die Längsachse drehbar) untersucht. Im Falle der starren Lamellen erfolgte die Befestigung der Glas-Halterungen (Linienlagerung, Punktlagerung mit gesenkten Punkthaltern oder Hinterschnittankern) direkt an dem Auflagerträger des Teststandes, vgl. Bild 77.

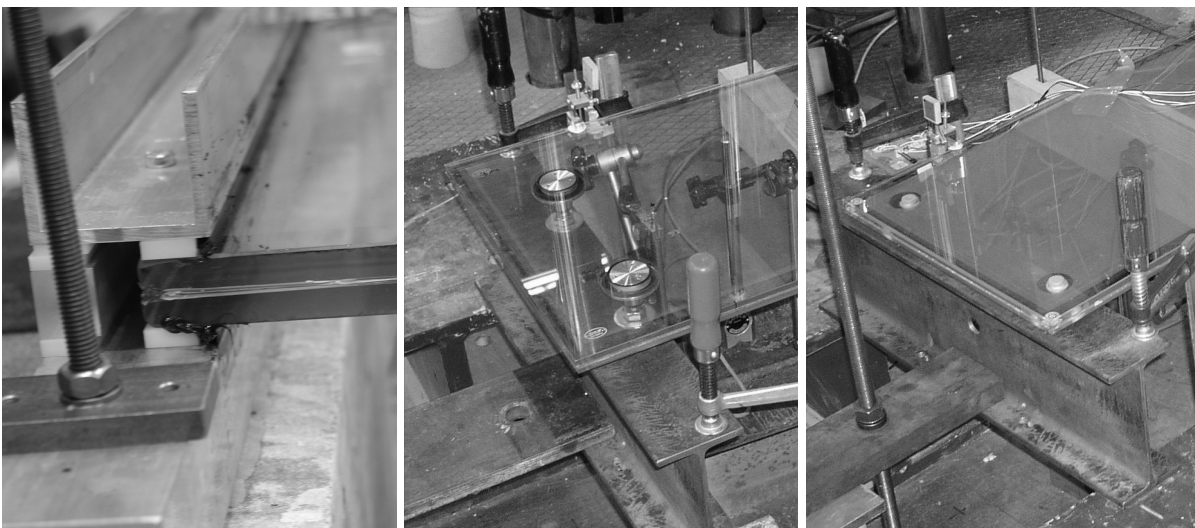


Bild 77: Auflagerung für starre Lamellen
 a) Linienlager, b) gesenkte Punkthalter, c) Hinterschnittanker

Bei den nachführbaren Lamellen ist ein Konstruktionselement zwischen Glashalterung und Fassaden-Unterkonstruktion erforderlich. Dieses Element nimmt die Glashalterung auf und ist über eine Welle in einer Bohrung des Auflagerträgers des Teststandes gelagert. Die Welle mit Ringlager ermöglicht die Rotation der Lamelle um die Längsachse. Die Ausführung für zweiseitig liniengelagerte Gläser ist in Bild 78 dargestellt.

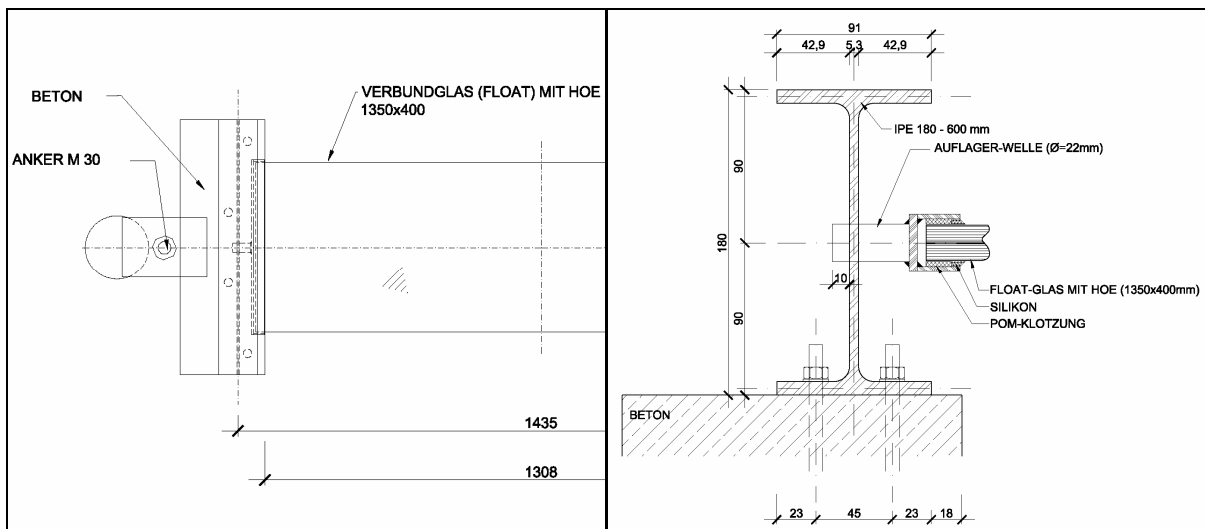


Bild 78: Auflager-Element für nachführbare Lamellen mit liniengelagertem Verbundglas

Die Konstruktionen für punktgehaltene Gläser mit gesenkten Punkthaltern und mit Hinterschnittankern zeigen Bild 79 und Bild 80.

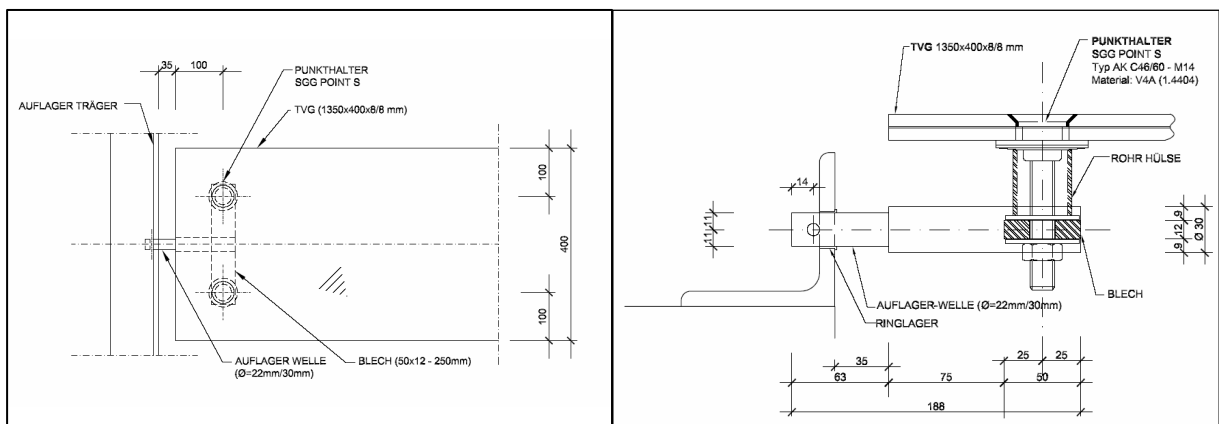


Bild 79: Auflager-Element für nachführbare Lamellen mit gesenktem Punkthaltern

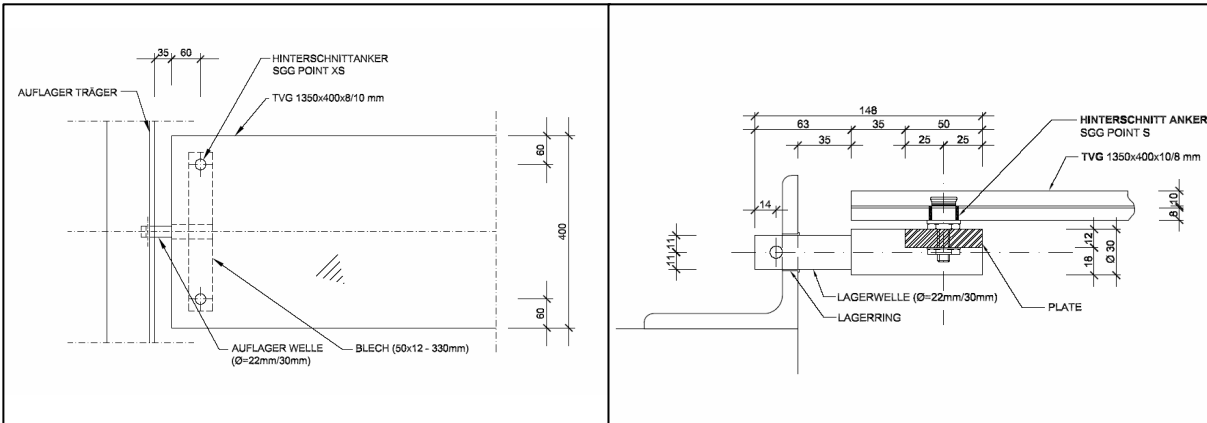


Bild 80: Auflager-Element für nachführbare Lamellen mit Hinterschnitt-Ankern

In Kapitel 4 wurde bereits auf die Anordnung von Gelenken innerhalb der Lamellenauflegung eingegangen. Die hier betrachteten Konstruktionen gehen von einer gelenkigen Lagerung der Lamelle aus. Die Punkthalter müssen somit die Übertragung kleiner Momente gewährleisten.

5.3.2. Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau ist als Vier-Punkt-Biegeversuch konzipiert, Bild 81.

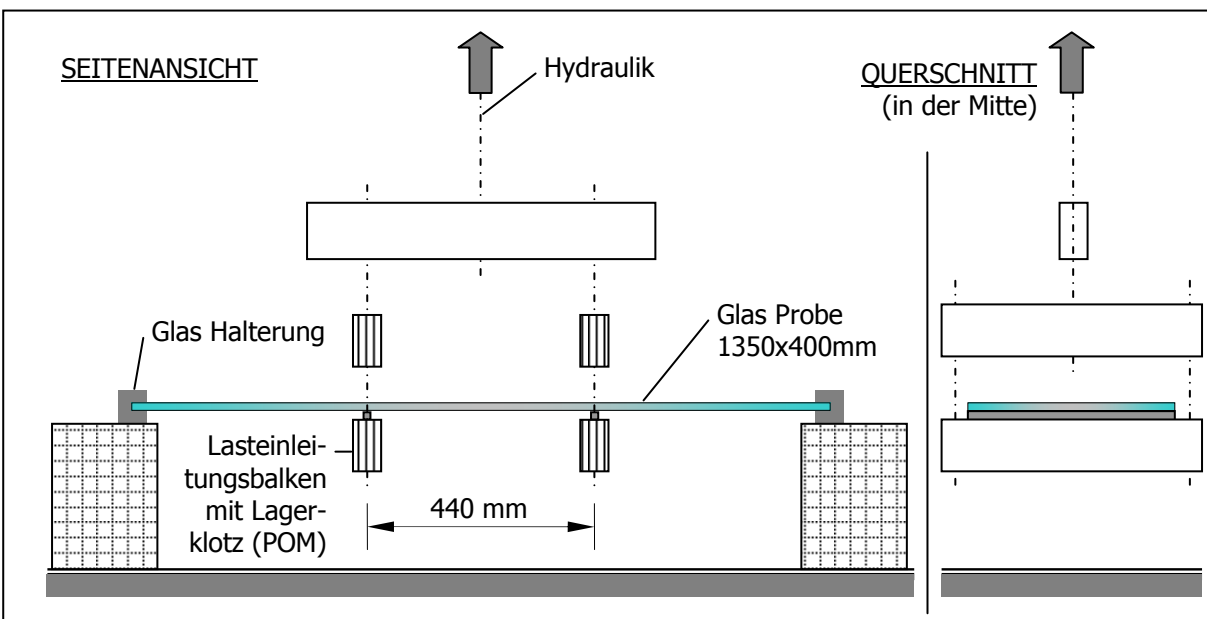


Bild 81: Vier-Punkt-Biegeversuch (Prinzipskizze)

Der Auflagerträger zur Aufnahme der unterschiedlichen Lamellen- oder Glashalterungen ist im Spannboden des Teststandes verankert.

Die Lasteinleitung erfolgt in den $\frac{1}{3}$ -Punkten, jeweils als Linienlast über die Scheibenbreite. Die Lasteinleitungsstruktur, bestehend aus gelenkig verbundenen Einfeldträgern, gewährleistet die gleichmäßige Lastverteilung auf die beiden Lasteinleitungspunkte.

Die Lastaufbringung erfolgt in mehreren Schritten (Bild 82):

- Lasterhöhung bis zur doppelten Verkehrslast
- Konstante Last über mindestens drei Stunden
- Lasterhöhung bis zum Glasbruch zur Identifizierung der Tragfähigkeit
- Konstante $\frac{1}{2}$ -fache Verkehrslast über mindestens 24 Stunden zur Identifizierung der Resttragfähigkeit im Hinblick auf die Verwendung im Überkopfbereich

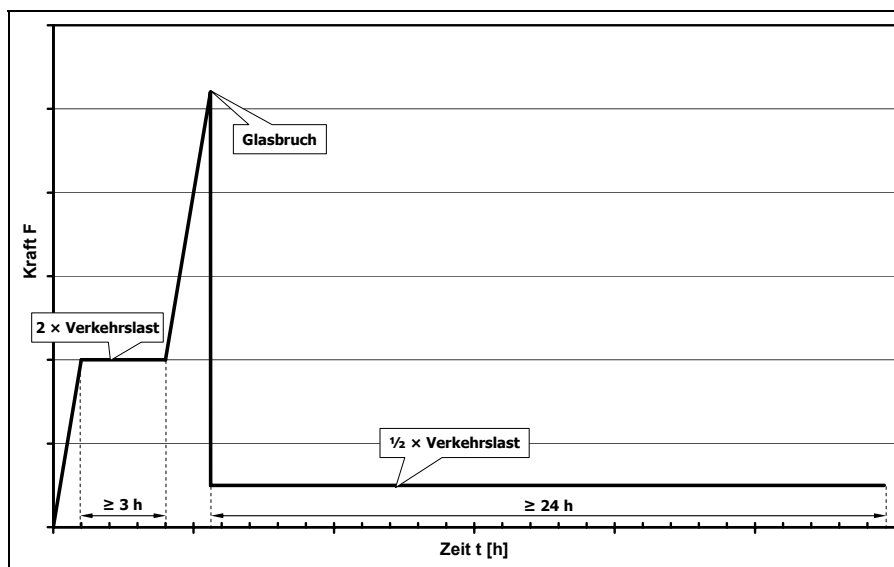


Bild 82:
Belastungsgeschichte

Die Anordnung der Messinstrumente stellt sich zusammen aus (Bild 83):

- Wegaufnehmern (HBM WA100 bzw. WA50) → Durchbiegungen
- DMS (HBM LY11 6/120) → Dehnungen im Glas

- Dehnungsaufnehmern (HBM DD1) → Scheibenversatz im Verbundglas
- Kraftmessdose (HBM Z3H3 10 kN) → Eingeleitete Gesamtkraft
- Thermoelement (HBM PT100) → Oberflächentemperatur der Glasscheibe

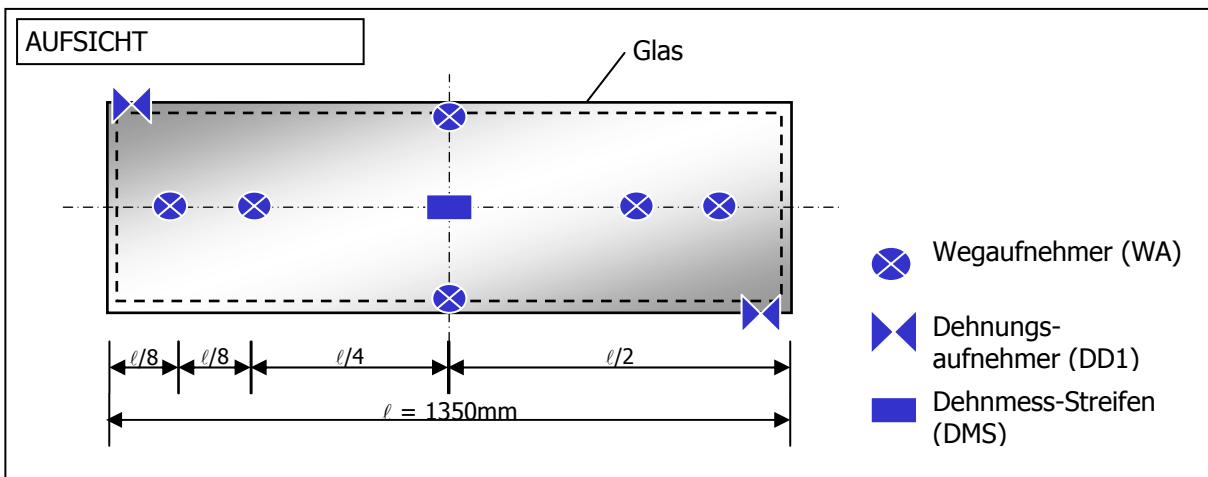


Bild 83: Messeinrichtungen

Die Lamellen mit Punkthaltern wurden in zwei Einbaulagen getestet, um Differenzen im Tragverhalten bei Winddruck und Schnee oder bei Windsog identifizieren zu können, Bild 84.

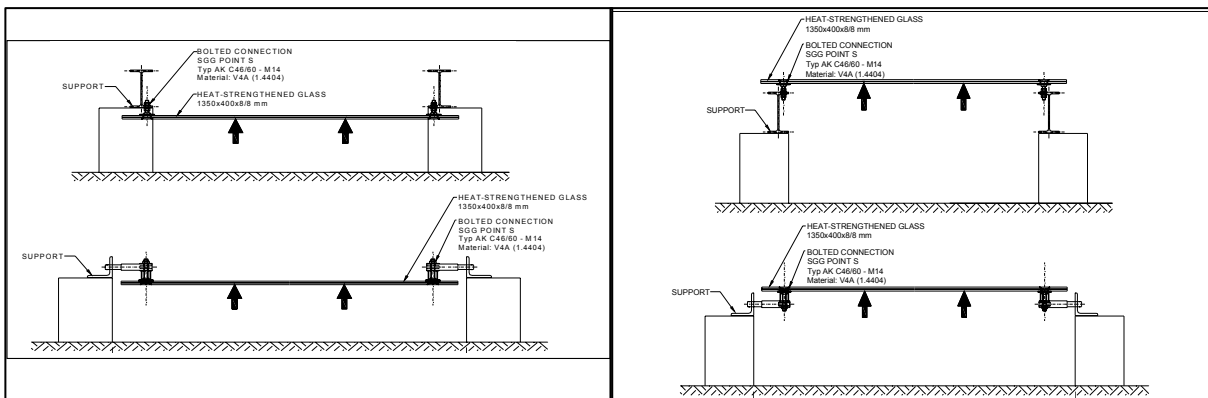


Bild 84: Einbaulagen für punktgehaltene Gläser – a) Winddruck/Schnee b) Windsog

5.3.3. Biegeversuche an Lamellen mit liniengelagerten Gläsern

Das Diagramm Bild 85 zeigt für die 4-Punkt-Biegeversuche (Lamelle 1350 mm) die Beziehung zwischen der Lastresultierenden P im Versuch und einer Gleichflächenlast q für gleiches Moment oder gleiche Durchbiegung, jeweils in Feldmitte. Dies gibt für die nachfolgend dargestellten Versuchsergebnisse den Bezug zu Wind- oder Schneelasten.

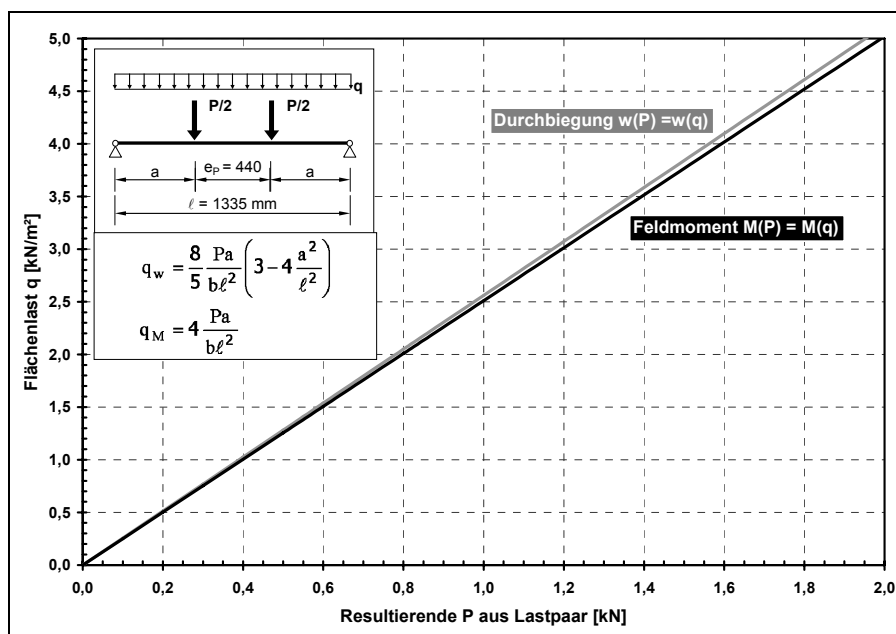


Bild 85:
Lastresultierende P und
Flächenlast q für
4-Punkt-Biegeversuch

Die Ergebnisse der 4-Punkt-Biegeversuche werden nachfolgend entsprechend der Lagerung der Gläser gegliedert dargestellt.

5.3.3.1 Verformungsverhalten

Zum Vergleich des Verformungsverhaltens liniengelagerter Gläser mit unterschiedlichen Glasdicken ($t_1/t_2 = 6/6 \text{ mm}$ bzw. $10/10 \text{ mm}$) sind in Bild 86 die Kraft-Verformungs-Diagramme dargestellt. Gleiche Glasquerschnitte zeigen ähnliche Verformungen. Die gestrichelten Graphen zeigen die rechnerisch ermittelten Werte für einen Querschnitt mit starrem und ohne Verbund, dies sind die oberen und unteren Grenzwerte.

Der lineare Verlauf der Messwertgraphen lässt den Schluss zu, dass es sich bis zum Bruch um ein lineares Biegetragverhalten handelt und somit ein Übergang zum Membrantragverhalten ausgeschlossen werden kann.

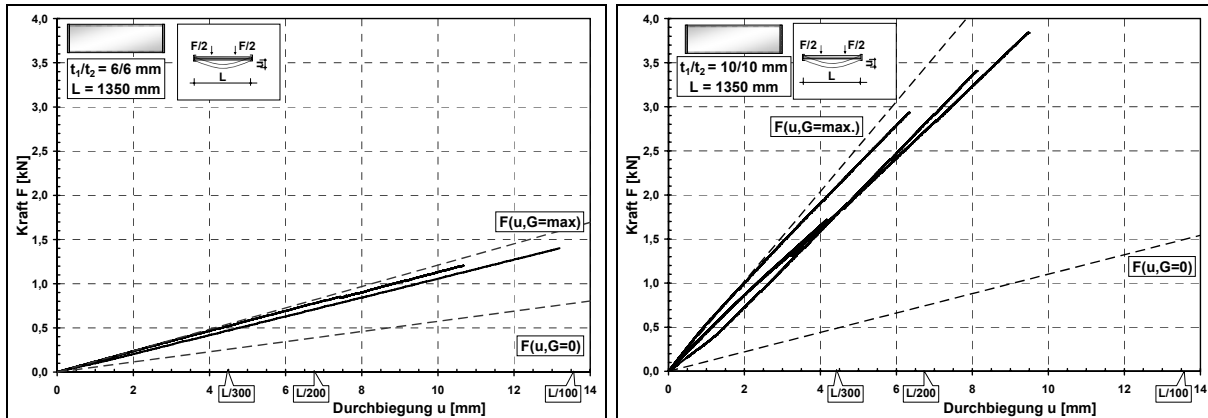


Bild 86: Kraft-Verformungs-Diagramme für liniengelagerte HOE-Verbundgläser ($L = 1335$ mm)
a) $t = 6/6$ mm, b) $t = 10/10$ mm

Bei den liniengelagerten Gläsern wurden zur Abschätzung des Einflusses der verschraubten Glashalteleiste auch Gläser mit einer ideal gelenkigen Lagerung ohne Glashalteleiste²⁵ getestet. Die zugehörigen Kraft-Verformungs-Beziehungen weisen zwar jeweils die geringste Steigung innerhalb der Kurvenschar auf (siehe Bild 86), liegen jedoch in der gleichen Größenordnung. Dies zeigt, dass durch die Glashalteleisten nur geringfügig günstigere Werte erzielt werden.

Die Bruchlasten F_U für die untersuchten liniengelagerten HOE-Gläser mit und ohne Glashalteleiste sind in Bild 87 dargestellt.

²⁵ Probekörper 001 (6/6 mm) und 002 (10/10 mm)

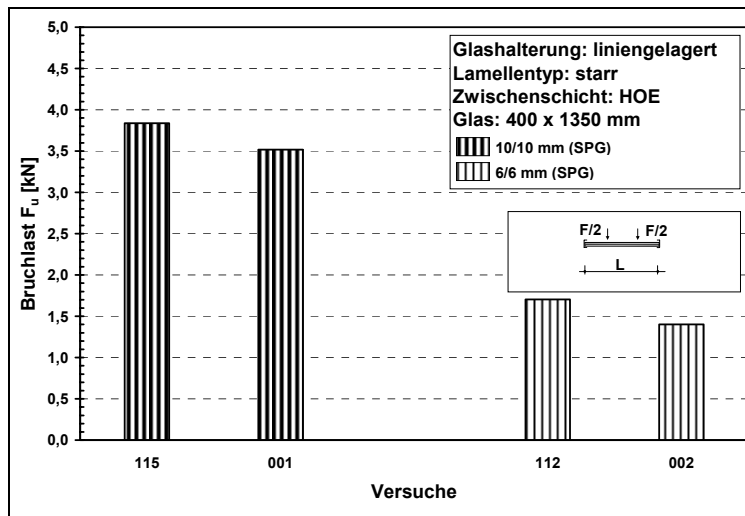


Bild 87:
Bruchlasten F_u für liniengelagerte
HOE-Gläser mit unterschiedlichen
Glasdicken

Die Bruchlasten der Probekörper ohne Glashalteleiste (001, 002) liegen bei beiden Glasdicken leicht unter den Werten bei Lagerung mit Glashalteleiste.

Die Bruchlasten wurden bei den Probekörpern mit unterschiedlichen Glasdicken $t_G = 10/10$ mm (001) bzw. $t_G = 6/6$ mm (002) bei Dehnungen an der Scheibenober- und Scheibenunterseite von $\varepsilon_U = \pm 0,38$ ‰ erreicht. Unter Zugrundelegung eines Elastizitätsmoduls von $E = 70000$ N/mm² (Tabelle 1) entspricht dies einer Bruchspannung $\sigma_U \approx 27$ N/mm² und liegt somit deutlich unter der Biegezugfestigkeit (Tabelle 2) für Spiegelglas von $\beta_{bz} = 45$ N/mm². Das typische „strahlenartige“ Bruchbild ist in Bild 88 dargestellt.



Bild 88:
Bruchbild
für liniengelagerte HOE-Gläser

5.3.3.2 Einfluss der Kantenbearbeitung

Der Bruch befindet sich zwischen den beiden Lasteinleitungspunkten. Der Rissursprung liegt immer an der freien Glaskante, die bei einachsiger gespannten Glasplatten parallel zum Rand durch Zugnormalspannungen beansprucht ist. Die unter der Biegezugfestigkeit liegende Bruchspannung erklärt sich durch die Zugbeanspruchung in Verbindung mit den rissauslösenden Bearbeitungsmerkmalen der gesäumten Ausführung²⁶ der Glaskanten. Dies bestätigt sich durch Versuche an Glasscheiben mit polierter Glaskante²⁷, bei denen die Lasten bis zum Erreichen der Biegefestigkeit gesteigert werden konnten, siehe Bild 89.

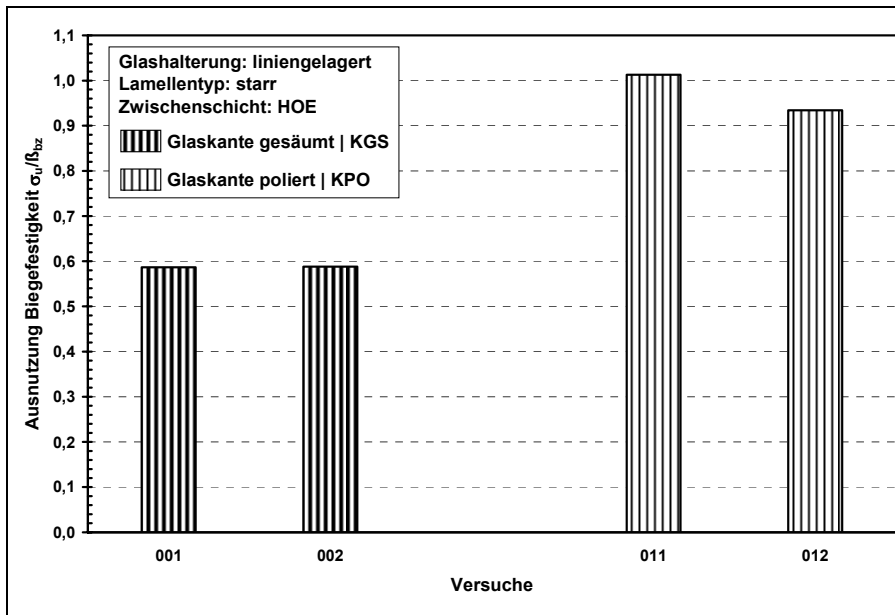


Bild 89:
Einfluss der Kantenbearbeitung

5.3.3.3 Vergleich von HOE- und PVB-Zwischenschicht

Die Durchbiegungen von liniengelagerten Lamellen mit HOE- und mit PVB-Zwischenschicht sind in Bild 90 dargestellt.

²⁶ Die gesäumte Glaskante (KGS) ist die beim Schneiden von Flachglas entstehende Glaskante (Schnittkante), deren Ränder mehr oder weniger gebrochen sind [DIN 1249-11]. Die Kante weist Bearbeitungsmerkmale, Unebenheiten und quer zu ihren Rändern eine Welligkeit auf.

²⁷ Die Glaskante ist ganzflächig geschliffen und anschließend durch Überpolieren verfeinert [DIN 1249-11].

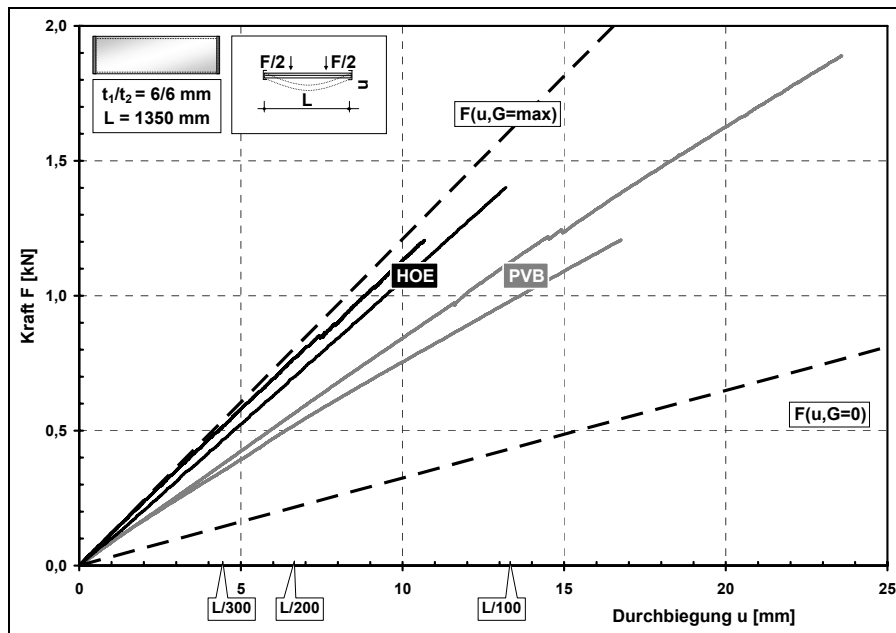


Bild 90:

Durchbiegungen bei verschiedenen Zwischenschichten für Lamellen mit liniengelagerten Verbundgläsern (HOE - schwarz, PVB - grau)

Wie bereits bei den Scherversuchen an Kleinproben²⁸ festgestellt, sind Verbundgläser mit HOE-Zwischenschicht (schwarze Graphen) deutlich steifer als die mit PVB-Zwischenschicht (graue Graphen). Die PVB-Gläser zeigten ca. 1,5-fache Durchbiegungen gegenüber HOE.

5.3.3.4 Vergleich von starren und nachführbaren Lamellen

Zur Bestimmung des Einflusses der Lagerung der Lamellen auf das Verformungsverhalten wurden Untersuchungen an starr und nachführbar²⁹ gelagerten Lamellen, jeweils mit Verbundglasaufbau $t_1/t_2 = 10/10$ mm, durchgeführt. Die gemessenen Durchbiegungen der Verbundgläser in Feldmitte sind in Bild 91 dargestellt.

²⁸ vgl. Bild 74 (Seite 77)

²⁹ nachführbar = um die Längsachse drehbar.

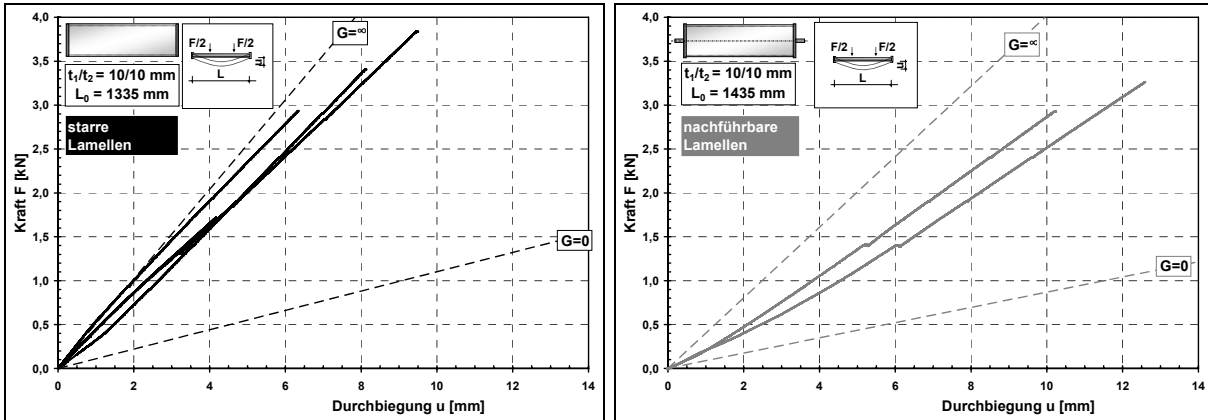


Bild 91: Kraft-Verformungs-Diagramme für liniengelagerte HOE-Verbundgläser ($t_1/t_2 = 10/10$ mm)
 a) starr gelagerte Lamellen, b) nachführbar gelagerte Lamellen

Der Vergleich zeigt, dass die nachführbaren Lamellen, auch unter Berücksichtigung der größeren Stützweite³⁰, eine geringere Steifigkeit aufweisen. Dies lässt sich durch die Nachgiebigkeiten in den zusätzlichen Konstruktionselementen erklären.

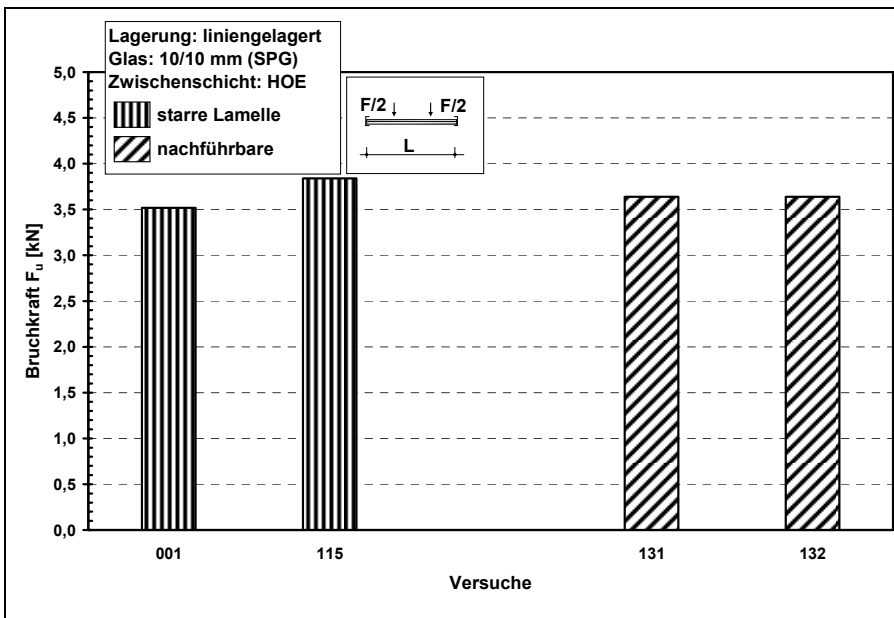


Bild 92:
 Bruchkräfte für
 liniengelagerte
 HOE-Gläser
 in starren sowie nach-
 führbaren
 Lamellen

³⁰ Für die Untersuchungen wurden einheitlich Scheiben mit den Kantenmaßen 400×1350 mm verwandt. Durch die Konstruktionselemente für die drehbare Lagerung ergibt sich bei den nachführbaren Lamellen eine Stützweite von 1435 mm gegenüber 1335 mm bei den starr gelagerten Lamellen, vgl. Bild 77 und Bild 78.

Die Bruchkräfte F_B liegen jedoch in der gleichen Größenordnung, siehe Bild 92. Insgesamt hat sich die Konstruktion als tragfähig gezeigt, insbesondere auch im Hinblick auf die Übertragung des Versatzmoments zwischen Lamellen- und Glshalterung, vgl. Bild 28a.

5.3.4. Biegeversuche an Lamellen mit punktgelagerten Gläsern

Es wurden Vier-Punkt-Biegeversuche an Lamellen mit punktgehaltenen Gläsern durchgeführt. Das Glasmaterial war einheitlich TVG mit polierter Kante (KPO). Die Kraft-Verformungs-Diagramme für starre Lamellen mit gesenkten Tellerankern und mit Hinterschnittankern sind in Bild 93 dargestellt.

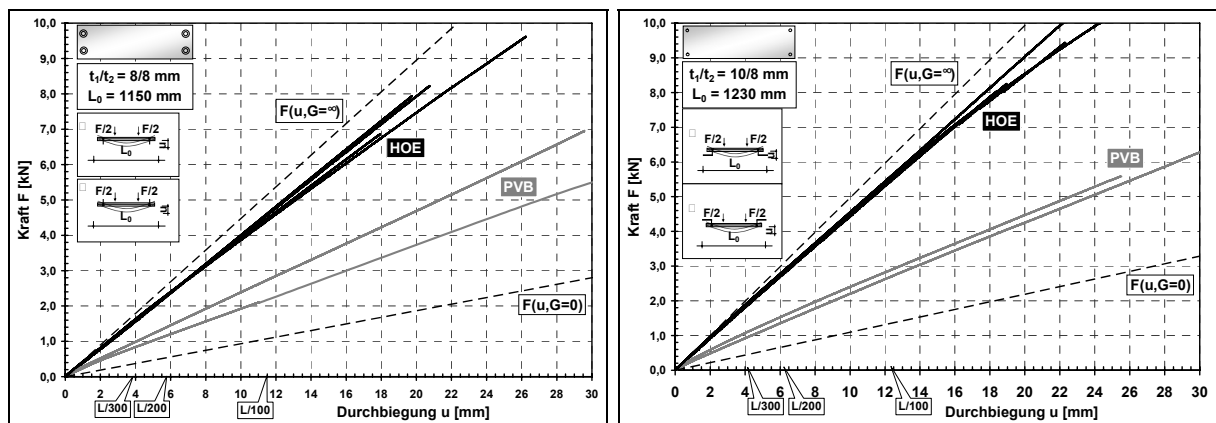


Bild 93: Kraft-Verformungs-Diagramme für starre Lamellen mit punktgelagerten Verbundgläsern

- a) gesenkte Tellerhalter (Glas: 8/8 mm)
- b) Hinterschnittanker (Glas: 8/10 mm)

Der Vergleich der Durchbiegungen und Bruchkräfte für die beiden Einbaulagen (vgl. Bild 84) „Halter oben“ und „Halter unten“ zeigt keinen Unterschied. Es kann somit für die beiden Belastungsrichtungen Druck und Sog von einem identischen Tragverhalten ausgegangen werden.

Die punktgelagerten Gläser wurden ebenfalls als nachführbare Lamellen untersucht³¹. Die Kraft-Verschiebungs-Diagramme für beide Glashaltertypen sind in Bild 94 dargestellt.

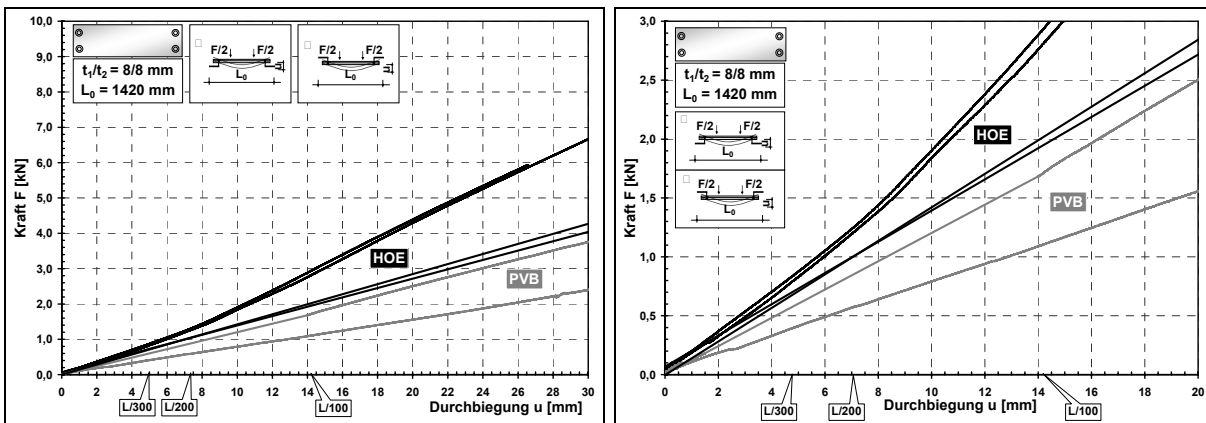


Bild 94: Kraft-Verformungs-Diagramm für nachführbare Lamellen mit punktgelagerten Gläsern (gesenkte Tellerhalter mit 8/8 mm Glasdicke)

Bei den Lamellen mit gesenkten Tellerankern werden Durchbiegungen von $l/300$ bei ca. 0,6 kN erreicht. Dies entspricht einer Gesamt-Flächenlast von ca. 1,5 kN/m² (vgl. Bild 85) und ermöglicht damit, unter Berücksichtigung des Scheibeneigengewichts von 0,4 kN/m², eine Schneelastaufnahme von 1,1 kN/m². Hiermit werden die Einwirkungen des Hauptanwendungsbereichs abgedeckt. Der Glasbruch trat bei $F_U = 4,8...6,9$ kN auf und liegt damit deutlich über dem Anwendungsbereich.

Bei den Lamellen mit Hinterschnittanker traten schon bei geringen Lasten über den Punkthaltern sternförmige Rissbilder im Glas auf. Hier ist eine Eignung der Hinterschnittanker für nachführbare Lamellen mit gelenkig gelagerten Wellen in Frage zu stellen.

Die erreichten Bruchkräfte F_U liegen bei beiden Haltertypen in der gleichen Größenordnung, siehe Bild 95.

³¹ Zur Konstruktion vgl. Bild 79 und Bild 80.

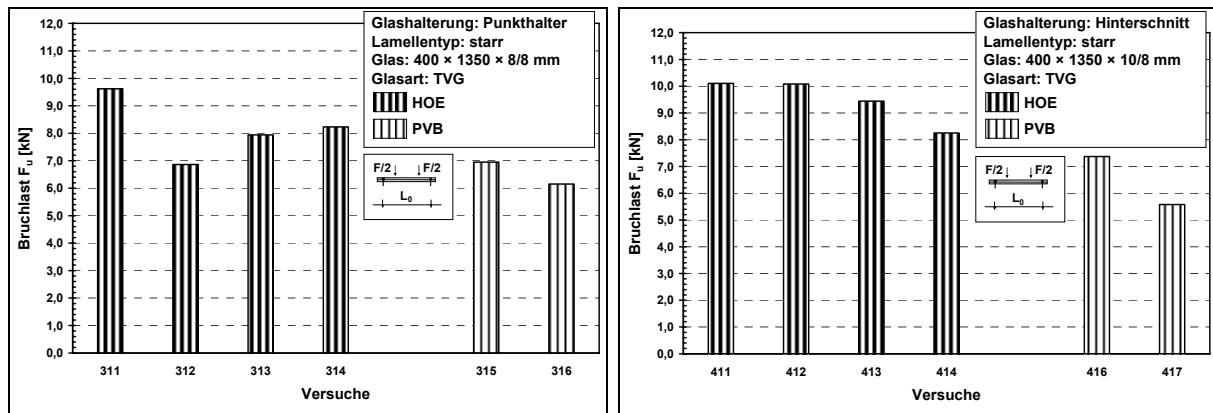


Bild 95: Kraft-Verformungs-Diagramm für starre Lamellen mit punktgelagerten Gläsern

a) gesenkte Tellerhalter (Glas: 8/8 mm)

b) Hinterschnittanker (Glas: 8/10 mm)

Führt man für beide Haltertypen je eine statistische Auswertung für die Traglast durch, ergibt sich auf Basis der jeweils vier Versuche der 5%-Quantilwert bei 90%-Vertrauensniveau zu:

Tellerhalter: $F_U = 3,66 \text{ kN}$

Hinterschnittanker: $F_U = 6,03 \text{ kN}$

Der höhere Wert bei den Hinterschnittankern begründet sich in dem dickeren Glasaufbau³², der sich in einem 16% höheren Mittelwert der Messwerte widerspiegelt, und der geringeren Streuung der Werte³³.

Die auf Vier-Punkt-Biegeversuchen basierenden Werte entsprechen in etwa den maximalen Biegemomenten und Durchbiegungen folgender Flächenlasten:

Tellerhalter: $q = 9,2 \text{ kN/m}^2$

Hinterschnittanker: $q = 15,1 \text{ kN/m}^2$

Unter Berücksichtigung des Eigengewichts von $0,4 \text{ kN/m}^2$ bzw. $0,45 \text{ kN/m}^2$ und einer Schneelast von $1,00 \text{ kN/m}^2$ ergibt sich eine deutliche Tragreserve.

³² Telleranker: 8/10 mm; Hinterschnittanker: 8/8 mm

³³ Standardabweichung: $s = 1,136$ für Tellerhalter; $s = 0,868$ für Hinterschnittanker

Der Vergleich der Mittelwerte der Bruchkräfte für die beiden untersuchten Zwischenschichten zeigt um mindestens 25% höhere Werte bei dem mehrlagigen HOE-EVA-Aufbau, wobei der Bruch bei beiden Zwischenschichtarten bei Glasdehnungen von $\varepsilon = 0,92...1,18 \text{ ‰}$, entsprechend $\sigma = 64,3...82,9 \text{ N/mm}^2$, aufgetreten ist³⁴.

5.3.5. Resttragfähigkeitsversuche

Ziel der Resttragfähigkeitsversuche ist die Überprüfung der Eignung für eine Überkopfverglasung. Sie sollen zeigen, dass die Folie in Verbindung mit gebrochenen Glasscheiben eine ausreichende Reststeifigkeit besitzt und damit die Lagesicherheit im Schadensfall sichergestellt ist. Des Weiteren muss die Haftung der Verbundfolie für eine ausreichende Splitterbindung sorgen und herabfallende Splitter vermeiden.

Die Versuche wurden im Anschluss an die Vier-Punkt-Biegeversuche an den gebrochenen Scheiben durchgeführt. Gegebenfalls wurden die Bruchbilder mittels Kugelfall verstärkt.

Die geschädigten Lamellen wurden mit mindestens der halben Verkehrslast ($0,5 \text{ kN/m}^2$) über 24 Stunden belastet, siehe Bild 96.

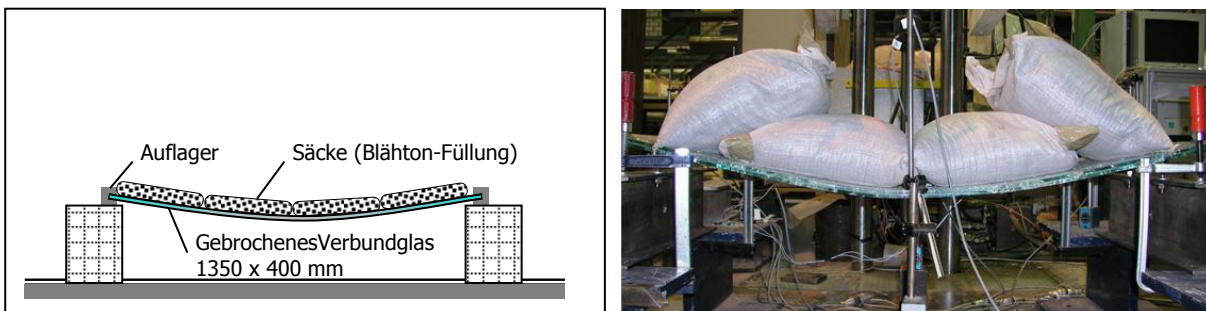


Bild 96: Versuchsaufbau Resttragfähigkeitsversuche

Bei allen HOE-Probekörpern konnte das Prüfzenario ohne Versagen durchlaufen werden, teilweise sogar mit doppelter Prüflast ($1,00 \text{ kN/m}^2$).

Der Vergleich mit VSG-Lamellen mit PVB-Zwischenschicht zeigt ein deutlich steiferes Resttragfähigkeitsverhalten. Durch die Folienkombination der mehrlagigen HOE-Zwischenschicht,

³⁴ Biegezugfestigkeit TVG : $\beta_{bz} = 70 \text{ N/mm}^2$

insbesondere mit der steifen Funktionsfolie, konnten die Durchbiegungen deutlich reduziert werden, siehe Bild 97.

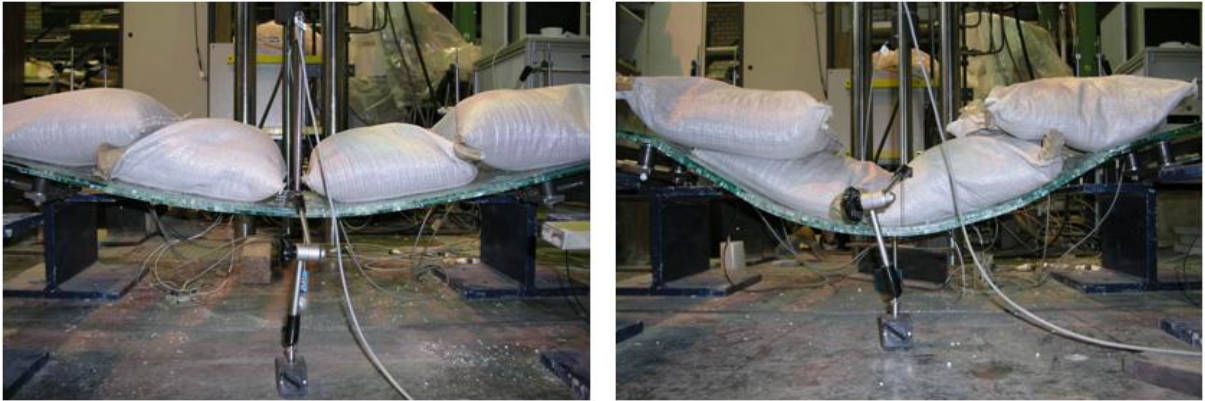


Bild 97: Resttragfähigkeit - Vergleich der Zwischenschichten, a) HOE, b) PVB

Durch die EVA-Verbundfolie wurde aufgrund der besseren Hafteigenschaften die Splitterbindung deutlich erhöht, siehe Bild 98.

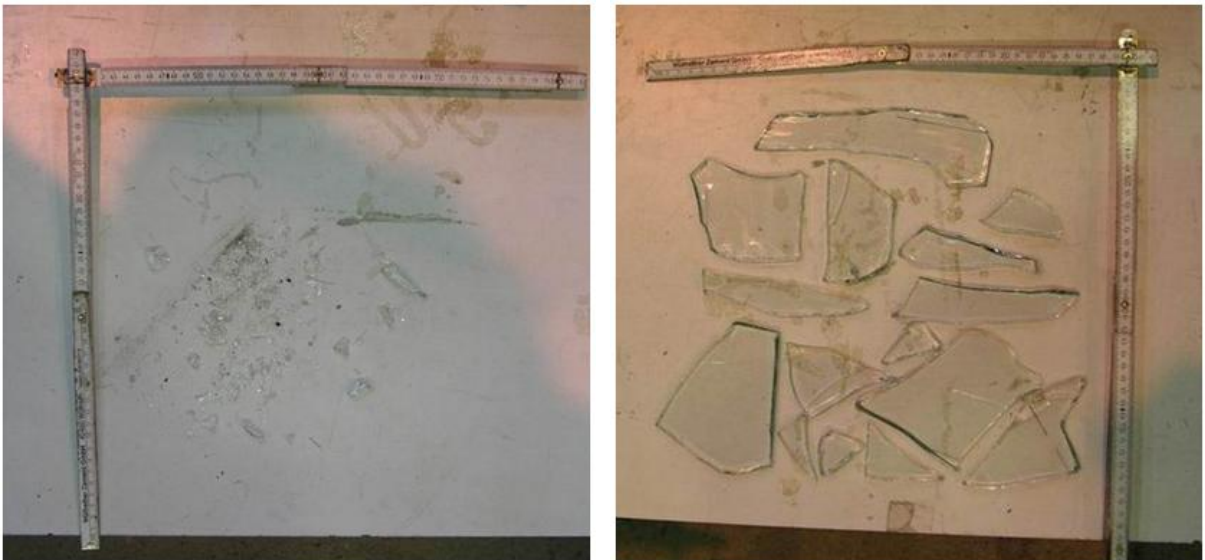


Bild 98: Splitterbindung - Vergleich der Zwischenschichten, a) HOE, b) PVB

5.4. Identifizierung eines Schubmoduls

5.4.1. Mechanisches Modell für Träger mit nachgiebigem Verbundquerschnitt

Der Querschnitt eines Funktionsverbundglases besteht aus zwei biegesteifen Deckschichten, die mittels der Zwischenschicht (Verbund- und Funktionsschicht) schubweich verbunden sind. Das Gesamtbiegemoment wird in drei Anteile aufgeteilt, die Teilmomente M_1 und M_2 entsprechend der Eigenbiegesteifigkeiten der Deckschichten und das Teilmoment M_S als Kräftepaar in Abhängigkeit der Verbundsteifigkeit, siehe Bild 99.

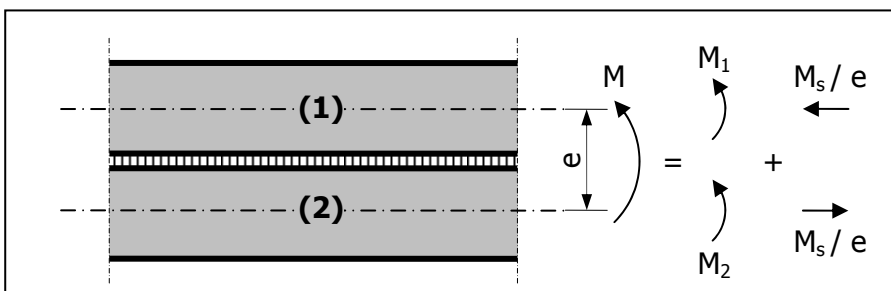


Bild 99:
Momentenaufteilung

Um die Verformungen und Beanspruchungen ermitteln zu können, wird nachstehend die Verteilung der Teilmomente ermittelt.

5.4.1.1 Querschnittsgrößen

In Bild 100 sind die wesentlichen Querschnittsbezeichnungen dargestellt.

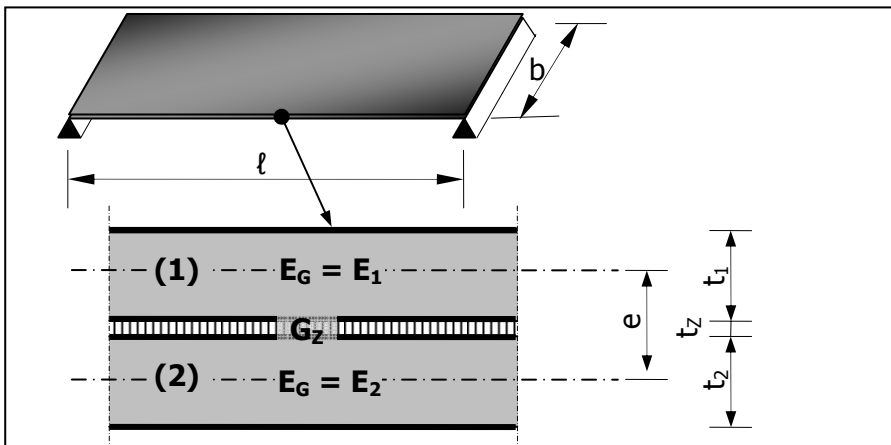


Bild 100:
Querschnittsbezeichnung

Die Gesamtbiegesteifigkeit des Verbundquerschnitts ergibt sich aus der Summe der Eigenträgheitsmomente und dem Steiner Anteil der Deckschichten, wobei der Steiner Anteil entsprechend der Nachgiebigkeit des Verbundes abzumindern ist.

Die Summe der Eigenträgheitsmomente der Deckschichten beträgt:

$$B_D = EI_1 + EI_2$$

mit: $E_G = E_1 = E_2$ und $I_i = \frac{b \times t_i^3}{12}$ für $i = 1, 2$ (5.13)

$$B_D = E_G \times \frac{b \times (t_1^3 + t_2^3)}{12}$$

Mit dem Schwerachsenabstand der Deckschichten

$$e = t_Z + \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (5.14)$$

ergibt sich die Biegesteifigkeit der Deckschichten aus dem Steiner Anteil zu

$$B_S = \frac{EA_1 \times EA_2 \times e^2}{EA_1 + EA_2}$$

mit: $E_G = E_1 = E_2$ und $A_i = b \times t_i$ für $i = 1, 2$ (5.15)

$$B_S = E_G \times \frac{b \times t_1 \times t_2 \times e^2}{t_1 + t_2}$$

Für die Ermittlung der Schubsteifigkeit

$$S = G \times A_G \quad (5.16)$$

sind die Schubverzerrungen des Querschnitts zu berücksichtigen, siehe Bild 101.

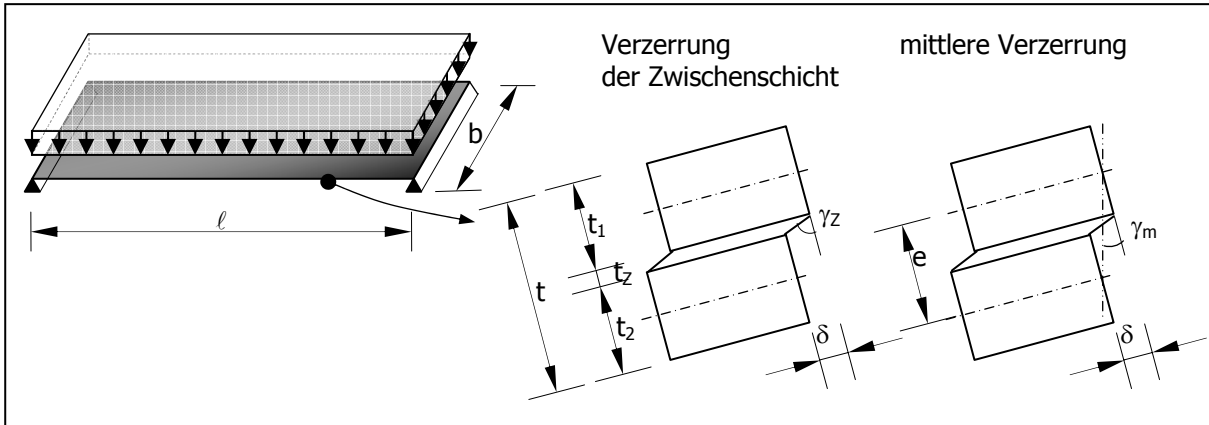


Bild 101: Verzerrungen am geschichteten Querschnitt

Im belasteten Zustand stellt sich zwischen den beiden Deckschichten eine von der Verbundsteifigkeit abhängige Verschiebung δ ein. Hierdurch entsteht eine geknickte Querschnittsfläche³⁵. Um entsprechend der Bernoulli-Hypothese ebene Querschnitte im Sinne der Biegelehre zu erhalten, wird die Verzerrung auf die Schwerachsen bezogen.

Das Verhältnis zwischen der Querschnittsfläche (hier: Fläche der Zwischenschicht A_Z) und der Ersatzfläche wird durch den Schubkorrekturfaktor χ angegeben.

$$\chi = \frac{A_Z}{A_G} \quad (5.17)$$

Damit ergibt sich die Schubsteifigkeit der Zwischenschicht zu:

$$S_Z = \frac{G \times A_Z}{\chi} \quad (5.18)$$

Der Schubkorrekturfaktor χ ermittelt sich aus der Gegenüberstellung der Formänderungsenergien am Querschnitt mit geknickter Fläche und mit ebener Fläche. Die Formänderungsenergie hinsichtlich des Schubverzerrungseinflusses beträgt:

³⁵ Für die Deckschichten können im verformten Zustand, wegen ihrer großen Schubsteifigkeit, ebene und senkrecht auf der Systemachse stehende Querschnittsflächen vorausgesetzt werden.

$$W = \frac{1}{2} \int_V \tau \gamma \, dV$$

mit: $A = \text{const.}, \quad dV = A \, dx \quad \tau = G\gamma$ (5.19)

$$W = \frac{1}{2} GA \int_{\ell} \gamma^2 \, dx$$

Die Formänderungsenergien für die Querschnitte mit geknickter Querschnittsfläche und mit mittlerer Verzerrung werden gleichgesetzt und können nach χ umgeformt werden.

$$\frac{1}{2} GA_Z \int_{\ell} \gamma_Z^2 \, dx = \frac{1}{2} GA_G \int_{\ell} \gamma_m^2 \, dx$$

mit: $\gamma_m = \frac{t_Z}{e} \gamma_Z, \quad \chi = \frac{A_Z}{A_G}$ (5.20)

$$\chi = \left(\frac{t_Z}{e} \right)^2$$

Eingesetzt in (5.18) ergibt dies die Schubsteifigkeit des geschichteten Querschnitts:

$$S_Z = \frac{G \times e^2 \times b}{t_Z} \quad (5.21)$$

5.4.1.2 Nachgiebigkeit des Verbundes

Um die Nachgiebigkeit des Verbundes zu bestimmen, müssen die Verformungsanteile aus Biegung und Schubverzerrung bestimmt werden. Diese ergeben sich mit der Arbeitsgleichung des Prinzips der virtuellen Kraftgrößen zu

$$u \times \bar{l} = \int \frac{MM}{B_S} \, dx + \int \frac{QQ}{S_Z} \, dx \quad (5.22)$$

Dieser Ausdruck kann durch Ausklammerung

$$u \times \bar{l} = \left(1 + \frac{\int \frac{QQ}{S_Z} \, dx}{\int \frac{MM}{B_S} \, dx} \right) \times \int \frac{MM}{B_S} \, dx \quad (5.23)$$

und durch Einführung eines Faktors k vereinfacht werden:

$$u \times \bar{I} = \frac{(1+k)}{B_S} \times \int MM \, dx \quad (5.24)$$

Der Faktor k stellt das Verhältnis zwischen Querkraft- und Momentenverformung dar, der Faktor k_L den lastbildspezifischen Anteil.

$$k = \frac{B_S}{S_Z} \times k_L$$

mit:

$$k_L = \frac{\int Q\bar{Q} \, dx}{\int MM \, dx} \quad (5.25)$$

Auswertungen des lastbildspezifischen Anteils k_L für die Trägermitte ($x = l/2$) sind in [Wölfel 1987] für verschiedene Lastbilder angegeben, siehe Tabelle 9.

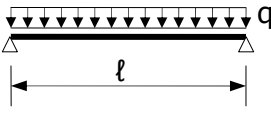
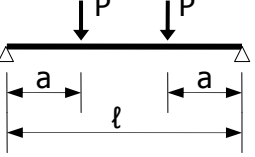
Lastbild	k_L
	$\frac{9,6}{l^2}$
	$\frac{24}{(3-4 \times \alpha^2)} \times l^2$ mit $\alpha = \frac{a}{l}$

Tabelle 9: Lastbildspezifischer Faktor k_L für Auswertungen an der Stelle ($x = l/2$)

Zur Berücksichtigung der Nachgiebigkeit des Verbundes wird eine abgeminderte Biegesteifigkeit \bar{B}_S eingeführt. Diese bestimmt sich durch Gleichsetzen der Verformungen aus Biegung:

$$\frac{1}{\bar{B}_S} \times \int MM \, dx = \frac{(1+k)}{B_S} \times \int MM \, dx$$

$$\bar{B}_S = \frac{1}{1+k} \times B_S \quad (5.26)$$

Für zweiseitig gelagerte Scheiben 1350×400 mm (vgl. Vier-Punkt-Biegeversuche in 5.3.3) sind die Abminderungsfaktoren gemäß (5.26) in Abhängigkeit des Schubmoduls G dargestellt, siehe Bild 102.

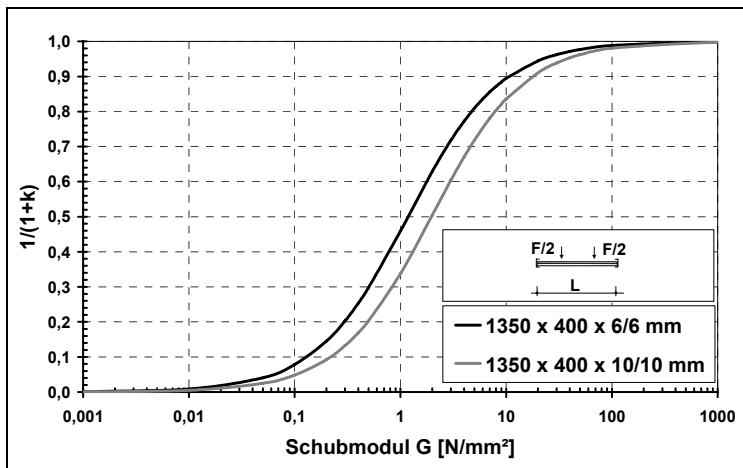


Bild 102:

Verhältnis Ersatzbiegesteifigkeit zu Biegesteifigkeit B_S

Das Diagramm zeigt, dass die Ausbildung der Biegesteifigkeit infolge der Steiner Anteile der Glasschichten in dem Bereich $G \approx 0,1 \dots 10$ N/mm² stattfindet.

5.4.1.3 Momente und Spannungen

Mit der abgeminderten Biegesteifigkeit \bar{B}_S aus (5.26) beträgt das Verhältnis der Biegesteifigkeit der Deckschichten zur Gesamtbiegesteifigkeit

$$\beta_0 = \frac{B_D}{B_D + \frac{1}{1+k} \times B_S} \quad (5.27)$$

und ist für die untersuchten liniengelagerten Lamellen in Bild 103 dargestellt.

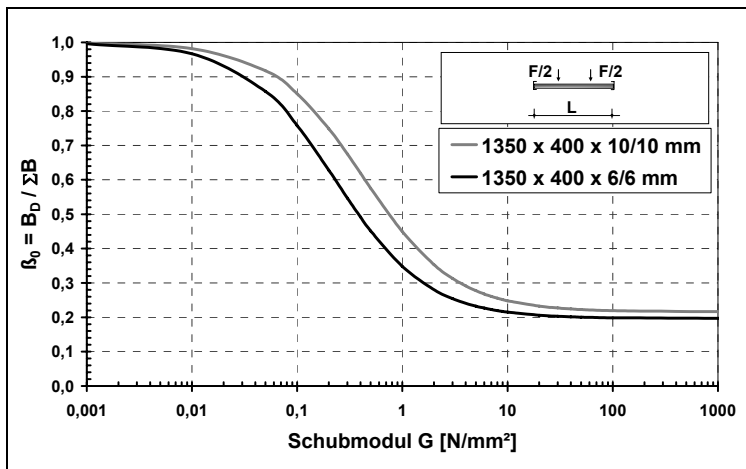


Bild 103:

Verhältnis Biegesteifigkeit der Deckschichten zu Gesamtbiegesteifigkeit

Bei einem Schubmodul $G \approx 2 \text{ N/mm}^2$ beträgt das Verhältnis $\beta_0 \approx 0,3$ und hat sich dem Wert des starren Verbundes ($\beta_0 \approx 0,2$) bereits weitestgehend angenähert. Die Verschiebung der Traganteile innerhalb des geschichteten Querschnitts und somit der Einfluss des Schubmoduls findet für die betrachteten Geometrien im Bereich von $G < 2 \text{ N/mm}^2$ statt.

Mit (5.27) ergeben sich die Anteile der Deckschichten am Gesamtmoment M zu

$$M_i = \frac{B_i}{B_D} \times \beta_0 \times M$$

$$M_i = \frac{t_i^3}{t_1^3 + t_2^3} \times \beta_0 \times M \quad \text{für die Deckschichten } i = 1,2 \quad (5.28)$$

Das durch die Verbundwirkung aktivierte Kräftepaar N bzw. Teilmoment M_S beträgt

$$M_S = (1 - \beta_0) \times M$$

$$N = \pm \frac{(1 - \beta_0) \times M}{e} \quad (5.29)$$

Mit den Teilmomenten ergeben sich die Randnormalspannungen in den Deckschichten zu (vgl. Bild 104)

$$\sigma_{1,o} = -\frac{M_1}{W_1} - \frac{M_S}{e \times A_1}; \quad \sigma_{1,u} = +\frac{M_1}{W_1} - \frac{M_S}{e \times A_1}$$

$$\sigma_{2,o} = -\frac{M_2}{W_2} + \frac{M_S}{e \times A_2}; \quad \sigma_{2,u} = +\frac{M_2}{W_2} + \frac{M_S}{e \times A_2} \quad (5.30)$$

Da die Schubsteifigkeit der Zwischenschicht den Anteil des Teilmomentes M_S und damit auch die Größe des damit korrespondierenden konstanten Normalspannungsanteils bestimmt, ergeben sich die Spannungsverläufe über die Querschnittshöhe auch in Abhängigkeit der Schubsteifigkeit, siehe Bild 104.

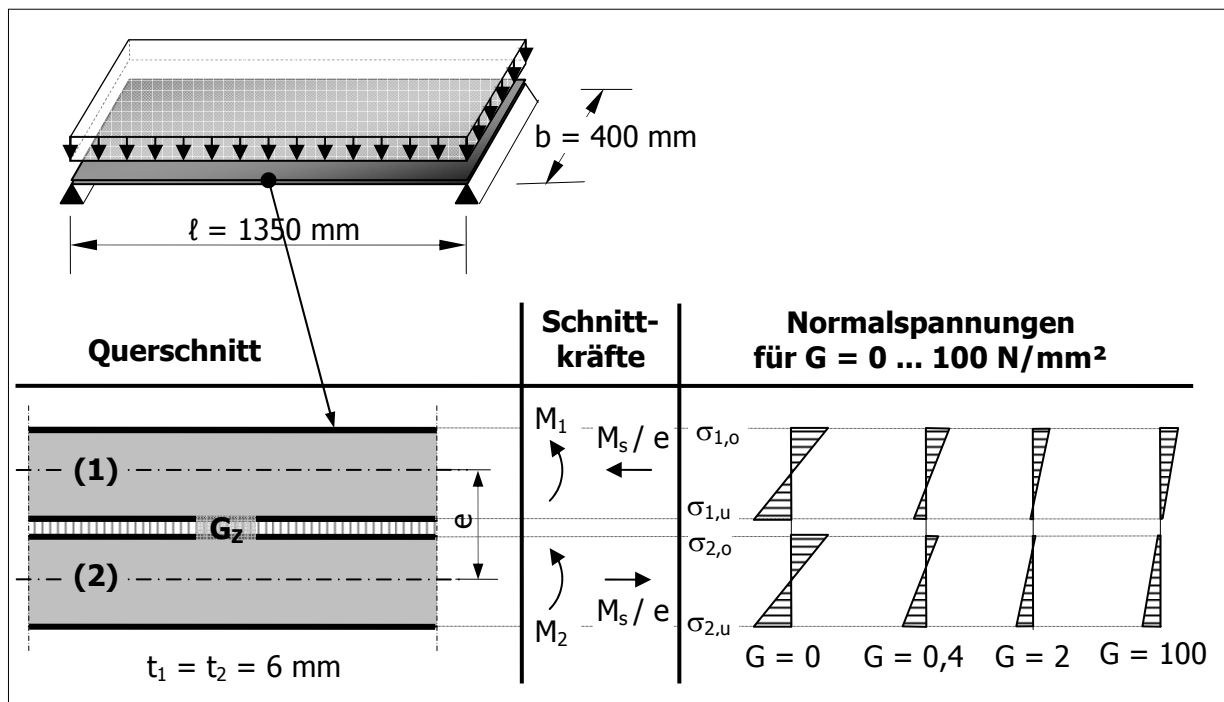


Bild 104: Normalspannungen am Verbundquerschnitt bei verschiedenen Schubmoduln

5.4.1.4 Durchbiegung

Die Durchbiegungen in Trägermitte lassen sich mit den Auswertungen in Tabelle 9 wie folgt ausdrücken:

$$u = \frac{(1+k)}{k_L} \times \frac{M_S}{B_S} \quad (5.31)$$

5.4.2. Vergleich mit FE-Ergebnissen

Für die experimentell untersuchten Lamellen (Kapitel 5.3) werden nachstehend die Ergebnisse gemäß 5.4.1 mit den Ergebnissen einer FE-Berechnung verglichen. Die Symmetrie der Platte ermöglicht es, das Rechenmodell auf ein Viertelsegment zu reduzieren, siehe Bild 105.

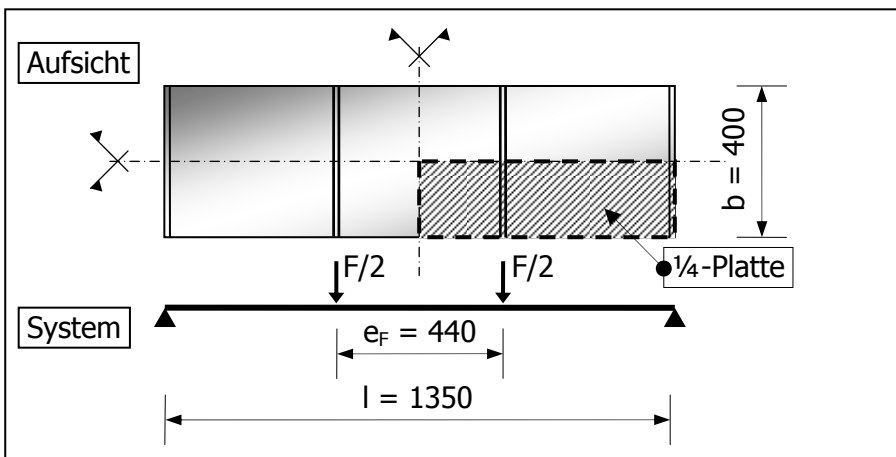


Bild 105:
Plattengeometrie

Die Berechnungen werden mit Sofistik-ASE durchgeführt, siehe Bild 106.

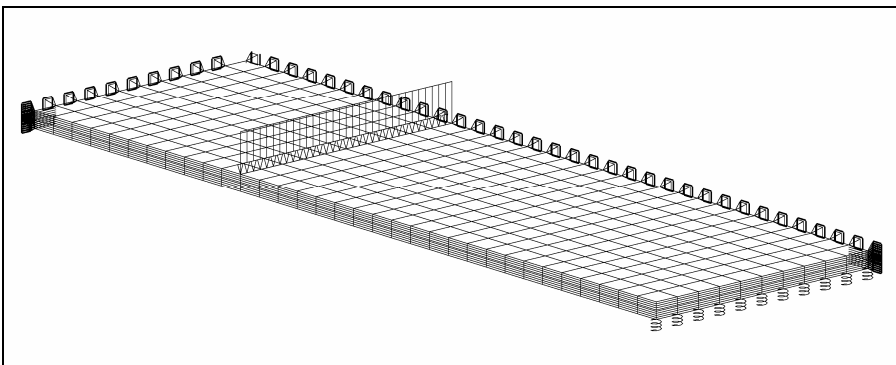


Bild 106:
FE-Rechenmodell
mit Belastung

Die mit beiden Rechenmodellen ermittelten Ergebnisse für die Durchbiegungen u und die Normalspannungen σ , jeweils in Feldmitte, sind in Bild 107 und Bild 108 gegenübergestellt.

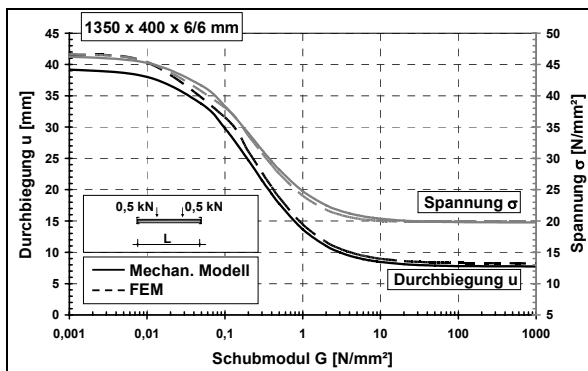


Bild 107: Lamelle $1350 \times 400 \times 6/6$ mm
Durchbiegung und Normalspannung

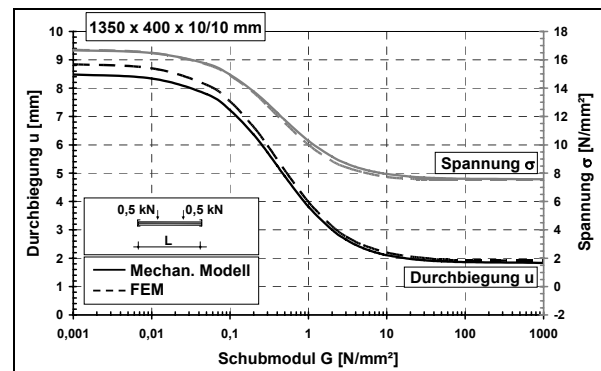


Bild 108: Lamelle $1350 \times 400 \times 10/10$ mm
Durchbiegung und Normalspannung

Die Abweichung zwischen den Ergebnissen der beiden Rechenmodelle beträgt maximal 4%. Diese gute Übereinstimmung stützt die Verwendung des Rechenmodells für die nachfolgende Betrachtung der experimentellen Untersuchungen.

5.4.3. Anwendung auf die Versuchsdaten

Aus dem Ausdruck (5.31) lässt sich für einen Vier-Punkt-Biegeversuch der Schubmodul in Abhängigkeit der Durchbiegung u formulieren:

$$G(u) = \frac{k_L \times B_S \times t_Z \times (u \times k_L \times B_D - M)}{e^2 \times b \times [u \times k_L \times (B_D + B_S) - M]} \quad (5.32)$$

Wird dieser Ausdruck auf die Versuchsergebnisse angewendet, ergeben sich die in Bild 109 dargestellten Werte für den Schubmodul.

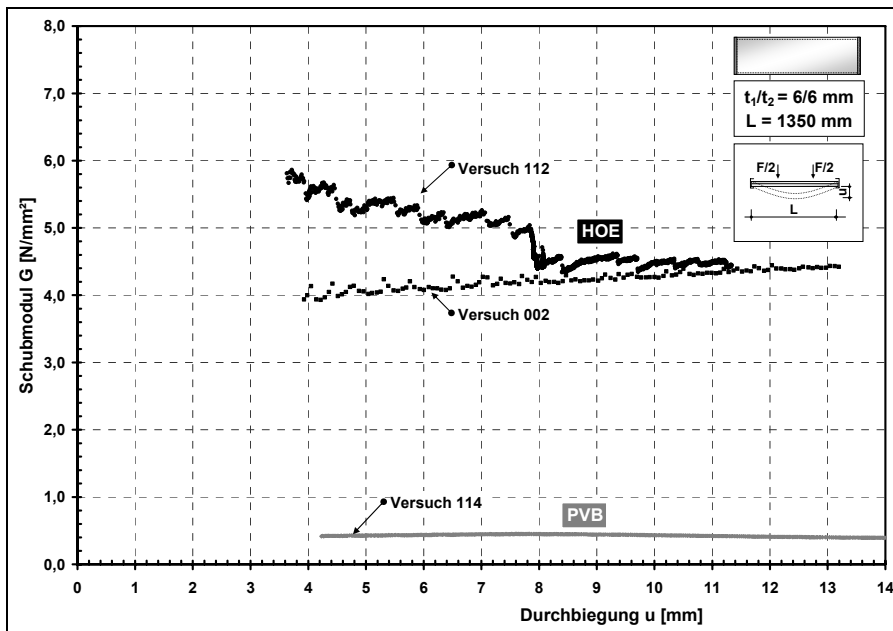


Bild 109:
Schubmodul $G(u)$ für
Lamellen $1350 \times 400 \times 6/6$
mit HOE oder PVB
Zwischenschicht

Die dargestellten Werte für den Schubmodul ergeben sich aus mehreren Versuchen an lieniengelagerten Verbundglas-Lamellen. Die Werte für die beiden HOE-Probekörper zeigen eine untere Grenze von $G_{\min, \text{HOE}, 6/6} = 4 \text{ N/mm}^2$.

Die Streuung der Werte begründet sich darin, dass in dem relevanten Wertebereich des Schubmoduls eine kleine Änderung der Durchbiegung mit einer großen Änderung des Schubmoduls korrespondiert, vgl. Bild 107. Somit ergibt sich im Bereich geringer Lasten und Durchbiegungen eine messtechnisch bedingte Streuung der Werte. Mit zunehmenden Durchbiegungen nimmt diese Streuung ab und ermöglicht eine eindeutige Auswertung.

Des Weiteren wurde ein VSG-Probekörper mit PVB-Zwischenschicht untersucht. Für diesen ergibt sich ein Schubmodul in der Größenordnung von $0,5 \text{ N/mm}^2$. Dieser Wert zeigt eine gute Übereinstimmung mit den in [Kutterer 2003] und [Schuler 2003] angegebenen Werten (vgl. Bild 55) und bestätigt somit die in dieser Arbeit angewandte Vorgehensweise zur Identifizierung eines Schubmoduls für die Funktionszwischenschichten.

Die Ergebnisse für die steiferen Lamellen mit Glasaufbau $10/10 \text{ mm}$ sind in Bild 110 dargestellt. Auch bei diesen Werten ist eine untere Grenze ablesbar, die sich ebenfalls, wie bei den $6/6 \text{ mm}$ dicken Lamellen, bei $G_{\min, \text{HOE}, 10/10} = 4 \text{ N/mm}^2$ einstellt.

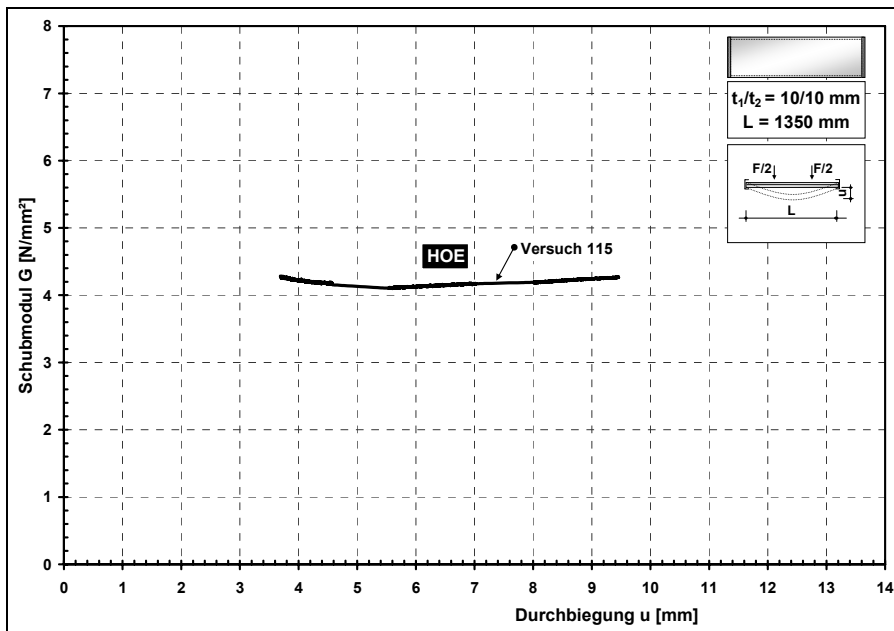


Bild 110:
Schubmodul $G(u)$
für Lamelle
1350×400×10/10
mit HOE-
Zwischenschicht

Da die in Bild 109 und Bild 110 dokumentierten Auswertungen auf Probekörpern mit den gleichen Plattenabmessungen und verschiedenen Querschnittsdicken beruhen, sollen nachstehend noch Untersuchungen an längeren Lamellen betrachtet werden, siehe Bild 111.

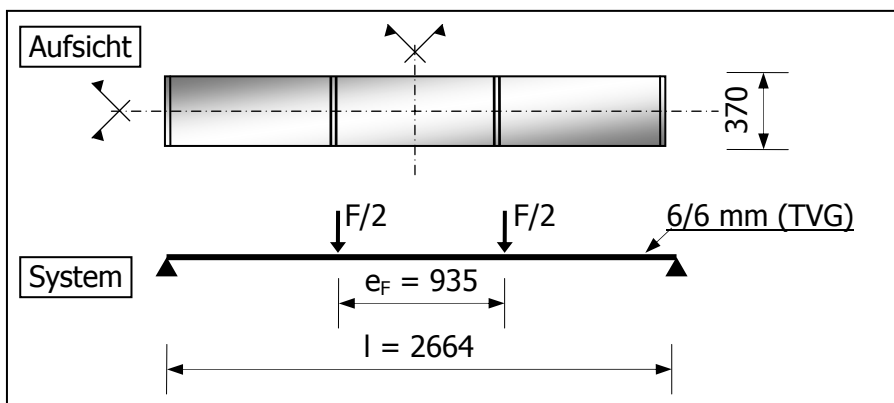


Bild 111:
Geometrie
2664 × 370 × 6/6 mm

Es wurden zwei Probekörper geprüft. Die Auswertung der Messdaten mit (5.32) ergibt die in Bild 112 dargestellten Schubmodul-Verläufe.

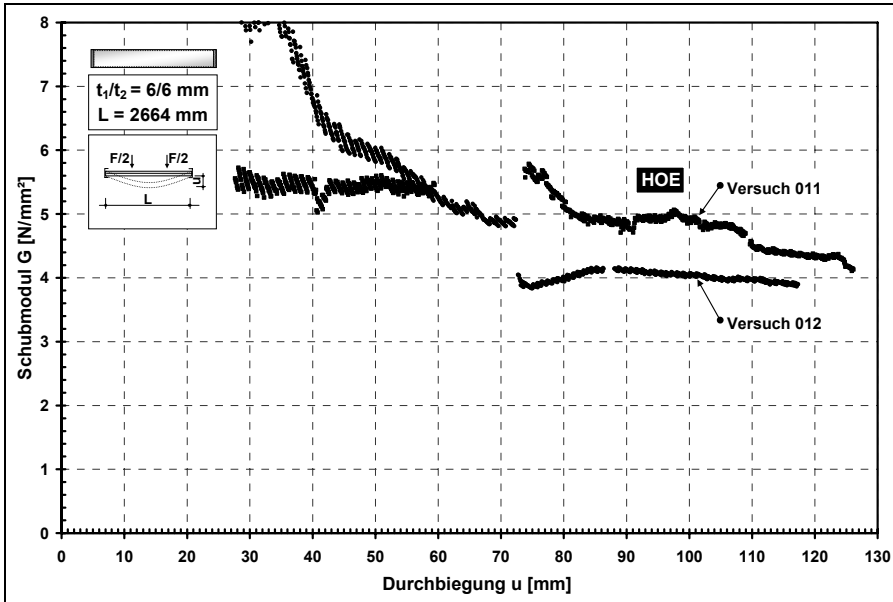


Bild 112:
Schubmodul $G(u)$ für
Lamelle $2664 \times 370 \times 6/6$
mit
HOE-Zwischenschicht

Auch für diese Geometrie stellt sich für die ermittelten Sekantenmoduln eine Untergrenze bei $G_{\min,HOE,6/6} = 4 \text{ N/mm}^2$ ein. Somit beträgt für einachsrig abtragende Lamellen mit verschiedenen Plattengeometrien und unterschiedlichen Glasdicken die identifizierte Mindestgröße des Schubmoduls einheitlich $G_{HOE} = 4 \text{ N/mm}^2$.

In Bild 107 und Bild 108 wurde bereits die gute Übereinstimmung der beiden Rechenmodelle gezeigt. Nachstehend erfolgt, zur weitergehenden Verifikation des identifizierten Mindestschubmoduls, eine Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse mit Ergebnissen aus FE-Berechnungen mit $G = 4 \text{ N/mm}^2$, siehe Bild 113.

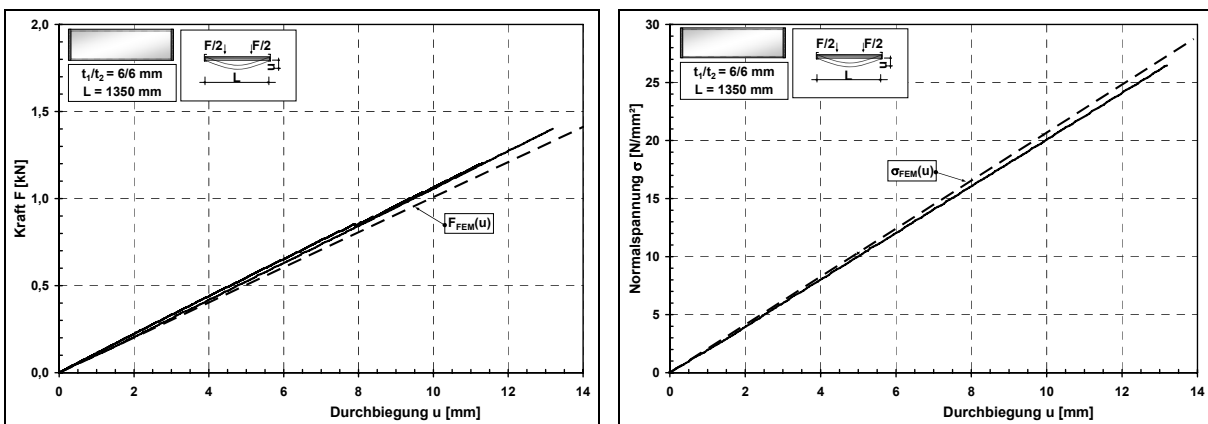


Bild 113: $1350 \times 400 \times 6/6 \text{ mm}$ - $G = 4,0 \text{ N/mm}^2$ - Versuchsergebnisse - a) $F(u)$, b) $\sigma(u)$

Für die liniengelagerte Lamelle $1350 \times 400 \times 6/6$ mm liegen die Abweichungen zwischen Versuch- und FE-Ergebnissen zwischen 4 und 6%.

Für die weiteren betrachteten Lamellen zeigten sich ebenfalls sehr gute Näherungen, siehe Bild 114 und Bild 115.

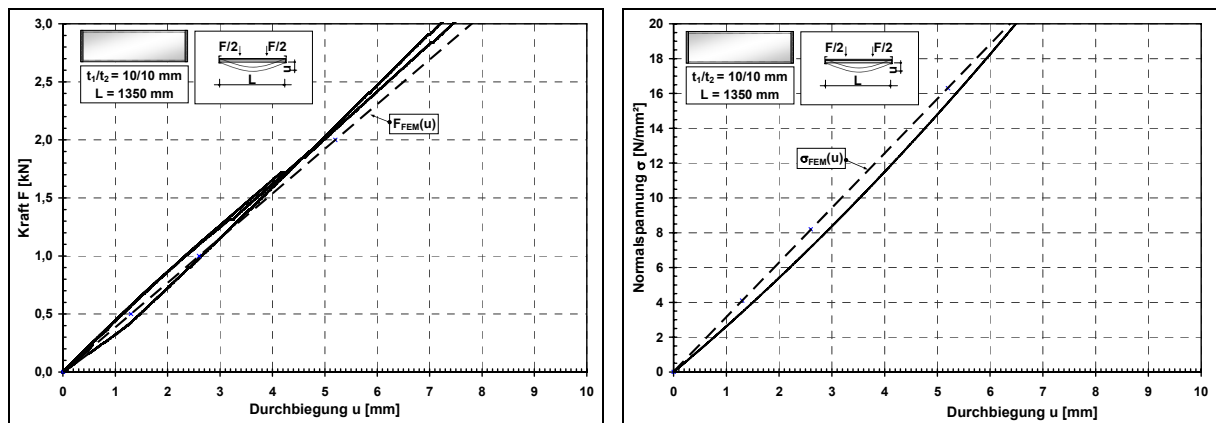


Bild 114: $1350 \times 400 \times 10/10$ mm - $G = 4,0$ N/mm² - Versuchs- und FE-Ergebnisse - a) $F(u)$, b) $\sigma(u)$

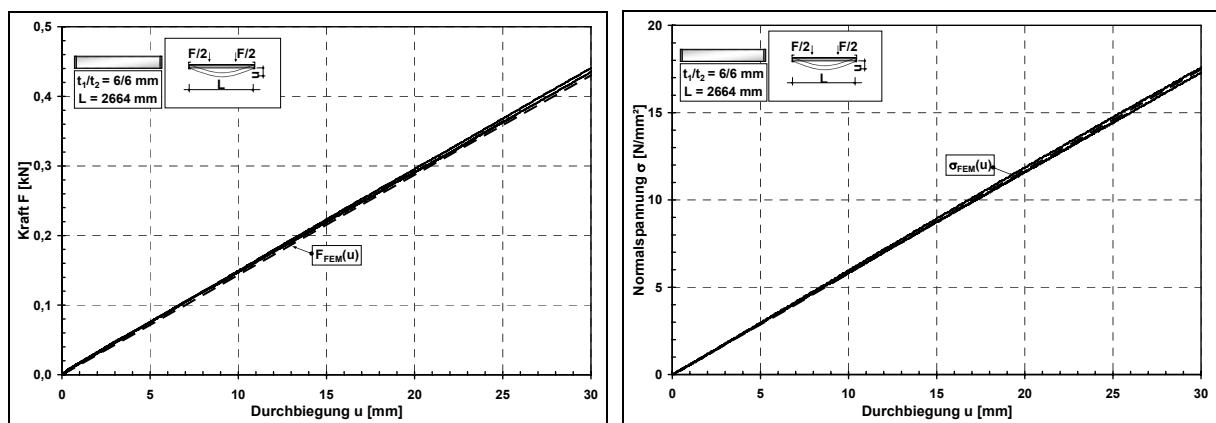


Bild 115: $2664 \times 370 \times 6/6$ mm - $G = 4,0$ N/mm² - Versuchs- und FE-Ergebnisse - a) $F(u)$, b) $\sigma(u)$

Aus den Versuchsergebnissen für HOE-Lamellen mit unterschiedlicher Glasdicke und Stützweite (vgl. Kapitel 5.3) kann mit dem vorgestellten Rechenverfahren für kurzzeitige Belastungen bei Temperaturen $T \approx 20$ °C ein Mindestschubmodul von $G_{\min} = 4,0$ N/mm² identifiziert werden. Eine vergleichende Berechnung mit einem FE-Modell unter Zugrundelegung des G_{\min} liefert Ergebnisse mit einer guten Übereinstimmung.

6. TRAGVERHALTEN VON LAMELLEN MIT GRÖßEREN SPANNWEITEN

Von den in Kapitel 4.3 vorgestellten Systemen für Spannweiten von mehreren Fassadenrastern sind im Rahmen dieser Arbeit zwei Varianten experimentell und rechnerisch untersucht worden. Mit Hilfe dieser Untersuchungen werden die günstigen Trageigenschaften der Konstruktionen genauer identifiziert und die Anforderungen an die konstruktive Durchbildung präzisiert.

Die bisher näher untersuchten Funktionsglas-Lamellen sind gekennzeichnet durch ebene Glasscheiben. Bei einer Bemessung gemäß den zurzeit geltenden Regeln, ohne Berücksichtigung des Schubverbundes, ergibt sich eine Begrenzung der Stützweite auf ca. 1,80 m (siehe Bild 35 und Bild 37). Diese geringe Stützweite stellt, insbesondere bei nachführbaren Lamellen, einen erheblichen Aufwand für Haltekonstruktionen und Antriebselemente dar. In der Vergrößerung der Lamellenstützweite auf das zwei- und mehrfache Rastermaß liegt von daher, durch die Reduzierung dieser Konstruktionselemente, eine erhebliche Vereinfachungs- und damit Einsparmöglichkeit.

Neben der in dem Kapitel 5.4 aufgezeigten Möglichkeit der Erweiterung der Stützweite durch die Nutzung des im Schubverbund liegenden Potenzials, lassen sich durch Nutzung der Synthese von Tragstruktur und lichttechnischen Vorgaben weitere Lamellenkonstruktionen entwickeln, die insbesondere für größere Stützweiten geeignet sind. Einige Beispiele hierfür sind in Kapitel 4.3 dargestellt. Von diesen werden nachstehend zwei Konstruktionen weitergehend betrachtet.

Bei beiden Konstruktionen handelt es sich um konzentrierende Verschattungselemente, bei denen die Sonneneinstrahlung mittels HOE auf einen opaken, vor der Fassade liegenden Solarabsorber konzentriert wird. Der Solarabsorber kann durch die Verwendung von Photovoltaik-Modulen zusätzlich zur Stromerzeugung verwandt werden, siehe Bild 116.

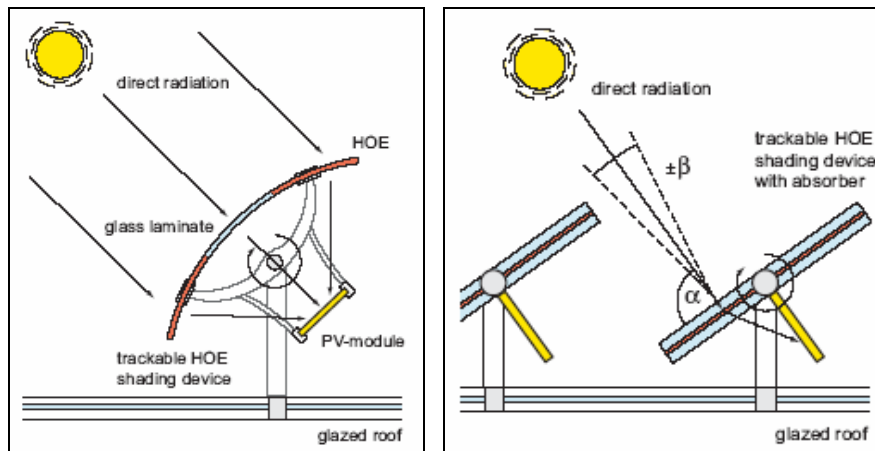


Bild 116:
Funktionsprinzip für konzentrierende Lamellen mit PV

6.1. Gebogene Lamellen

Das Funktionsprinzip der konzentrierenden Verschattungselemente wird unterstützt durch die Anordnung der HOE-Folie auf einer zylindrisch gekrümmten Fläche als Einbettung in gebogenen Gläsern. Hieraus ergibt sich der in Bild 117 dargestellte Prototyp.

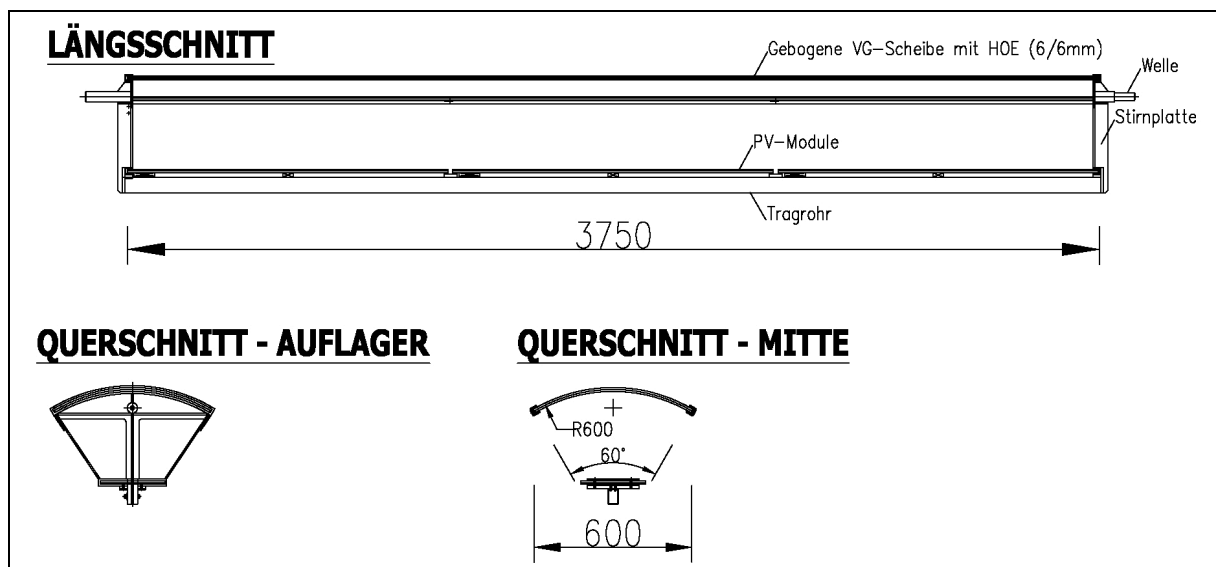


Bild 117: Gebogene Lamelle - $L \times B \times t_1/t_2 = 3750 \times 600 \times 6/6$ mm, $R \times \alpha = 600 \times 60^\circ$

Die gebogene Verbundglas-Scheibe ist jeweils über die komplette Länge der kurzen Seite in den Stirnplatten der Konstruktion liniengelagert. An den Stirnplatten sind die Trag- und An-

triebswellen befestigt. Das unterseitige Tragrohr dient primär der Aufnahme der Photovoltaik-Module und fixiert zusätzlich die Stirnplatten.

In der Prototyp-Anlage wurden die Elemente stehend als Fassaden-Elemente eingebaut, siehe Bild 118. Die im Folgenden erläuterten Untersuchungen beinhalten sowohl die vertikale Einbausituation vor der Fassade, als auch die horizontale im Dach.



Bild 118: Prototyp-Anlage mit gebogenen Lamellen
a) Außenansicht, b) Innenansicht

6.1.1. Experimentelle Untersuchungen

Ziel der experimentellen Untersuchungen war die Identifizierung des Tragverhaltens der gebogenen Glasscheiben bei verschiedenen Randbedingungen. Hierzu wurden Scheiben mit und ohne Stahlkonstruktion getestet, siehe Bild 119.



Bild 119: Versuchstand
a) Lamelle komplett mit Stahlkonstruktion, b) nur gebogene VG-Scheibe

Die Lastaufbringung erfolgte über einen Hydraulikzylinder in 16 quadratischen Lasteinleitungsflächen (10×10 cm) mit Weichlagen. Die ausschließliche Verwendung von gelenkigen Einfeldträgern in der Lasteinleitungsstruktur stellt die gleichmäßige Verteilung der Last auf die Lasteinleitungspunkte sicher. Die Gleichwertigkeit des diskretisierten Lastbildes im Versuchsaufbau mit einer Gleichflächenlast wurde durch eine vergleichende FE-Berechnung geprüft. Die Kraft wurde bis zum Bruch konstant gesteigert. Gemessen wurden die aufgebrauchte Kraft und die Durchbiegungen bei $0,125 L$, $0,25 L$ und $0,5 L$.

Die gemessenen Durchbiegungen in Feldmitte und die zugehörige resultierende Kraft für die drei Versuche sind in Bild 120 dargestellt.

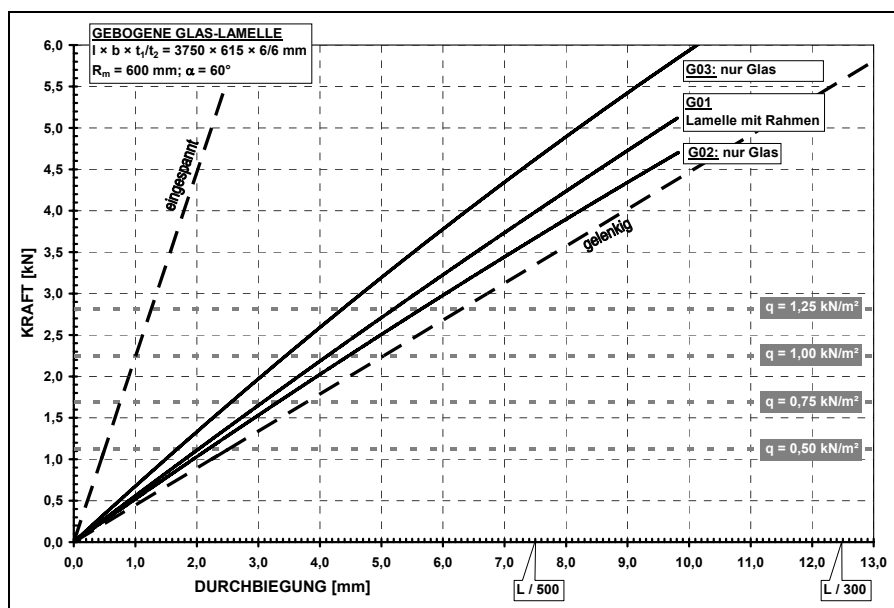


Bild 120:
F(u)-Diagramm
für Lamelle mit
gebogenem Glas

Der Vergleich der Versuchsergebnisse für Probekörper mit (G01) und ohne Glashalterung (G02 und G03) zeigt, dass, wie bereits bei den ebenen Lamellen festgestellt, der Glasrahmen mit dem Tragrohr keinen signifikanten Einfluss auf das Tragverhalten hat. Es kann von einer annähernd gelenkig gelagerten Glasscheibe ausgegangen werden.

Die eingetragenen Flächenlasten geben den Bezug zwischen der im Versuch aufgebrauchten resultierenden Last und den baupraktisch relevanten Flächenlasten an.

Die Scheiben versagten in allen Fällen durch einen vom Rand ausgehenden Riss in Feldmitte, siehe Bild 121. Dies bestätigt die bereits in 5.3.3.2 beschriebene, notwendige Kantenbearbeitung der freien Ränder im Hinblick auf eine größtmögliche Beseitigung von rissbegünstigenden Fehlstellen. Dies ist bei den gebogenen Scheiben von noch größerer Wichtigkeit, da hier der gesamte Randquerschnitt unter Zug steht, wie in der nachstehenden Erläuterung des Lastabtrags gezeigt wird.



Bild 121:
Rissbild mit Rissursprung
am Scheibenrand

6.1.2. Rechnerische Untersuchungen

Die weitere Betrachtung des Lastabtrags erfolgt an einem FE-Modell aus Schalenelementen, siehe Bild 122.

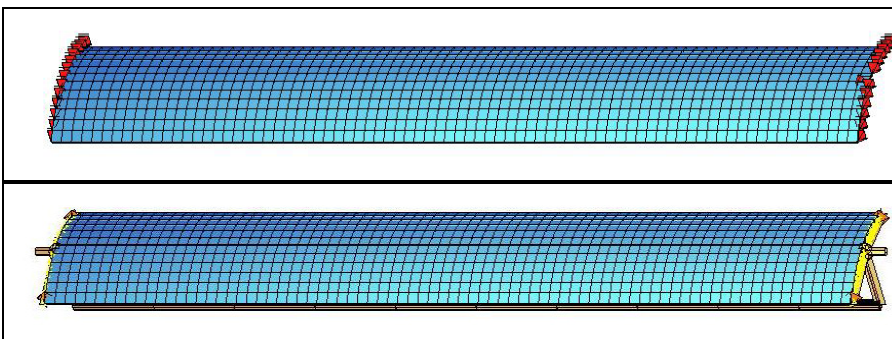


Bild 122:
FE-Modell
ohne/ mit Glashalterung

Die wesentlichen Querschnittsparameter sind in Bild 123 angegeben.

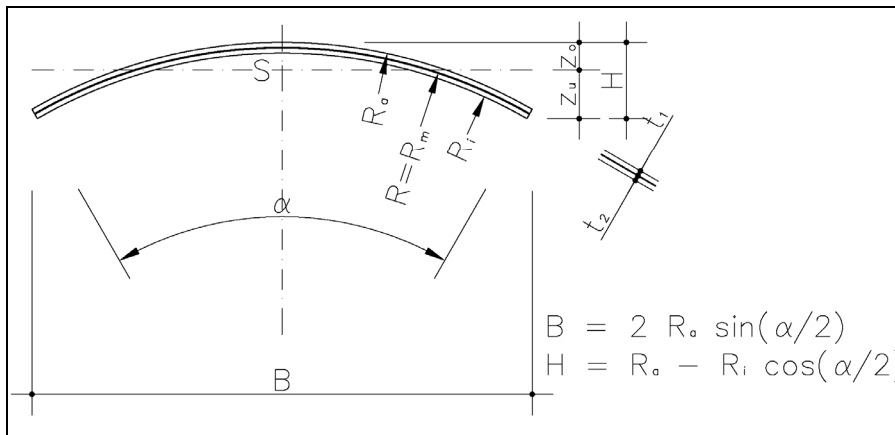


Bild 123:
Querschnitt

Der Lastabtrag erfolgt im Wesentlichen über Membrankräfte in Längsrichtung der Lamelle und mit einem geringen Anteil, über Momente entsprechend der Eigenträgheitsmomente der Scheibe, siehe Bild 124. Im Feldmittenbereich treten geringe Momente in Querrichtung auf.

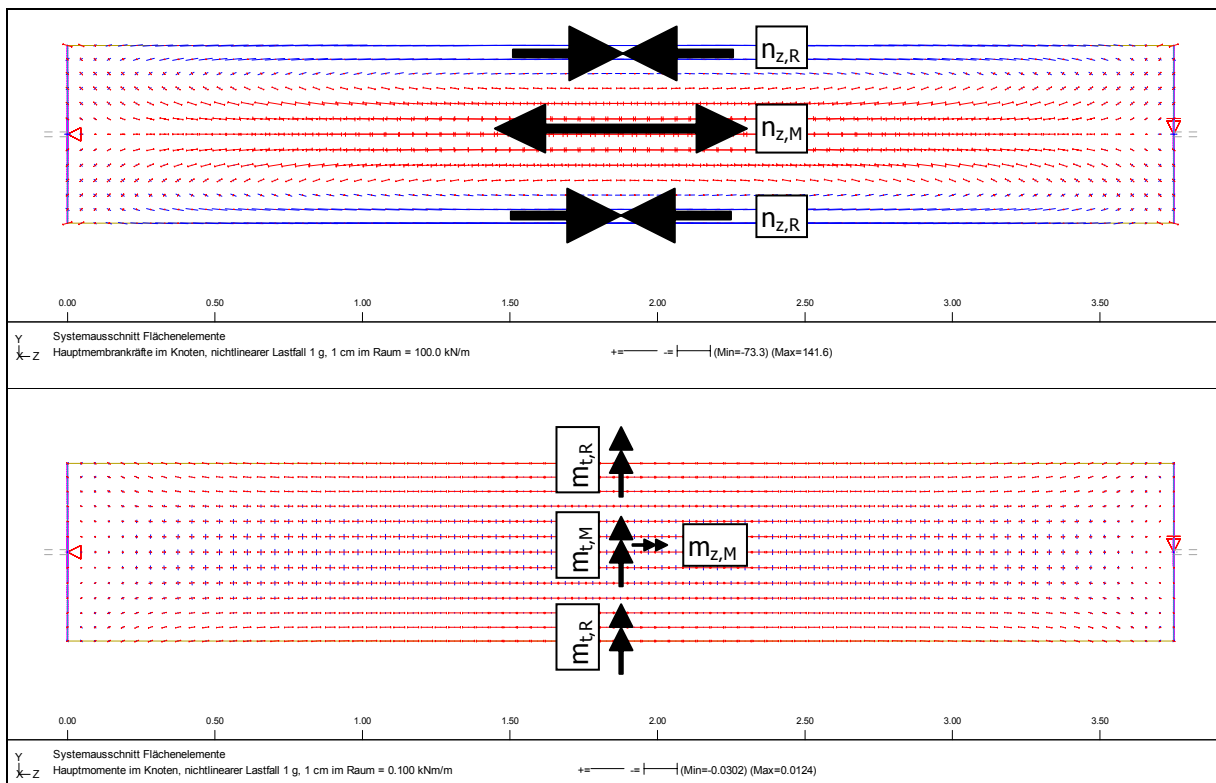


Bild 124: Gebogenen Lamellen - $L \times B \times t_1/t_2 = 3750 \times 600 \times 6/6$ mm, $R = 600$, $\alpha = 60^\circ$ (Aufsicht)

a) Hauptmembrankräfte, b) Hauptmomente

Da die Membrantragwirkung überwiegt, kann die rechnerische Betrachtung ohne Ansatz einer Verbundwirkung, an einer Glasschicht des Verbundglasquerschnitts erfolgen. Bei einem symmetrischen Querschnitt ($t_1 = t_2 = 6 \text{ mm}$) und einer projizierten Einheitsflächenlast (Schneelast) ist somit als Belastung je Glasschicht $q = 0,5 \text{ kN/m}^2$ anzusetzen. Dies ergibt für den Querschnitt in Feldmitte ($x = l/2$) die in Bild 125 dargestellten Verläufe für die Membrankräfte n_z und Biegemomente m_t mit den zugehörigen Längsnormalspannungen an Außen- und Innenseite $\sigma_{z,a}$ und $\sigma_{z,i}$.

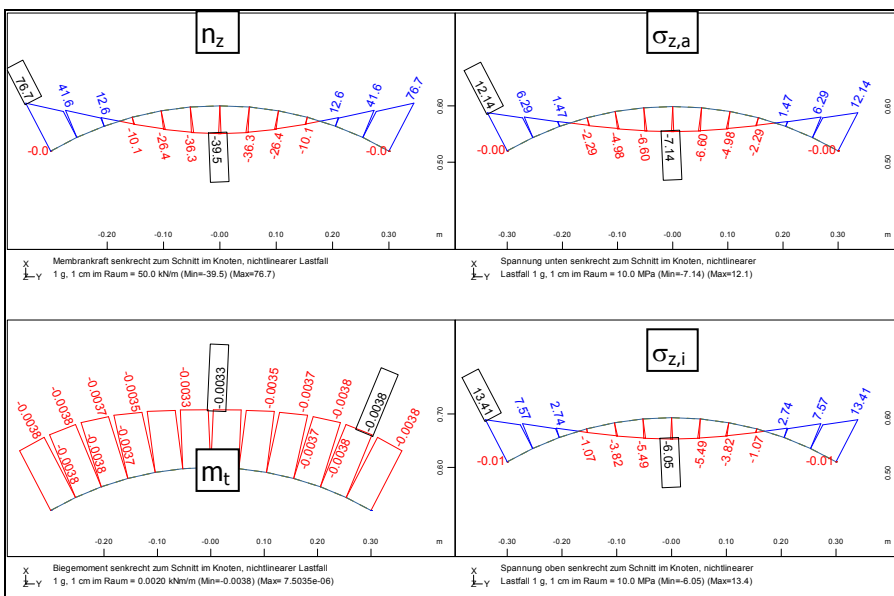


Bild 125:
 Lamelle
 $3750 \times 600 \times 6/6 \text{ mm}$
 $R = 600, \alpha = 60^\circ$
 (Schnitt bei $l/2$)

Die Ermittlung der Normalspannungen verdeutlicht den geringen Biege-Traganteil:

$$\text{Mittellängsachse (M): } \sigma_M = \frac{n}{A} \pm \frac{m}{W} = \frac{-39500}{6 \times 1000} \mp \frac{3300}{6^2 \times 1000} \times 6 = -6,58 \mp 0,55 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Rand (R): } \sigma_R = \frac{n}{A} \pm \frac{m}{W} = \frac{+76700}{6 \times 1000} \pm \frac{3800}{6^2 \times 1000} \times 6 = +12,78 \pm 0,63 \text{ N/mm}^2$$

Für gebogene Lamellen ($t_1/t_2 = 6/6$ mm) mit den Breiten $B = 300, 450$ und 600 mm, den Radien $R = 1000 \dots B/2$ mm (vgl. Bild 126) sowie den Längen³⁶ $L = 2700$ und 4050 mm sind Berechnungen mit dem FE-Modell durchgeführt worden.

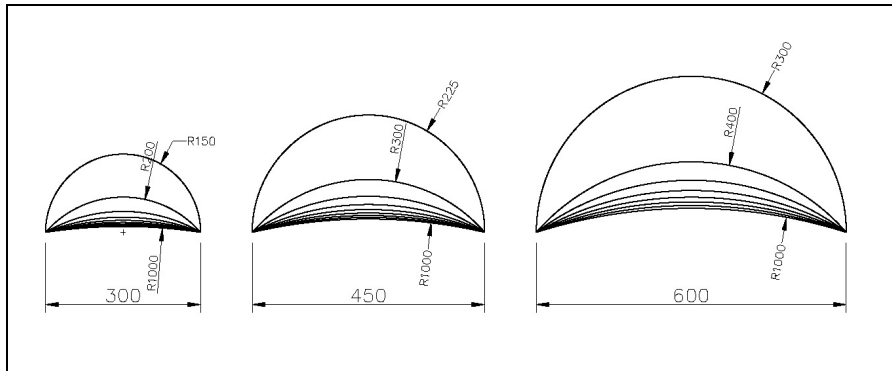


Bild 126:
Untersuchte Querschnittsgeometrien

Die extremalen Normalspannungen ergeben sich an der Außenfläche der Mittelachse und der Innenfläche des Randes. Die Ergebnisse für $\sigma_{a,M}$ und $\sigma_{i,R}$ sowie die bezogenen Durchbiegungen $\bar{u} = u/L$, jeweils in Feldmitte, sind in Abhängigkeit des Radius dargestellt, siehe Bild 127.

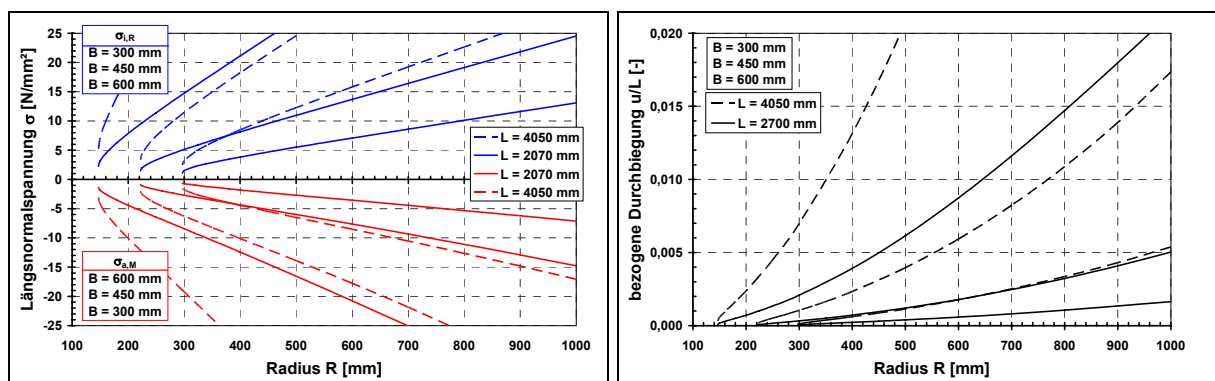


Bild 127: Gebogene Lamellen
a) Längsnormalspannungen, b) bezogene Durchbiegungen (jeweils in Feldmitte)

Zwischen dem Krümmungsradius und den Normalspannungen besteht eine lineare Beziehung. Die Verkleinerung des Radius bedeutet eine Vergrößerung des Hebelarms zwischen dem gedrückten Tonnenfirst und dem gezogenen Rand und verursacht linear eine Reduzie-

³⁶ Entspricht zwei bzw. drei Fassadenrastern.

zung der Beanspruchungen im Glas. Werden die Ergebnisse in Abhängigkeit des Verhältnisses H/L angetragen, ergeben sich für die betrachteten Breiten und Längen annähernd identische Verläufe für Spannungen und Durchbiegungen, vgl. Bild 128.

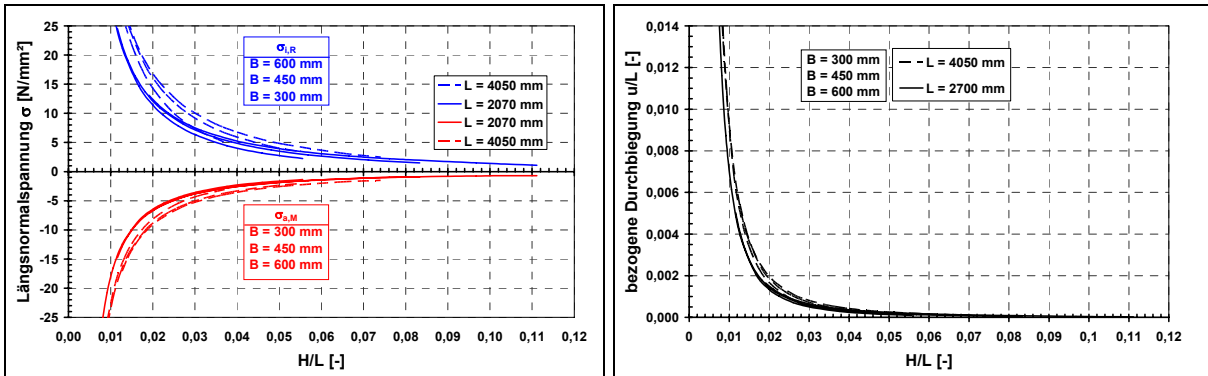


Bild 128: Gebogene Lamellen - Ergebnisse bezogen auf das Verhältnis H/L
 a) Längsnormalspannungen, b) bezogene Durchbiegungen (jeweils in Feldmitte)

Zur Verdeutlichung des Biege-Lastabtrags sind in Bild 129 die Längsnormalspannungen infolge des Moments m_T angetragen. Die Darstellung mittels Spannungen ermöglicht im Vergleich mit Bild 127 und Bild 128 die Verdeutlichung des Biege-Traganteiles. Für die Abszissen wurde daher, wie vorher, der Radius R bzw. das Verhältnis H/L gewählt.

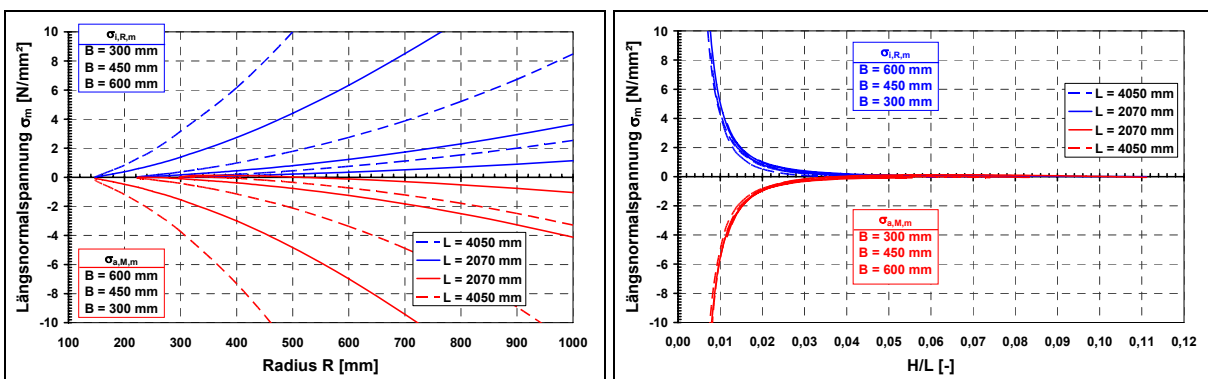


Bild 129: Gebogene Lamellen - Spannungen infolge m_T (Feldmitte)
 a) $\sigma_m(R)$, b) $\sigma_m(H/L)$

Die erwartete Beziehung von zunehmender Momententragwirkung bei abnehmender Querschnittskrümmung ist in Bild 129 a) zu erkennen.

Bei $H/L \leq 0,01 \dots 0,02$ ($\approx 1/100 \dots 1/50$) nehmen die Biegenormalspannungen deutlich zu, siehe Bild 129 b). Dieser Bereich stellt sich in den Diagrammen $\sigma(H/L)$ und $\bar{u}(H/L)$ ebenfalls als die markante Stelle für den zunehmenden Anstieg der Spannungen und Durchbiegungen dar, vgl. Bild 128.

Bestätigt wird dies durch eine Betrachtung der Querschnittswerte, siehe Bild 130.

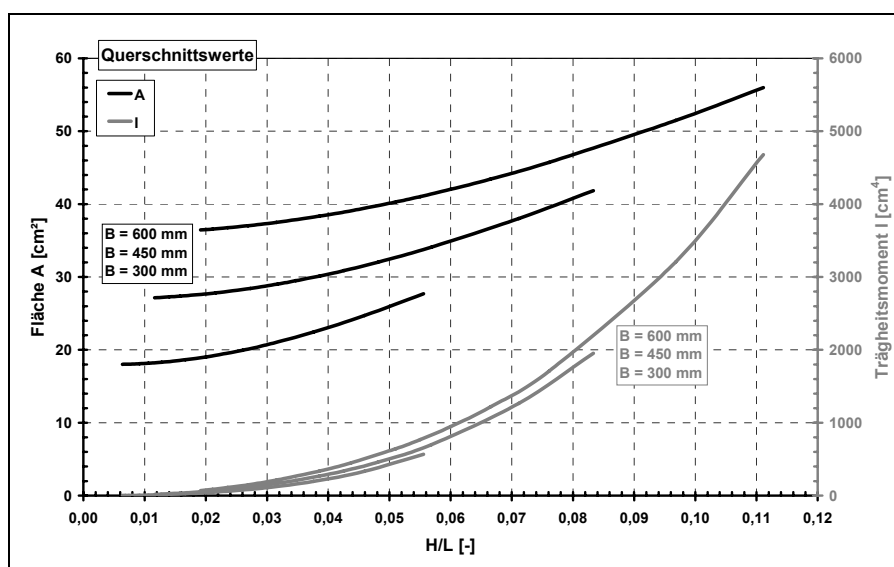


Bild 130:
Querschnittswerte

Der Zuwachs des Trägheitsmomentes I stellt sich erst bei $H/L > 0,02$ ein. Von daher kann als Empfehlung für die Auslegung von gebogenen Lamellen das Verhältnis $H/L \geq 0,02$ ($\approx 1/50$) angegeben werden. Der Querschnittsvergleich macht zusätzlich deutlich, dass bei gleichem Stich die unterschiedlichen Querschnittsbreiten, trotz Flächenzuwachs, zu keinem Gewinn an Trägheitsmoment führen. Entwurfskriterium ist somit primär das Trägheitsmoment des gesamten, gebogenen Querschnitts.

Aus den vorangegangenen Erläuterungen hinsichtlich der geringen Momententragwirkung lässt sich weiterhin ableiten, dass die Berücksichtigung des Scheibenverbundes von untergeordneter Bedeutung ist, da der Hauptlastabtrag über Membrankräfte erfolgt. Diese sind wiederum von der Bauteilhöhe, dem Querschnittsstich, abhängig. Vergleichende Berechnungen als Grenzfallbetrachtung für einen Verbundglas-Querschnitt mit starrem Verbund bestätigen diese Aussage. Dies deckt sich auch mit dem Fazit aus Betrachtungen an vierseitig gelager-

ten Platten in [Kutterer 2003], welches besagt, dass Membrantragwirkung und Berücksichtigung von Schubverbund gegenseitig ausgeschlossen werden können.

Der Verlauf der Membrankräfte und die kleinen Biegemomente lassen den Schluss zu, dass der Lastabtrag vereinfacht durch ein Stabmodell mit einem Bogenquerschnitt abgebildet werden kann, siehe Bild 131.

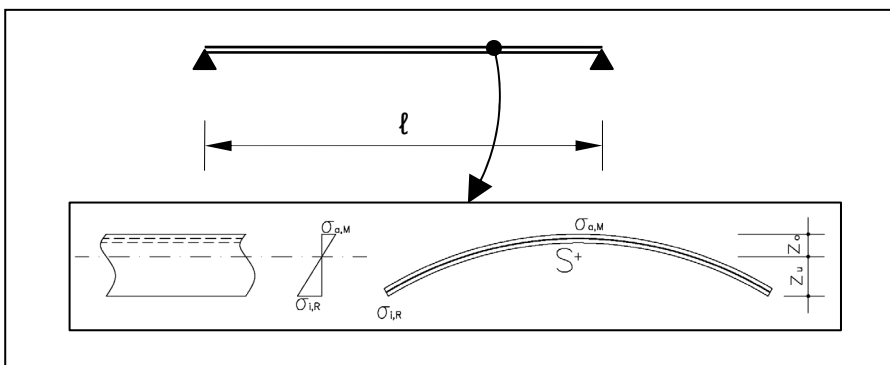


Bild 131:
Stabmodell

Die Querschnittswerte je Glasscheibe können [Petersen 1994] entnommen werden.

$$R_{S,x} = \frac{2}{3} \times \frac{\sin(\beta)}{\beta} \times \frac{R_{a,x}^3 - R_{i,x}^3}{R_{a,x}^2 - R_{i,x}^2} \cong \frac{\sin(\beta)}{\beta} \times R_{m,x} \quad \text{Radius Schwerpunkt}$$

$$A_x = \beta \times (R_{a,x}^2 - R_{i,x}^2) \cong \alpha \times R_{m,x} \times t_x$$

$$\begin{aligned} I_{y,x} &= \frac{1}{4} \times (\beta + \sin(\beta) \times \cos(\beta)) \times (R_{a,x}^4 - R_{i,x}^4) - A_x \times R_{S,x}^2 \\ &\cong \left[(\beta + \sin(\beta) \times \cos(\beta)) - \frac{2 \times \sin^2(\beta)}{\beta} \right] \times R_{m,x}^3 \times t_x \end{aligned} \quad (6.1)$$

für $x = 1,2$ Glasscheiben
mit:

R_m : Radius Mittelachse

$$\beta = \frac{\alpha}{2}$$

Ein Vergleich der in Feldmitte auftretenden maximalen Durchbiegungen und Randspannungen ergibt Abweichungen von unter ca. 5%. Das Stabmodell stellt somit, insbesondere im Bereich der Vordimensionierung, ein sinnvolles Werkzeug dar.

6.2. Lamelle mit hybridem T-Querschnitt

6.2.1. Konstruktion und Materialien

Bei der Lamelle mit T-Querschnitt wird der Solarabsorber als Steg und das Lichtlenkglas als Flansch angeordnet, vgl. Bild 116. Damit Steg und Flansch neben den lichttechnischen auch tragkonstruktive Aufgaben zukommen, ist eine kraftschlüssige Verbindung erforderlich. Diese Verbindung kann als Schraub- oder Klebverbindung ausgeführt werden.

Geschraubte Verbindungen erfordern Bohrungen in dem Glas, die einen zusätzlichen Herstellungsaufwand darstellen, insbesondere im Falle von vorgespannten Gläsern. Die Durchdringung des Verbundglases stellt für die Funktionsschicht eine potenzielle Fehlerquelle dar, dies ist zum Beispiel bei den hygroskopischen HOE besonders zu beachten. Die Verschraubung lässt zwischen Steg und Flansch nur geringe Verschiebungen zu und führt bei unterschiedlichen Temperaturendehnungen der hybriden Außenbauteile zu Zwangbeanspruchungen.

Geklebte Verbindungen können durch die Wahl des Klebstoffes und der Klebschichtdicke eine begrenzte Verschieblichkeit zwischen Flansch und Steg und somit Zwangbeanspruchungen infolge Temperatur verringern bzw. vermeiden. Um einen gleichmäßigen Lasteintrag in die Scheibe und eine ungestörte Funktionsschicht zu erhalten, wurde der T-Querschnitt als geklebter Querschnitt konzipiert. Die Technologie des Klebens mit den verschiedenen Klebstoffen und ihren Eigenschaften ist umfassend in [Habenicht 2002] beschrieben. Eine Betrachtung im Hinblick auf die Silicon-Klebstoffe im Glasbau findet sich in [Hagl 2005].

Bei den Klebstoffen für konstruktive Verklebungen handelt es sich überwiegend um Polymere. Polymere bestehen aus Molekülketten, die unterschiedlich stark vernetzt sind³⁷. Dieser strukturelle Aufbau bestimmt das Verhalten der Klebstoffe und ergibt die Zuordnung zu den Polymergruppen Thermoplaste, Elastomere oder Duromere, siehe Tabelle 10.

³⁷ Vernetzung : Verbindungen der Molekülketten.

Polymergruppe	Vernetzung	Eigenschaften	Beispiel
Thermoplaste	keine	Erweichung bei Erwärmung	PVB
Elastomere	weitmaschig	gummielastisch (Anwendung bei $T > T_g$)	PUR / Silicon
Duromere	engmaschig	elastisch spröde, hart	Epoxidharz

Tabelle 10: Polymerarten [DIN 7724]

Experimentelle Untersuchungen an verklebten T-Querschnitten mit Glassteg und Glasflansch³⁸ sind in [Pye/Ledbetter 1998] dokumentiert. Die Klebung erfolgte mit einem modifizierten Epoxidharzklebstoff (EP) in 1 mm Dicke. Die Wahl der Klebstoffdicke berücksichtigte die Oberflächenunebenheit von vorgespanntem Glas, hier ESG. Untersucht wurden Belastungen senkrecht zur Flanschebene (Eigengewicht, Wind und Schnee). Die Wirksamkeit des Verbundes wurde mittels des Verbundfaktors C beschrieben, der das Verhältnis der Durchbiegungen des Verbundquerschnitts zu den Durchbiegungen bei starrem Verbund angibt.

$$C = \frac{\delta_C - \delta_L}{\delta_M - \delta_L}$$

mit

δ_C : Durchbiegungen des Verbundquerschnitts;

δ_M :~ des starren Querschnitts; δ_L :~ ohne Verbund

Der untersuchte Epoxidharz ergab mit $C = 0,91$ einen annähernd starren Verbund.

Epoxidharzklebstoffe sind Polyadditionsklebstoffe³⁹ und gehören zu der Gruppe der Duromere. Sie weisen eine starke Vernetzung auf und sind, bei Verwendung von Epoxidharzgrundstoffen, spröde und hart. Dies äußert sich in einer geringen Verformbarkeit und hohen Festigkeit. Die weiteren Eigenschaften sind eine gute Temperatur- und Alterungsbeständigkeit und ein sehr gutes Adhäsionsvermögen. Die modifizierten „zäharten“ Epoxid-

³⁸ Flansch: 800 × 6 mm; Steg: 200 × 10 mm; Trägerlänge: 2250 mm; Material: ESG

³⁹ Bildung des Polymers durch Anlagerung von verschiedenen Monomeren. Hierbei wandert ein Wasserstoffatom von der einen zu der anderen Komponente.

harzklebstoffe weisen durch die Einbindung von kautschukelastischen Partikeln mit wenigen μm Durchmesser eine höhere Verformbarkeit bei unveränderten Haftungseigenschaften auf. Die Verwendung der kalthärtenden Klebstoffe erfolgt überwiegend als Zweikomponentensystem, bestehend aus Epoxidharz und häufig Amin als Härterkomponente. Bei der Planung und Herstellung der Klebung sind die kurzen verarbeitungsfähigen Zeiten (Topfzeiten) und die genauen Mischungsverhältnisse zu beachten.

Die im Bauwesen weit verbreitete Klebstoffgruppe ist die der Silicone. Sie gehören zu den Elastomeren, besitzen eine schwache Vernetzung und weisen ein gummielastisches Verhalten auf. Ihr Werkstoffverhalten ist gekennzeichnet durch hohe Festigkeiten, gute Hafteigenschaften, eine Temperaturbeständigkeit bis $T \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine sehr gute Witterungsbeständigkeit.

Bei den Siliconen werden Einkomponenten- und Zweikomponentensysteme unterschieden. Die Einkomponentensysteme (RTV-1)⁴⁰ binden durch Luftfeuchtigkeit ab. Der enthaltene, hydrolyseempfindliche Vernetzer zersetzt sich durch Reaktion mit Wasser unter Freisetzung eines Spaltproduktes⁴¹ und ermöglicht die Polymerbildung. Im verpackten, nicht eingebauten Produkt verhindert der Vernetzer eine Eigenkondensation und bindet weiterhin in der Verpackung unerwünschte Feuchtigkeit. Die Abbindezeit beträgt bei Normklima 1...2 mm/Tag. Eine Verringerung oder Erhöhung der Luftfeuchte verlangsamt oder beschleunigt die Vulkanisation, verhindert sie jedoch nicht.

Wenn bedingt durch eine zu geringe Luftfeuchte oder zu große Klebschichten, die vollständige oder ausreichend zeitnahe Aushärtung nicht gewährleistet werden kann, kommen die Zweikomponentensysteme zum Einsatz. Hier erfolgt der Abbindeprozess in Abhängigkeit der beiden Komponenten als Kondensationsvernetzung (Abspaltung von Alkohol) oder als Additionsvernetzung (ohne Nebenprodukt).

Ein Konstruktionsklebstoff mit Verbreitung im Automobilbau ist Polyurethan (PUR), ebenfalls ein Polyadditionsklebstoff und ein Elastomer. Die Einkomponentensysteme benötigen zur

⁴⁰ Raum-Temperatur-Vernetzung

⁴¹ Vernetzer können basisch, sauer oder neutral sein und bilden entsprechende Spaltprodukte. Bei sauren Vernetzern ist das Spaltprodukt Essigsäure, es entsteht der bekannte saure Essiggeruch.

Vernetzung die Luftfeuchte als zweite Komponente. Dieser Abbindeprozess benötigt eine relative Luftfeuchte von $> 40\%$ und somit gegebenenfalls eine entsprechende Konditionierung des Klimas. Des Weiteren müssen die Fugengeometrie und/oder die zu verklebenden Werkstoffe einen ausreichenden, einwandfreien Feuchtigkeitszutritt gewährleisten.

Unter Berücksichtigung der vorgenannten Vor- und Nachteile wurde für die T-Lamelle eine Klebung mit einem Silicon-Zweikomponentensystem gewählt. Die wesentlichen Werkstoffeigenschaften für Ein- und Zweikomponentensystem sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

	RTV-1 hier: DC 895 ⁴²	RTV-2 hier: DC 993
Elastizitätsmodul E	0,90 MPa	1,40 MPa
Schubmodul G	0,30 MPa	0,47 MPa
Zugfestigkeit	1,06 MPa	0,95 MPa
Reißdehnung	260 %	130 %

Tabelle 11: Exemplarische Materialdaten Silikonkautschuk [ETA-01/005]

Bei der Auslegung der Klebstoffdicken sind die Längenänderungen infolge Temperatur zu berücksichtigen. Die Betrachtung erfolgt für die folgenden Temperaturen [ETAG 002]:

Metallunterkonstruktion	$T_C = 80 \text{ °C}$ außenliegender Rahmen
	$T_C = 55 \text{ °C}$ innenliegender Rahmen
Glas	$T_V = 80 \text{ °C}$
Aufstelltemperatur	$T_0 = 20 \text{ °C}$

Mit den Temperatureausdehnungszahlen

Glas	$\alpha_T = 9 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
Stahl	$\alpha_T = 12 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
Aluminium	$\alpha_T = 24 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$

⁴² Hersteller: Dow Corning

und dem Ruhepunkt ($\delta_T = 0$) in Feldmitte ergeben sich an beiden Trägerenden die folgenden Differenzverschiebungen δ_T zwischen Steg und Flansch für einen 1 m langen Träger:

$$\delta_T = [\alpha_C \times (T_C - T_0) - \alpha_V (T_V - T_0)] \times \frac{\ell}{2}$$

Stegmaterial Stahl

$$\delta_T = [12 \times 10^{-6} \times (80 - 20) - 9 \times 10^{-6} \times (80 - 20)] \times \frac{1000}{2} \quad (6.2)$$

$$\delta_T = 0,36 - 0,27 = 0,09 \text{ mm/m}$$

Stegmaterial Aluminium (zum Vergleich)

$$\delta_T = 0,72 - 0,27 = 0,45 \text{ mm/m}$$

Die Werte zeigen bei Erwärmung eine Verlängerung des Metallstegs gegenüber dem Glasflansch. Bei Aluminium stellt sich im Vergleich zu Stahl die fünffache Verschiebungsdifferenz ein. Dies relativiert sich jedoch in Anbetracht der, absolut gesehen, kleinen Werte.

Die Mindestdicke der Klebfuge ergibt sich bei Ausnutzung der zulässigen Schubspannung.

$$\tau_{\text{des}} = 1/6 R_{U,5} = 0,11 \text{ MPa (für DC993)}^{43}$$

Mit den bekannten Beziehungen für die Verzerrung γ und die Schubspannung τ lässt sich die Mindestdicke der Klebschicht wie folgt bestimmen:

$$t_a \geq \frac{\delta_T}{\gamma_{\text{max}}} = \delta_T \times \frac{G}{\tau_{\text{des}}}$$

Stegmaterial Stahl $t_a \geq 0,09 \times \frac{0,47}{0,11} = 0,4 \text{ mm/m}$ (6.3)

Stegmaterial Aluminium $t_a \geq 0,45 \times \frac{0,47}{0,11} = 1,9 \text{ mm/m}$

Weiterhin sind in [ETAG 002] Empfehlungen für die Fugengeometrie angegeben:

$$t_a \geq 6 \text{ mm} \quad \text{Mindestdicke der Klebfuge}$$

$$6 \text{ mm} \leq b_a \leq 20 \text{ mm} \quad \text{Breite der Klebfuge} \quad (6.4)$$

$$1 \leq \frac{b_a}{t_a} \leq 3 \quad \text{Verhältnis Breite : Höhe}$$

⁴³ $R_{U,5}$ = Bruchspannungen, 5%-Quantilwert bei 75%-Wahrscheinlichkeit

Der Vergleich dieser Empfehlungen mit den voran ermittelten Mindestfugendicken zeigt, dass die Fugendicken infolge der Temperaturexpansion bei Stahlstegen eher von untergeordneter Bedeutung und bei Aluminiumstegen erst bei Trägern ab 3,0 m Länge zu beachten sind.

Die Eingrenzung der Seitenverhältnisse auf $b_a:t_a \leq 3:1$ ist ohne Einschränkung angegeben, wird jedoch nur für Einkomponentensysteme als notwendig erachtet, um den Feuchtezutritt für den bereits erläuterten Abbindevorgang sicherzustellen.

6.2.2. Mechanisches Modell

Das bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläuterte mechanische Modell für Verbundquerschnitte lässt sich einfach auf den T-Querschnitt übertragen. Das Gesamtbiegemoment M infolge der äußeren Lasten (Wind bzw. Eigengewicht und Schnee) teilt sich in drei Teilmomente auf. Flansch- und Gurtquerschnitt werden in Abhängigkeit ihrer Biegesteifigkeit durch je ein Teilmoment beansprucht. Das dritte Teilmoment stellt sich als Kräftepaar mit dem Hebelarm e (Schwerpunktsabstand von Gurt und Steg) ein und ist abhängig von der durch die Klebefuge gebildeten Verbundqualität, Bild 132.

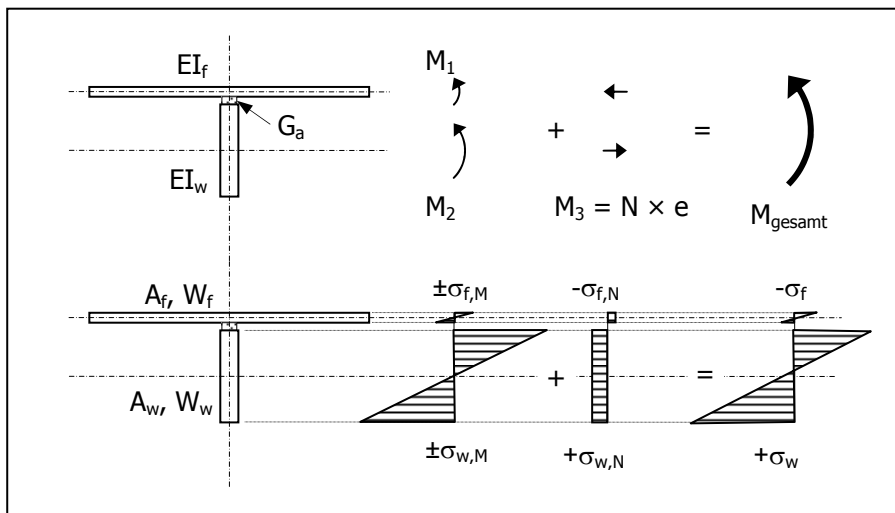


Bild 132:
T-Lamelle,
Aufteilung des
Biegemoments

Die extremalen, bemessungsrelevanten Normalspannungen ergeben sich an der Oberseite des Flansches und der Unterseite des Steges nach Überlagerung der Spannungen aus den Teilmomenten M_1 und M_2 sowie der Normalkraft N .

Ein Rechenverfahren zur Ermittlung der drei Teilmomente wird in 6.2.4 vorgestellt.

6.2.3. Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen wurden an der in Bild 133 dargestellten T-Lamelle durchgeführt.

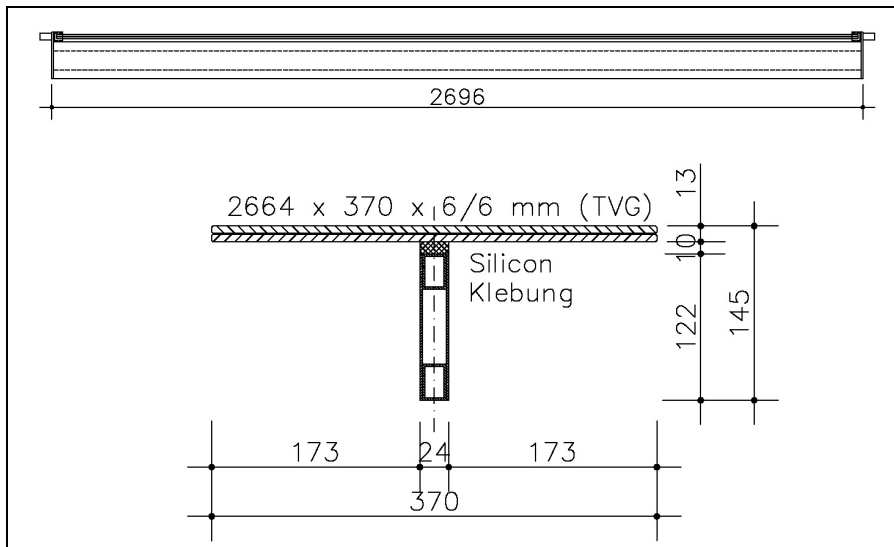


Bild 133:
T-Lamelle, Geometrie

Die Klebung von Glasflansch und Stahlsteg erfolgte mit dem steiferen Zweikomponenten-Silikonkautschuk (vgl. Tabelle 11). Um eine größtmögliche Adhäsion zu erzielen, wurden die Klebflächen gereinigt, aufgeraut und ein Haftvermittler aufgetragen. Das Aufrauen als mechanische Oberflächenvorbehandlung der metallischen Klebfläche dient der Vergrößerung der hinsichtlich der Klebung wirksamen Oberfläche. Die bei der chemischen Oberflächenvorbehandlung verwandten Haftvermittler gehen sowohl mit dem Klebstoff als auch der Bauteiloberfläche eine Reaktion ein und sind daher auf die beteiligten Materialien abzustimmen. Sie werden sowohl für Glas- als auch metallische Oberflächen verwendet.

Der Versuchsaufbau erfolgte als Vierpunkt-Biegeversuch, siehe Bild 134.

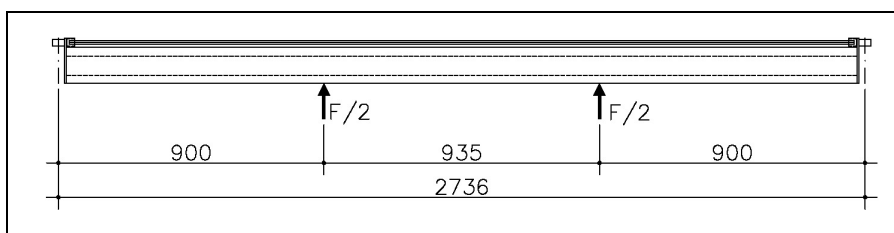


Bild 134:
T-Lamelle,
Versuchsaufbau

Die Versuche wurden bei Raumtemperatur (22...23 °C) durchgeführt.

Die Lastaufbringung erfolgte weggesteuert mit wechselnden Be- und Entlastungsphasen, siehe Bild 135.

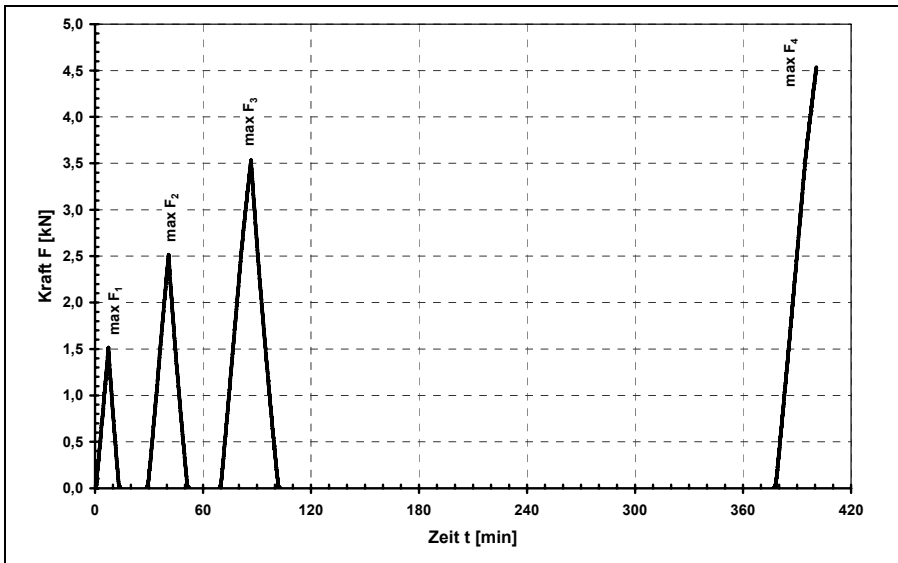


Bild 135:
T-Lamelle,
Be-/ Entlastungsphasen
(1. Versuch)

In Feldmitte des Trägers wurden die Durchbiegungen (Bild 136) sowie die Dehnungen am Glasflansch und Stahlsteg gemessen.

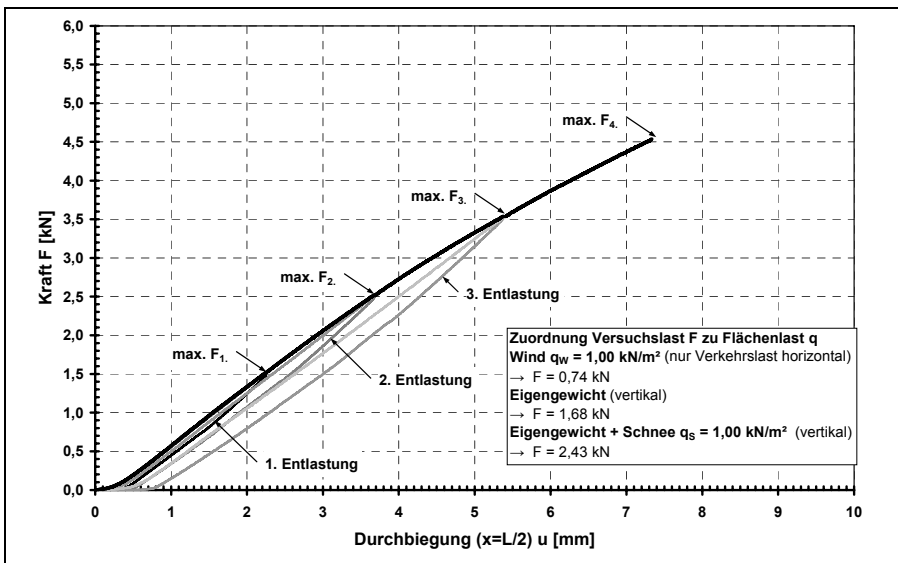


Bild 136:
T-Lamelle,
Kraft-Verformungs-
Diagramm
(1. Versuch)

Die Graphen der vier Belastungsphasen lassen sich jeweils in zwei Bereiche trennen, unterhalb und oberhalb der Maximallast des vorherigen Belastungsschritts. Betrachtet man die i -te Belastung, lässt sich die Verformung näherungsweise mittels eines Sekantenmoduls

$$u_i (F_i \leq F_{\max,i-1}) \approx \frac{F_i}{\frac{F_{\max,i-1}}{u_{\max,i-1}}}$$

beschreiben.

Oberhalb der in den vorangegangenen Phasen erreichten Maximalwerte - entsprechend einer Erstbelastung - nimmt der Verformungsverlauf den für Schubbeanspruchungen von Silicon typischen Verlauf an, vgl. [Hagl 2005]. Die ausschließliche Betrachtung der Erstbelastungsabschnitte ergibt einen durchgängigen Verlauf (dicker schwarzer Graph). Dieses Phänomen der geringeren Steifigkeit nach einer Erstbelastung ist als Mullins-Effekt⁴⁴ bekannt.

Zur Klärung der Beständigkeit dieses Effekts und der Auswirkung für eine rechnerische Abbildung wurde an demselben Träger, einen Monat später, ein zweiter Versuch durchgeführt, siehe Bild 137.

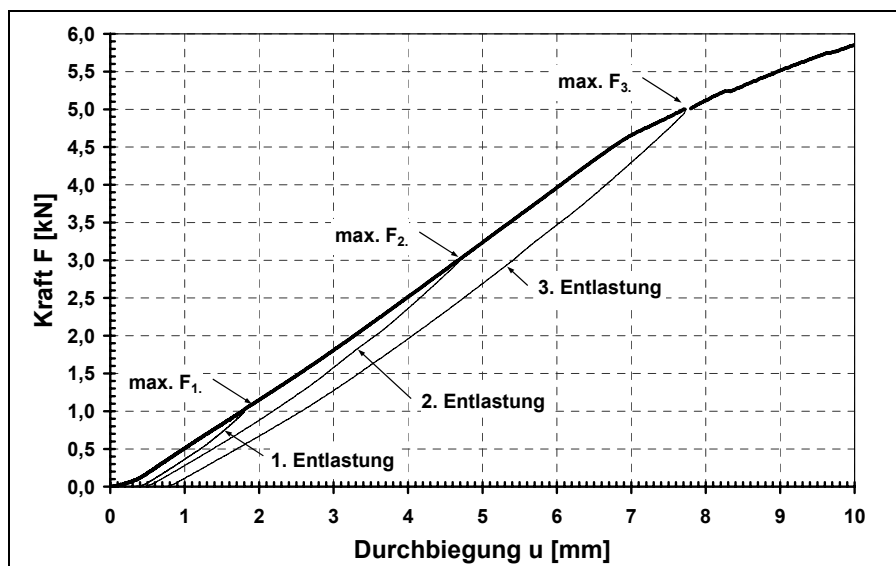


Bild 137:
T-Lamelle,
Kraft-Durchbiegungs-
Diagramm
(2. Versuch)

⁴⁴ Neben den festen chemischen Verbindungen liegen im Elastomer noch temporäre Verbindungen vor. Diese lösen sich bereits bei geringen Beanspruchungen im Material und können sich jedoch auch neu bilden.

Die Ergebnisse des zweiten Versuchs zeigen, dass die Diagramme der Belastungsschritte auf einem Graph liegen und somit ein einheitliches Verformungsverhalten bis zur maximalen Last des ersten Versuchs darstellen, siehe Bild 137.

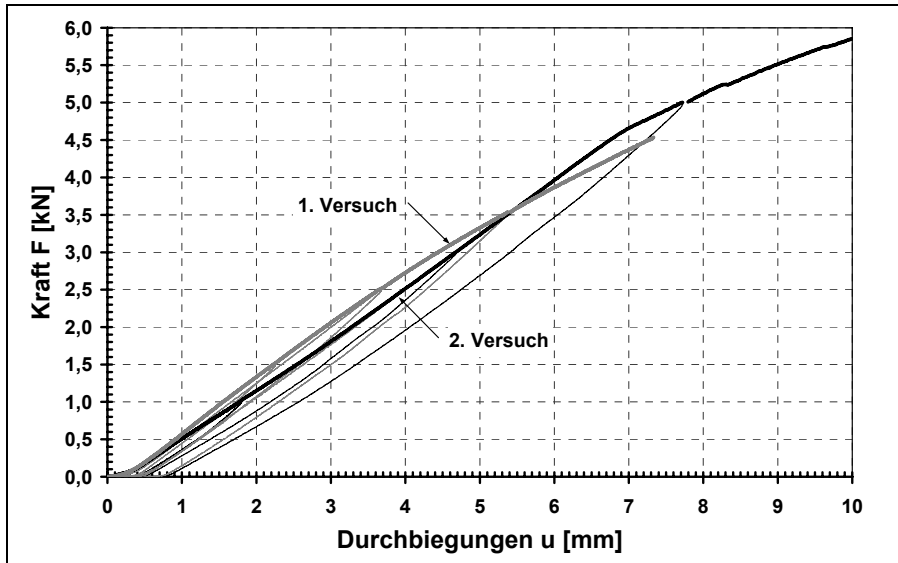


Bild 138:
T-Lamelle,
Kraft-Durchbiegungs-
Diagramm
(Vergleich)

Der Vergleich der Ergebnisse beider Versuche zeigt, dass der Belastungsgraph des ersten Versuchs und der des zweiten Versuchs ähnliche Werte darstellen, siehe Bild 138. Des Weiteren ist zu erkennen, dass im Falle der wiederholten Belastung (Wiederbelastungsbereich) die Durchbiegungen bei Be- und Entlastung nur geringfügig differieren. Diese beiden Feststellungen erlauben es, für ein Rechenmodell einen konstanten Schubmodul zu verwenden.

Aus den Dehnungen wurden über das Hookesche Gesetz mittels der Elastizitätsmoduln $E_{\text{Stahl}} = 210000 \text{ N/mm}^2$ und $E_{\text{Glas}} = 70000 \text{ N/mm}^2$ die Normalspannungen ermittelt, Bild 139.

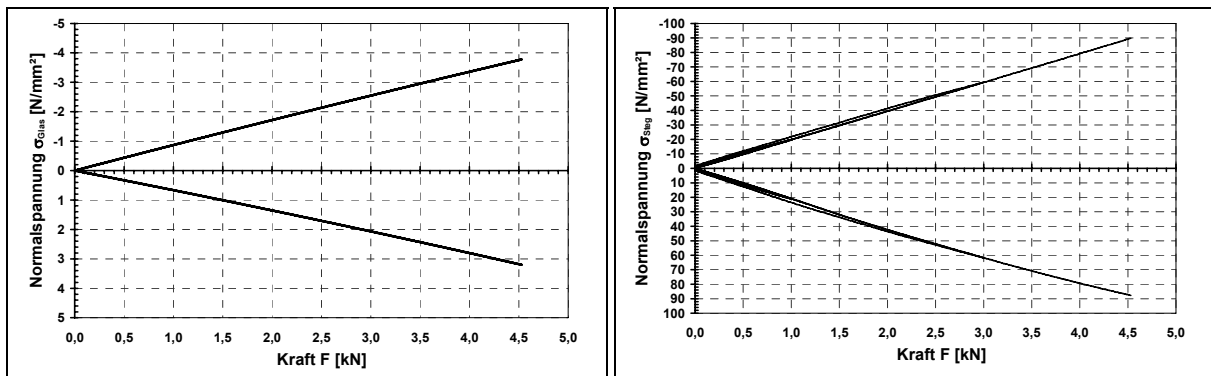


Bild 139: T-Lamelle, Normalspannungen oben und unten in Feldmitte, a) Glasflansch, b) Stahlsteg

Die Spannungsverläufe weisen für Flansch und Steg jeweils Druck- und Zugspannungen mit annähernd gleichem Betrag auf. Dies zeigt, unter Berücksichtigung der erläuterten Aufteilung des Gesamtmoments (vgl. Bild 132), dass die Verbundwirkung des T-Querschnitts eher von geringer Bedeutung ist.

Die wesentliche Stärke des T-Querschnitts liegt sicherlich in der wechselseitigen Übernahme von Tragaufgaben in Trägerrichtung und die gegenseitigen Stabilisierung der Elemente, siehe Bild 140.

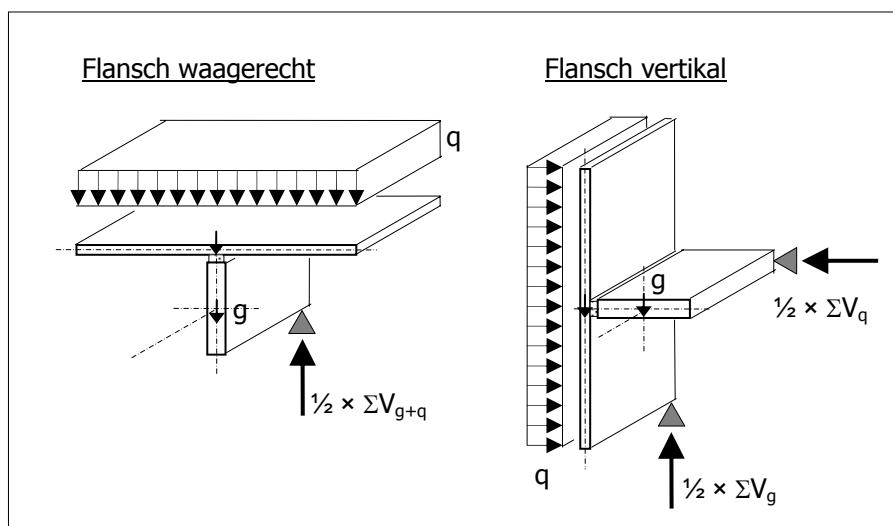


Bild 140:
T-Lamelle,
Querschnittsstellung und
Lastabtrag

Unabhängig der Querschnittsposition übernimmt der Steg immer den Hauptanteil des Verkehrslastabtrags (Schnee, Wind). Mit zunehmender Neigung des Stegs erfolgt der Abtrag des Eigengewichts über den Flansch, womit keine großen Beanspruchungen verbunden sind.

Selbst bei Vernachlässigung einer Scheibentragswirkung ergibt sich aus dem Trägereigengewicht eine geringe Spannung in der Scheibe. Bei einem nicht vorgespannten Floatglas beträgt unter Eigengewicht die Ausnutzung der zulässigen Spannungen nur 10%.

$$M = \frac{(0,3 + 0,07) \text{ kN/m} \times 3,00^2}{8} = 0,42 \text{ kNm}$$

$$\sigma = \frac{420000}{12 \times 370^2} \times 6 = 1,5 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{zul,SPG}} = 15 \text{ N/mm}^2$$

Zu beachten ist jedoch eine sorgfältig aufgearbeitete Glaskante, da, wie auch bei der gebogenen Lamelle, der Randbereich über die gesamte Querschnittshöhe durch Zugspannungen beansprucht wird. Weiterhin ist eine kontinuierliche Lagerung der auflagerseitigen Glasränder einzuplanen, damit die bei Querschnittsneigung entstehende Auflagerkomponente möglichst über eine große Glaslänge aufgenommen werden kann.

6.2.4. Rechnerische Untersuchungen

Nachstehend wird ein im Kontext von nachgiebigen Holzträgern vorgestelltes Stabwerk-Rechenmodell [Kneidl 1995] auf die Anwendung bei Lamellen mit T-Querschnitt (Bild 141) übertragen.

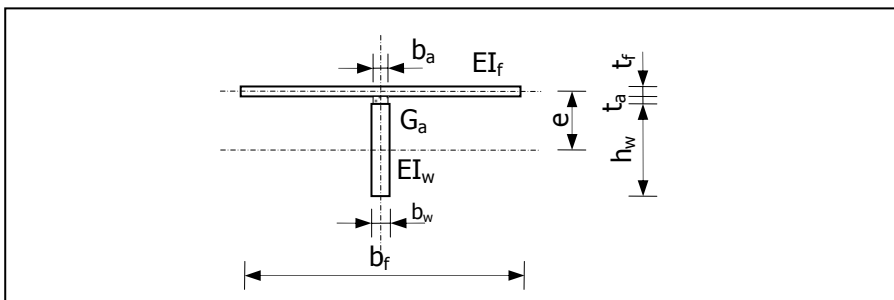


Bild 141:
T-Lamelle,
Querschnittsbezeichnungen

In dem Modell werden Steg und Flansch durch Stabzüge mit den zugehörigen Querschnittsbiegesteifigkeiten ersetzt. Die Einzelstäbe der Stabzüge ergeben zusammen mit dehnsteifen vertikalen Koppelstäben Rechteckfelder, die jeweils mit zwei Diagonalfedern ausgekreuzt werden. Diese Federn bilden die durch die Klebfuge bedingte Verschieblichkeit zwischen Steg

und Flansch ab, siehe Bild 142. Die Federsteifigkeit bestimmt sich aus dem Schubmodul der Klebschicht und der Geometrie.

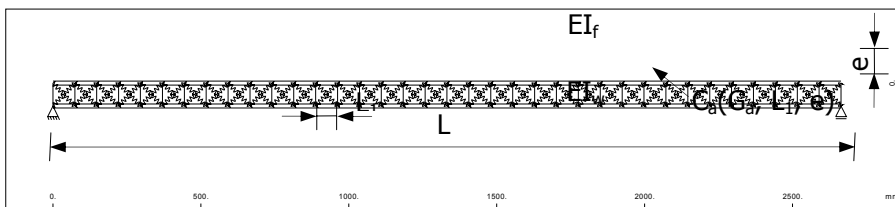


Bild 142:
Stabwerkmodell

Zur Ermittlung der Federsteifigkeit der Diagonalfeder wird ein Element mit der Teillänge L_1 betrachtet.

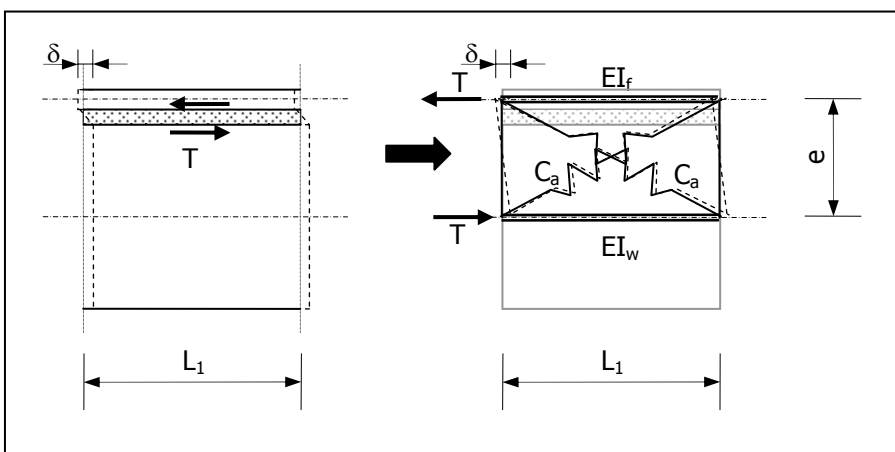


Bild 143:
T-Lamelle,
Element des Stabwerk-
modells

Die Schubkraft T eines Teilelements beträgt:

$$\begin{aligned}
 T &= \tau \times b_a \times L_1 \\
 \text{mit: } \tau &= G \times \frac{\delta}{t_a} \\
 T &= G \times \delta \times \frac{b_a}{t_a} \times L_1
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

Der Ausdruck der Arbeitsgleichung zur Ermittlung von Federverformungen lautet:

$$\delta = \frac{\bar{F} \times F}{C_F}
 \tag{6.6}$$

Mit den Kräften in Wirkungsrichtung der Federn

$$F = T \times \frac{\sqrt{e^2 + L_1^2}}{L_1} \quad \text{und} \quad \bar{F} = \bar{1} \times \frac{\sqrt{e^2 + L_1^2}}{L_1} \quad (6.7)$$

ergibt sich der Versatz in der Klebefuge unter Berücksichtigung der beiden Diagonalfedern, jeweils mit der Steifigkeit C_a , zu

$$\delta = T \times \left(\frac{\sqrt{e^2 + L_1^2}}{L_1} \right)^2 \times \frac{1}{2 \times C_a} \quad (6.8)$$

Nach dem Ausformulieren der Schubkraft mit (6.5) lässt sich die Gleichung umstellen und ergibt die Federsteifigkeit der Diagonalfeder in Abhängigkeit des Schubmoduls G.

$$\delta = G \times \delta \times \frac{b_a}{t_a} \times L_1 \times \left(\frac{\sqrt{e^2 + L_1^2}}{L_1} \right)^2 \times \frac{1}{2 \times C_a} \quad (6.9)$$

$$C_a = \frac{1}{2} \times G \times \frac{b_a}{t_a} \times \frac{e^2 + L_1^2}{L_1}$$

Mit der Federsteifigkeit C_a gemäß (6.9), dem Silicon-Schubmodul G (vgl. Tabelle 11) sowie den Material- und Querschnittswerten für Steg und Flansch (Bild 133) wurde ein Rechenmodell erstellt. Durch Ansatz der Lasten entsprechend des durchgeführten Vier-Punkt-Biegeversuchs (Bild 144) ist eine Verifikation des Modells durch Abgleich der rechnerischen mit den experimentellen Ergebnissen möglich, siehe Tabelle 12.

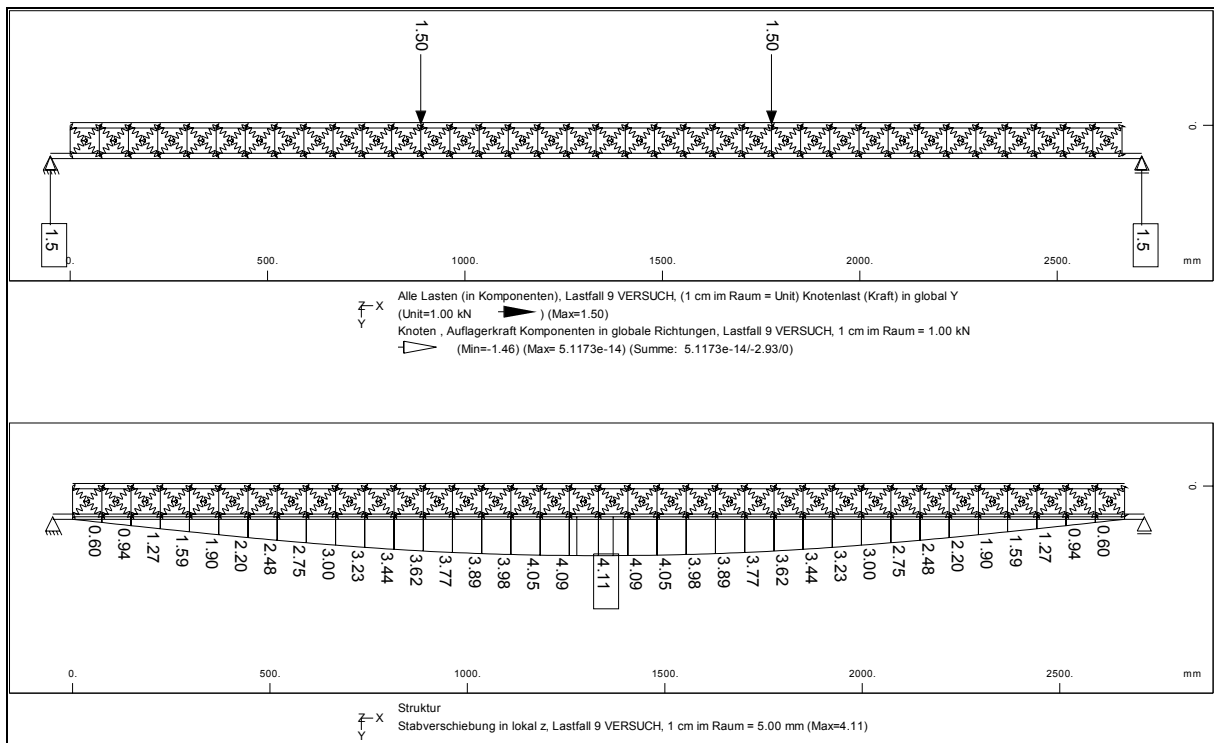


Bild 144: Stabwerkmodell, Gegenrechnung Vier-Punkt-Biegeversuch
 a) Lasten und Auflagerreaktionen, b) Durchbiegungen

	1. Versuch	2. Versuch	Stabwerkmodell
Kraft F [kN]	3,0	3,0	3,0
Durchbiegung u [mm]	4,4	4,7	4,1
Spannung Flansch σ_f [N/mm ²]	-2,5	-2,5	-2,6
	+2,0	+2,1	+2,5
Spannung Steg σ_w [N/mm ²]	-58,6	-59,5	-62,9
	+61,4	+61,8	+63,8

Tabelle 12: Gegenüberstellung Versuchs- und Rechenergebnisse für $F = 3$ kN

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt eine gute Übereinstimmung der extremalen, bemessungsrelevanten Durchbiegungs- und Spannungswerte. Daher kann das vorgestellte Stabwerk-

Rechenmodell für den Entwurf und die Dimensionierung solcher Verbundkonstruktionen als sinnvolles und einfach handhabbares Werkzeug angesehen werden.

Zu der Dimensionierung der Klebfugendicke sind die Berücksichtigung der Temperatur und die Geometrie-Empfehlungen der [ETAG 002] bereits vorgestellt worden, vgl. (6.3) (6.4). Ergänzend zu diesen Vorgaben stellt sich die Frage, welchen Einfluss die Klebschichtdicke auf die Verbundqualität hat. Die Untersuchung hierzu wurde mittels des vorgestellten Rechenmodells für die Prototyp-Lamelle durchgeführt. Das ermittelte Tragverhalten für verschiedene Klebstoffdicken wird mittels der Anteile der Teilmomente an dem Gesamtmoment dargestellt, siehe Bild 145.

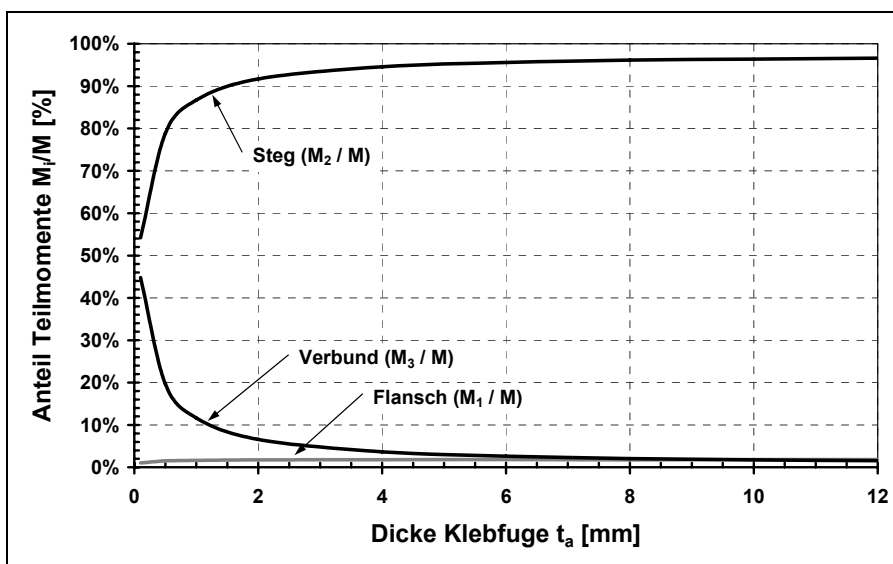


Bild 145:
Einfluss Klebschichtdicke
(Silicon-Klebung)

Es zeigt sich, dass der Einfluss der Dicke der Silicon-Klebschicht eher von untergeordneter Bedeutung ist. Eine nennenswerte Verschiebung der Momentenanteile erfolgt erst bei Klebstoffdicken unter 2 mm, die aber ausführungstechnisch problematisch sind.

Die Dimensionierung der Klebefuge kann somit auf Basis der Temperaturbetrachtung und der Geometrie-Vorgaben erfolgen.

6.3. Konstruktionshinweise

In den Kapiteln 6.1 und 6.2 wurden Lamellenkonstruktionen untersucht, deren Tragelement mit gebogenem Glas oder mit einem hybriden geklebten T-Querschnitt, jeweils im Hinblick auf die Verwendung mit Funktionsgläsern, gebildet wurde. Die auf Basis der Untersuchungen entwickelten Hinweise zur Ausbildung der Konstruktion sind nachstehend zusammengefasst.

6.3.1. Glasrand

Bei beiden Konstruktionen ist der freie Glasrand⁴⁵ komplett durch Zugspannungen beansprucht. Um rissauslösende Fehlstellen möglichst zu vermeiden, ist eine hochwertige Kantenbearbeitung notwendig. Dies gilt auch wenn die freie Kante durch Kantenprofile eingefasst und geschützt wird, wobei die Kantenprofile selbstverständlich insofern sinnvoll sind, als sie vor etwaigen Beschädigungen schützen.

6.3.2. Gebogene Lamelle

Die Krümmung des Glases in Querrichtung (quer zur Tragrichtung) ermöglicht eine deutliche Vergrößerung der Spannweite auf mindestens drei Fassadenraster. Bestimmt wird das Tragverhalten von dem Querschnittsstich, der als Schlankheit H/L ausgedrückt mindestens 0,02 betragen sollte, damit sich ein Membrantragverhalten einstellen kann. Wird dieses Maß unterschritten, kommt es zu einer deutlichen Zunahme des Biegetragverhaltens und der Normalspannungen. Die Breite der Lamelle ist hierbei von untergeordneter Bedeutung.

Bedingt durch die vorwiegende Membrantragwirkung ist die Berücksichtigung von Verbundeigenschaften des Verbundglases nicht von Interesse.

Die Vordimensionierung kann vereinfacht an einem Stabmodell mit gebogenem Querschnitt durchgeführt werden. Der damit verbundene Fehler liegt bei ca. 5%.

⁴⁵ Freier Rand im Sinne von ungestütztem Rand.

6.3.3. Lamelle mit hybridem T-Querschnitt

Das Hauptpotenzial der Lamelle mit hybridem T-Querschnitt und damit der entscheidende Vorteil gegenüber anderen Konstruktionen liegt in der wechselnden Verteilung der Tragaufgaben bei unterschiedlichen Querschnittspositionen im Falle der drehbaren, waagerechten Lamelle, siehe Bild 140. Hierbei ist es notwendig, dass die stirnseitigen Glasränder kontinuierlich gelagert und vorzugsweise verklebt sind. Dies stellt eine gleichmäßige Lasteinleitung in die Glashalterung sicher und vermeidet Spannungsspitzen infolge punktueller Auflagerungen.

Bei der Auslegung des Querschnitts, insbesondere bei Außenbauteilen, ist das unterschiedliche Temperatúrausdehnungsverhalten der Materialien zu beachten. Die hieraus resultierenden Längendifferenzen sind als Verschiebung in der Verbundfuge zu kompensieren. Diese Verschiebungen betragen je Meter Trägerlänge bei einem Glas-Stahl-Querschnitt $\delta_T = 0,09 \text{ mm/m}$ und bei einem Glas-Aluminium-Querschnitt $\delta_T = 0,45 \text{ mm/m}$, jeweils unter der Voraussetzung, dass der Ruhepunkt in Trägermitte liegt. Für das in dieser Untersuchung betrachtete Silicon-Zweikomponentensystem führt dies zu Klebstoffdicken t_a von mindestens 0,4 bzw. 1,9 mm.

Die Dicke der Silicon-Klebfuge ist in dem herstellungstechnisch relevanten Bereich ohne entscheidenden Einfluss auf das Tragverhalten der Lamelle. Der wesentliche Lastabtrag wird bestimmt durch die Trägheitsmomente von Glasflansch und Stahlsteg. Durch den Einsatz von steiferen Klebstoffen kann der Traganteil des Verbundquerschnitts sicherlich erhöht werden. Dies ist jedoch in weitergehenden Untersuchungen zu klären.

Die rechnerische Betrachtung kann mit einem vereinfachten Stabwerk-Rechenmodell durchgeführt werden, siehe Bild 142.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Glaslamellen mit integrierten Funktionselementen, die im Fassadenbau für verschiedene Zwecke eingesetzt werden, weisen mit ihrem mehrschichtigen Aufbau ein Potenzial für Verbundtragwirkung auf. Mit einer sicheren Identifikation dieser Trageigenschaft und ihrer gezielten Nutzung können die Lamellen für größere Spannweiten wirtschaftlicher dimensioniert werden. Mit Vergrößerung der Spannweiten wird auch der Aufwand an Unterkonstruktionen reduziert und gleichzeitig die Transparenz erhöht.

Die oben genannten Optimierungsmöglichkeiten wurden in dieser Arbeit am Beispiel von Glaslamellen mit eingebetteten lichtlenkenden Hologrammfolien (HOE) systematisch untersucht. Hierzu wurden zunächst die typischen Einbausituationen der HOE-Funktionsgläser im Fassaden- und Dachbereich sowie die zugehörigen konstruktiven Randbedingungen für die Fügung am Gebäude zusammengestellt.

Zur Identifizierung des Tragpotenzials der Verbundgläser unter Plattenbiegung wurden experimentelle Untersuchungen an ausgewählten Lamellenkonstruktionen durchgeführt. In diesen Experimenten konnte das günstige Verbundtragverhalten im Hinblick auf reduzierte Spannungen und Verformungen in den Gläsern sowie eine höhere Resttragfähigkeit der Zwischenschicht im Vergleich zu PVB-Folien festgestellt und quantifiziert werden. Mit Scherverversuchen an Kleinproben (10×10 cm) wurde der Schubverbund der mehrlagigen HOE-Zwischenschicht unter Berücksichtigung der Einflüsse aus Temperatur, Verformungsgeschwindigkeit und Belastungsgeschichte identifiziert und rechnerisch beschrieben. Mit dem aus den Versuchen ermittelten Schubmodul konnte das Tragverhalten der Lamellen rechnerisch verifiziert werden.

Die betrachteten Lamellen werden vertikal eingesetzt. Da hierbei die wesentlichen Beanspruchungen infolge kurzzeitiger Windlasten auftreten, konnte das Kriechverhalten der polymeren Zwischenschichten vorerst unberücksichtigt bleiben. Bei einer Erweiterung der Ergebnisse auf Dachkonstruktionen sind noch Langzeituntersuchungen im Hinblick auf Schneelasten erforderlich.

Zur Vergrößerung der Lamellenstützweite bietet, neben der Berücksichtigung der Verbundeigenschaften, auch die Nutzung der funktionsbestimmten Formgebung ein erhebliches Potenzial. Hierzu wurden zwei Querschnittsvarianten für längere Lamellen untersucht. Die Lamellen aus gebogenem Glas besitzen eine zylindrisch gekrümmte Form, die die Konzentration der solaren Strahlung auf einem Absorber unterstützt und gleichzeitig die Ausbildung der günstigen Membrantragwirkung ermöglicht. Bei der zweiten Variante wurden ein ebenes lichtlenkendes Glas und ein Stahl-Solarabsorber zu einem tragfähigen hybriden Glas-Stahl-Querschnitt verklebt. In beiden Fällen wurde das Tragverhalten experimentell und rechnerisch untersucht. Daraus ergaben sich konkrete Anforderungen an die konstruktive Durchbildung für Glasrand, Glashalterung und Klebeverbindung.

In dieser Arbeit konnte am Beispiel von ebenen und gebogenen Funktionsverbundgläsern mit eingebetteten Lichtlenkfolien das Potenzial aufgezeigt werden, welches in der Synthese von Funktions- und Tragelementen liegt. Diese Synthese bietet auch die Grundlage für die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet, in dem durch die gezielte Fügung von Funktionsschichten und -elementen gewünschte Trag- und Funktionseigenschaften erzielt werden.

8. LITERATUR

- [Achilles et al. 2003] Achilles, A.; Braun, J.; Seger, P.; Stark, T.; Volz, T.:
glasklar, Produkte und Technologien zum Einsatz von Glas in der Architektur,
München : Deutsche Verlags-Anstalt, 2003
- [Bucak 1999] Bucak, Ö.:
Glas im konstruktiven Ingenieurbau
in: Stahlbau-Kalender, Berlin : Ernst & Sohn, 1999
- [Burg et al. 1996] Burg, M.; Gutjahr, J.; Kraus, A.; Müller, H.; Schuster, P.; Wüller, D.:
Entwicklung von Photovoltaik-Bauteilen mit Holographisch-Optischen-Elementen
Fortschrittsberichte VDI-Reihe 6 Nr. 347, Düsseldorf : VDI, 1996
- [Compagno 1996] Compagno, A.:
Intelligente Glasfassaden; Material, Anwendung, Gestaltung
2. unveränd. Nachdr. (1.Aufl.: 1995) Basel : Birkhäuser, 1996
- [Eisele/ Kloft 2002] Eisele, J.; Kloft, E.:
Hochhaus Atlas
München : Callwey, 2002
- [Fink 2000] Fink, A.:
Ein Beitrag zum Einsatz von Floatglas
als dauerhaft tragender Konstruktionswerkstoff im Bauwesen (Diss.)
Bericht 21, Institut für Statik, TU Darmstadt, Eigenverlag TU Darmstadt, 2000
- [Fischer 2001] Fischerwerke
Produktinfo Hinterschnittanker FZP-G, 2001
- [Grimm 2004] Grimm, F.:
Energieeffizientes Bauen mit Glas
München : Callwey, 2004
- [Habenicht 2002] Habenicht, G.:
Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendung;
4. Auflage, Berlin : Springer, 2002
-

- [Hagl 2005] Hagl, A.:
Kleben im Glasbau;
im: Stahlbau-Kalender 2005, Berlin : Ernst & Sohn, 2005
- [Hascher et al. 2002] Hascher, R.; et al.:
Entwurfsatlas Bürobau, Basel : Birkhäuser, 2002
- [Kaltenbach 2003] Kaltenbach, F. (Hrsg.):
Transluzente Materialien; Glas, Kunststoff, Metall
München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2003
- [Kneidl 1995] Kneidl, R.; Hartmann, H.:
Träger mit nachgiebigem Verbund
in: Bauen mit Holz, 4/1995, S. 285-290, Bruderverlag, Köln
- [Kutterer 2003] Kutterer, Matthias:
Verbundglasplatten; Näherungslösungen zur Berücksichtigung von Schubverbund und Membrantragwirkung (Diss.), Aachen : Shaker, 2003
- [Menges et al. 2002] Menges, G.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.; Schmachtenberg, E.
Werkstoffkunde Kunststoffe, München : Hanser, 2002
- [Müller 1998] Müller, H. F. O.:
Glas, in: Wendehorst, Baustoffkunde, 25. Aufl. Hannover : Vincentz, 1998
- [Müller et al. 1997] Müller, H. F. O.; Kischkoweit-Lopin, M.
Architektur auf der Sonnenspur, Hamburg : HEW Eigenverlag, 1997
- [Müller et. al. 2005] Müller, H. F. O.; Schuster, H.; Oetzel, M.; Emembolu, A.; Soylu, I.:
Sonnenschutz und Tageslichtbeleuchtung in Büroräumen
Messungen – Berechnungen – Nutzerbefragungen
in: Bauphysik-Kalender 2005, Berlin : Ernst & Sohn, 2005
- [Oberbach 2001] Oberbach, K.:
Saechtling – Kunststoff-Taschenbuch, 28. Ausgabe, München : Carl Hanser, 2001
- [Pahl et al. 1991] Pahl, M.; Gleißle, W.; Laun, H.-M.:
Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere, Düsseldorf : VDI, 1991
-

-
- [Petersen 1994] Petersen, C.:
Stahlbau
3. Auflage (korrigierter Nachdruck), Braunschweig : Vieweg, 1994
- [Petzold et al. 1990] Petzold, A.; Marusch, H.; Schramm, B.:
Der Baustoff Glas, 3. Aufl. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1990
- [Pye/Ledbetter 1998] Pye, A.; Ledbetter, S.:
The selection of an adhesive for the construction of a glass-adhesive T-beam
in: International Journal of Adhesion & Adhesives 18 (1998), S. 159-165
Elsevier Science Ltd.
- [Retting 1991] Retting, W.:
Mechanik der Kunststoffe : die mechanischen Eigenschaften von polymer Kunststoffen
München : Hanser, 1991
- [Rice/ Dutton 1995] Rice, P.; Dutton, H.:
Transparente Architektur; Glasfassaden mit Structural Glazing, Basel : Birkhäuser Verlag, 1995
- [Römhild/ Jentsch 2004] Römhild, T.; Jentsch, M.:
Holographic Optical Elements;
Daylighting in Architecture and advanced Methods for its Design
Wismar : Hochschule Wismar, 2004
- [Scholze 1988] Scholze, H.:
Glas; Natur, Struktur und Eigenschaften, 3. Aufl. Berlin : Springer-Verlag, 1988
- [Schuler 2003] Schuler, C.:
Einfluss des Materialverhaltens von Polyvinylbutyral auf das Tragverhalten von Verbund-
Sicherheitsglas in Abhängigkeit von Temperatur und Belastung (Diss.), TU München, 2003
- [Sedlacek et al. 1999|1] Sedlacek, G.; Blank, K.; Laufs, W.; Güssen, J.:
Glas im Konstruktiven Ingenieurbau, Berlin : Ernst & Sohn, 1999
- [Sedlacek et al. 1999|2] Sedlacek, G.; Wellershoff, F.; Hortmanns, M.:
Windlasten für belüftete Doppelfassaden
in: Glasforum 4/99, Schorndorf : Verlag Karl Hofmann, 1999
- [SGG] SGG – Saint Gobain Glass
Produktinfos + Datenblätter
-

- [Shavit 2007] Shavit, D.:
Elektronische Komponenten in Glaslaminaten
in: glas, Heft 1/2007, S. 43-45
- [Shen 1997] Shen, X.:
Entwicklung eines Bemessungs- und Sicherheitskonzeptes für den Glasbau
Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 4 Bauingenieurwesen, Nr. 138, Düsseldorf : VDI, 1997
- [Siebert 1999] Siebert, G.:
Beitrag zum Einsatz von Glas als tragendes Bauteil im Konstruktiven Ingenieurbau (Diss.)
Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, Eigenverlag TU München, 1999
- [Siebert 2006] Siebert, G.:
Aktueller Stand der Regelungen für die Bemessung von tragenden Bauteilen aus Glas
in: Stahlbau (75), Heft 8/2006, Seite 663-669, Ernst & Sohn
- [Sobek et al. 2000] Sobek, W.; Kutterer, M.; Messmer, R.:
Untersuchungen zum Schubverbund bei Verbund-Sicherheitsglas - Ermittlung des zeit- und temperaturabhängigen Schubmoduls bei PVB
in: Bauingenieur (75), 1/2000, S. 41-46, Springer
- [Stamm/ Witte 1974] Stamm, K.; Witte, H.:
Sandwichkonstruktionen; Berechnung, Fertigung, Ausführung
Wien : Springer, 1974
- [Trosifol 2001] Trosifol:
Technischer Katalog
Troisdorf : 2001
- [Wellershoff 2006] Wellershoff, F.:
Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebäudehüllen (Diss.)
Aachen : Shaker, 2006
- [Wellershoff 2007] Wellershoff, F.:
Bemessungsschubmodulwerte für Verbundglasscheiben
in: Stahlbau (76) 2007, Heft 3, S. 177-188, Berlin : Ernst & Sohn
-

- [Wölfel 1987] Wölfel, E.:
Nachgiebiger Verbund
Eine Näherungslösung und deren Anwendungsmöglichkeiten
in: Stahlbau, Heft 6/1987, S. 173-180, Berlin : Ernst & Sohn
- [Wörner et al. 2001] Wörner, J.-G.; Schneider, J.; Fink, A.:
Glasbau; Grundlagen, Berechnung, Konstruktion
Berlin : Springer, 2001
- [Wrede 2003] Wrede, C.:
Untersuchung zur Scherfestigkeit
in der Verbundfuge von Verbundglas mit einlamierten Hologrammen (HOE)
Diplomarbeit, 2003 (unveröffentlicht)

Normen/ Regelwerke/ Zulassungen

- [BÜV 2001] Arbeitskreis Glasbau des Bau-Überwachungsvereins (BÜV e.V.):
BÜV-Empfehlungen für die Bemessung und Konstruktion von Glas im Bauwesen
in: Der Prüferingenieur, April 2001, S. 55-69
- [E DIN 18008] Entwurf DIN 18008: 2006-03
Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln
Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen
Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen
- [DIN 1055-4] DIN 1055-4: 2005-03; DIN 1055-4 Berichtigung: 2006-03
Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten
- [DIN 1055-5] DIN 1055-5: 2005-07
Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 5: Schnee- und Eislasten
- [DIN 1249-11] DIN 1249-11: 1986-09
Flachglas im Bauwesen; Glaskanten; Begriff Kantenformen und Ausführung
- [DIN 18545] DIN 18545-1: 1992-02
Abdichten von Verglasungen mit Dichtstoffen, Anforderungen an Glasfalze
-

- [DIN 7724] DIN 7724:1993-04
Polymere Werkstoffe
Gruppierung polymerer Werkstoffe aufgrund ihres mechanischen Verhaltens
- [DIN EN 12150] DIN EN 12150-1: 2000-11
Glas im Bauwesen, Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas
Teil 1: Definition und Beschreibung
- [DIN EN 1863] DIN EN 1863-1: 2000-03
Glas im Bauwesen – Teilvorgespanntes Kalknatronglas
Teil 1: Definition und Beschreibung
- [DIN EN 572] DIN EN 572-1: 2004-09
Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas
Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften
- [DIN V ENV 1991-2-4] DIN V ENV 1991-2-4 : 1996-12
Eurocode 1, Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke,
Teil 2-4: Einwirkungen auf Tragwerke - Windlasten
- [ETA-01/005] ETA-01/005
European Technical Approval, DC 993 and DC 895
- [ETAG 002] ETAG 002:
Guideline for european technical approval for structural sealant glazing systems (SSGS)
Part 1: Supported and unsupported systems, Edition 1999-11, amended 2001-10
- [TRLV 2006] TRLV
Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV);
Schlussfassung August 2006, in: DIBt Mitteilungen 3/2007, S. 110-115
- [TRPV 2006] TRPV
Technische Regeln für die Bemessung und die Ausführung punktförmig gelagerter Verglasungen (TRPV);
Schlussfassung August 2006, in: DIBt Mitteilungen 3/2007, S. 106-109
-

ANHANG

Abkürzungen/ Symbole

A	Fläche
A	Geländehöhe über Meeresniveau (altitude)
B_D	Biegesteifigkeit aus Eigenträgheitsmomenten der Deckschichten
B_S	Biegesteifigkeit aus Steiner Anteil der Deckschichten
b, B	Lamellenbreite
b_a	T-Querschnitt, Breite Klebstoff (adhesive)
b_f	T-Querschnitt, Breite Flansch (flange)
b_w	T-Querschnitt, Breite Steg (web)
E	Elastizitätsmodul
E_G	Elastizitätsmodul Glas
EP	Epoxidharz
EPDM	Ethylen-Propylen-Kautschuk (Terpolymer)
ESG	Einscheiben-Sicherheitsglas
EVA, EVAC	Ethylen-Vinylacetate-Copolymer
e	Schwerachsenabstand der Glasscheiben bei Verbundglas
G	Schubmodul
g	Gesamtenergiedurchlassgrad
g	Glasfalzgrund
HOE	Holographisch-optische Elemente
h	Glasfalzhöhe
h_w	T-Querschnitt, Höhe Steg (web)
I	Trägheitsmoment
i	Glaseinstand
i_k	Glaseinstand Klotzung
i_s	Glaseinstand Silikon
LC, LCD	Flüssigkristalle, Flüssigkristallanzeige
l, L	Lamellenlänge
M_1, M_2	Teilmomente infolge Eigenträgheitsmomente
M_S, M_3	Teilmomente infolge Steiner Anteil
PA6	Polyamid
PET	Polyethylenterephthalat
POM	Polyoxymethylen/ Polyacetal
PV	Photovoltaik
PVB	Polyvinyl-Butyral

R, R_m, R_i, R_a	Radius, ~ mittel, ~ innen, ~ außen
R_s	Abstand Bogenschwerpunkt zu Mittelpunkt
S	Schubsteifigkeit
S_z	Schubsteifigkeit der Zwischenschicht
SLS	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
SPG	Spiegelglas, normal gekühltes Floatglas
T	Temperatur
T_g	Glasübergangstemperatur, Einfriertemperatur
T_L	Lichttransmissionsgrad
T_L	Temperatur Außenluft
T_Δ	Differenz Lufttemperatur und Bauteiltemperatur
TCO	Transparente elektronenleitfähige Folie
TPU	Thermoplastische Polyurethane
TVG	Teilvorgespanntes Glas
t	Zeit, Lasteinwirkungsdauer
t	Gesamtdicke Verbundglas
t_1, t_2, t_i, t_G	Dicke obere bzw. untere Glasscheibe (Deckschicht)
t_a	T-Querschnitt, Dicke Klebstoff (adhesive)
t_f	T-Querschnitt, Dicke Flansch (flange)
t_z	Dicke Zwischenschicht
ULS	Grenzzustand der Tragfähigkeit
\bar{u}	Bezogene Durchbiegung
u	Durchbiegung
VG	Verbundglas
VSG	Verbund-Sicherheitsglas
W	Widerstandsmoment
w	Windlast
α	Öffnungswinkel Bogen
α_T	Temperaturausdehnungskoeffizient
β	$\frac{1}{2}$ Öffnungswinkel Bogen
γ	Verzerrung des Verbundquerschnitts
$\dot{\gamma}$	Verzerrungsgeschwindigkeit
Δ	Differenz
δ	Gegenseitige Verschiebung der Schichten des Verbundquerschnitts
δ_T	Gegenseitige Verschiebung der Schichten infolge Temperaturausdehnung
ε	Dehnung
η	Viskositätsmodul
σ	Normalspannung
τ	Schubspannung

Glossar

Deckschicht	Die beiden äußeren Schichten der Sandwichkonstruktion (hier: Glas). Sie besitzen mindestens eine Dehnsteifigkeit (dünne Deckschichten) und bei entsprechender Dicke eine Biegesteifigkeit (dicke Deckschichten).
Funktionsverbundgläser	Verbundgläser mit einer Funktionszwischen­schicht.
Funktionszwischen­schicht	Zwischen­schicht, in der Regel mehrlagig, mit einer oder mehreren Funktions­folien und Verbund­folien.
Glashalterung	Halterung der Glasscheibe als Linienlagerung oder Punkthalterung
Gebäudehülle	Gebäudeabschluss, Abgrenzung zwischen Innen- und Außenklima.
HOE	Holographisch-optische Elemente. Großformatige Hologramme in denen eine Linse abgebildet wird und die eine Lichtlenkung ermöglichen.
Kernschicht	Zwischen­schicht
Klebfläche	Verklebte Oberfläche des Bauteils
Klebfuge	Zwischenraum zwischen den Klebflächen
Klebschicht	Abgebundener Klebstoff in der Klebfuge
Klebung	Verbindung zweier Bauteile mittels Klebstoff (Klebverbindung).
Lamelle	Glaselemente, in der Regel drehbar (nachführbar entsprechend Sonnenstand), die vor der Gebäudehülle angeordnet sind.
Lamellenlagerung	Befestigung der Lamelle in der Unter­konstruktion.
Sandwich	Verbundquerschnitt mit zwei Deckschichten und einer Zwischen­schicht (Kernschicht), die schub- und zugfest miteinander verbunden sind. Die Biegesteifigkeit des Schubquerschnitts ergibt sich aus den Steiner Anteilen der Deckschichten unter Berücksichtigung der Schubsteifigkeit der Zwischen­schicht und zusätzlich, bei dicken Deckschichten, aus den Einzel­trägheitsmomenten der Deckschichten.
Verbundglas	Mindestens zwei Glasscheiben, die durch beliebige Verbund­schichten (z.B. EVA, Gießharz) miteinander verklebt sind.

Verbund-Sicherheitsglas	Mindestens zwei Glasscheiben, die durch PVB-Folien miteinander verklebt sind.
Zwischenschicht	Die Verbundschicht zwischen den beiden Deckschichten. Sie ist gekennzeichnet durch eine Schubsteifigkeit und eine vernachlässigbare Biegesteifigkeit (hier: Verbund- und Funktionsfolien).
Zwischenschicht, einlagig	Zwischenschicht, die nur aus einem Material besteht (hier: PVB-Folie im VSG).
Zwischenschicht, mehrlagig	Zwischenschicht, die aus mehreren Folien <u>unterschiedlichen</u> Materials besteht (hier: Verbund- und Funktionsfolien).

Verzeichnis der Abbildungen

Bild 1:	Elektrochrome Gläser	2
Bild 2:	Holographisch-optische Elemente (HOE), a) Universität Bremen (Lichtlenkung im Dach), b) Universität Dortmund (Sonnenschutz-Lamellen)	3
Bild 3:	Hauptbahnhof Berlin, PV-Verglasung der Bahnsteighalle.....	4
Bild 4:	Sparkasse Graben-Neudorf, Nachführbare PV-Lamellen.....	4
Bild 5:	Photovoltaik-Zellen a) monokristallin, b) polykristallin, c) amorphe Dünnschichtzelle, d) CIS-Dünnschichtzelle	5
Bild 6:	Semitransparente Dünnschichtmodule (Umwelt-Campus Birkenfeld).....	5
Bild 7:	LEDs in Treppenstufen; LC-Display in Fassade (EXPO 2000); HOE-Display.....	6
Bild 8:	Aufbau von Verbundgläsern mit mehrlagigen Funktionsschichten	9
Bild 9:	Elektrochrome Schicht, a) Aufbau (schematisch), b) Funktionsprinzip	10
Bild 10:	LC-Schicht - Aufbau (schematisch)	11
Bild 11:	PV-Schicht - Aufbau (schematisch)	12
Bild 12:	LED-Schicht - Aufbau (schematisch)	12
Bild 13:	Holographisch-optische Elemente (HOE), a) Belichtungselement, b) transparentes Verschattungssystem [Müller et al. 1997].....	13
Bild 14:	HOE-Schicht - Aufbau (schematisch)	14
Bild 15:	Anwendungsmöglichkeiten von HOE.....	15
Bild 16:	Befestigungspunkte für horizontale Lamellen.....	16
Bild 17:	Befestigungspunkte für vertikale Lamellen	17
Bild 18:	Einwirkungen aus Wind oder Schnee bei Fassaden- oder Dachlamellen	19
Bild 19:	Winddruck für Außenwand luvwärts	21
Bild 20:	Schneelasten für Flachdächer.....	22
Bild 21:	Schubmodul in Abhängigkeit der Temperatur bei PVB	28
Bild 22:	Linienlagerung.....	31
Bild 23:	Punkthalter mit unterseitigen oder beidseitigem Teller [SGG].....	32
Bild 24:	Hinterschnitt-Anker [Fischer 2001]	33
Bild 25:	Prinzip nachführbare Lamellen	35
Bild 26:	Konstruktionstypen für Einzellamellen in starrer und nachführbarer Ausführung	36
Bild 27:	Nachführbare Lamelle mit Linienlagerung des Glases	37
Bild 28:	Gelenkige Auflager von nachführbaren Lamellen.....	37
Bild 29:	Beanspruchung in der Glashalterung bei eingespannten Gläsern	38
Bild 30:	Punkthalter mit und ohne Gelenk [SGG].....	39
Bild 31:	Einwirkungen und Beanspruchungen	40
Bild 32:	Lamellen mit Verbindungsrohr und Linien- oder Punktlagerung	40
Bild 33:	Lamelle mit Verbindungsrohr und mehrfacher Halterung am Glaslängsrand.....	41
Bild 34:	Aufnehmbare Windlast für Fassadenlamelle mit senkrechter Glasebene	42

Bild 35:	Glasdicken für Fassaden-Lamellen unter Winddruck mit liniengelagertem Glas (SPG) und senkrechter Glasebene	43
Bild 36:	Aufnehmbare Schneelast für Dachlamellen mit waagerechter Glasebene.....	44
Bild 37:	Glasdicken für Dach-Lamellen unter Schnee	44
Bild 38:	Schlankheiten für Fassaden- und Dachlamellen.....	45
Bild 39:	Aufnehmbare Wind-/ Schneelasten bei nachführbaren Lamellen.....	46
Bild 40:	Beanspruchungen in Abhängigkeit der Lamellenstellung	47
Bild 41:	Glasdicken (SPG) für Fassaden-Lamelle in Abhängigkeit der Glasflächen-Neigung α	47
Bild 42:	Glasdicken (SPG) für geneigte Fassaden-Lamellen in Abhängigkeit der Stützweite ℓ	48
Bild 43:	Glasdicken (TVG) für geneigte Fassaden-Lamellen in Abhängigkeit der Stützweite L	48
Bild 44:	Lamellengruppen für Fassaden.....	49
Bild 45:	Großformatige Lamellen	50
Bild 46:	Lamellengruppen im Dachbereich	51
Bild 47:	Hohlkammer-Lamelle.....	52
Bild 48:	Lamelle mit T-Querschnitt.....	53
Bild 49:	Lamellen mit gekrümmten Gläsern	54
Bild 50:	Trägheitsmoment von Lamellen mit ebenen und gekrümmten Gläsern.....	54
Bild 51:	Rheologische Grundkörper: Feder-Element und Dämpfer-Element	56
Bild 52:	Maxwell-Element.....	56
Bild 53:	Kelvin-Voigt-Element	57
Bild 54:	Burgers-Element	57
Bild 55:	Schubmodul nach Schuler (schwarz) Kutterer (grau)	60
Bild 56:	Böengeschwindigkeit und Außenlufttemperatur für Aachen, Anzahl der Tagesextremwerte [Wellershoff 2007]	61
Bild 57:	Bezogene Böenwindlast und Außenlufttemperatur für Deutschland, Anzahl der Tagesextremwerte [Wellershoff 2007]	61
Bild 58:	Korrelation Böengeschwindigkeit und Differenztemperatur, am Beispiel Schwarzemailglas [Wellershoff 2007].....	62
Bild 59:	Bezogene Böenwindlast und Zwischenschichttemperatur für Deutschland, Anzahl der Tagesextremwerte [Wellershoff 2007]	63
Bild 60:	Windlast-Temperatur-Zeitverläufe zur VG-Bemessung in Deutschland [Wellershoff 2007] ...	64
Bild 61:	Scher-Test – Versuchskörper und Verzerrungsermittlung	67
Bild 62:	Scher-Test – Probekörper mit Instrumentierung und Klimaschrank	68
Bild 63:	Scher-Test – Sollkurve für die Versuchssteuerung	68
Bild 64:	Scher-Test (HOE) Spannungs-Verzerrungs-Diagramme für $T = 0 / 20 / 40 / 60$ °C	70
Bild 65:	Scher-Test (PVB) Spannungs-Verzerrungs-Diagramme für $T = 0 / 20 / 40 / 60$ °C.....	70
Bild 66:	Max. Schubspannung mit zugehöriger Verzerrung	71
Bild 67:	Einfluss der Verzerrungsgeschwindigkeit (max. Schubspannung und Verzerrung)	72
Bild 68:	Max. Schubspannung bei unterschiedlicher Belastungskurve	72
Bild 69:	Schubverzerrungen und -spannungen bei Be- und Entlastung	73
Bild 70:	Spannungs-Verzerrungs-Diagramm mit Versuchs- und Funktionsdaten [Wrede 2003]	74

Bild 71: Liniengelagerte Lamelle.....	74
Bild 72: Maximale Verzerrung für Fassaden- und Dachlamellen mit Zwischenschicht $t_z = 1$ mm	76
Bild 73: Maximale Schubspannung bei Zwischenschicht $t_z = 1$ mm.....	77
Bild 74: Spannungs-Verzerrungs-Diagramme von HOE und PVB für $T = 0...60$ °C, a) gesamter Messbereich, b) Ausschnitt des baupraktisch relevanten Bereichs	77
Bild 75: Spannungs-Verzerrungs-Diagramm für HOE bei versch. Temperaturen und Verzerrungsgeschwindigkeiten	78
Bild 76: Glas-Probekörper für Biegeversuche	82
Bild 77: Auflagerung für starre Lamellen, a) Linienlager, b) gesenkte Punkthalter, c) Hinterschnittanker	82
Bild 78: Auflager-Element für nachführbare Lamellen mit liniengelagertem Verbundglas	83
Bild 79: Auflager-Element für nachführbare Lamellen mit gesenktem Punkthaltern	83
Bild 80: Auflager-Element für nachführbare Lamellen mit Hinterschnitt-Ankern.....	84
Bild 81: Vier-Punkt-Biegeversuch (Prinzipskizze)	84
Bild 82: Belastungsgeschichte	85
Bild 83: Messeinrichtungen	86
Bild 84: Einbaulagen für punktgehaltene Gläser – a) Winddruck/Schnee b) Windsog.....	86
Bild 85: Lastresultierende P und Flächenlast q für 4-Punkt-Biegeversuch.....	87
Bild 86: Kraft-Verformungs-Diagramme für liniengelagerte HOE-Verbundgläser ($L = 1335$ mm), a) $t = 6/6$ mm, b) $t = 10/10$ mm	88
Bild 87: Bruchlasten F_u für liniengelagerte HOE-Gläser mit unterschiedlichen Glasdicken	89
Bild 88: Bruchbild für liniengelagerte HOE-Gläser.....	89
Bild 89: Einfluss der Kantenbearbeitung.....	90
Bild 90: Durchbiegungen bei verschiedenen Zwischenschichten für Lamellen mit liniengelagerten Verbundgläsern (HOE - schwarz, PVB - grau)	91
Bild 91: Kraft-Verformungs-Diagramme für liniengelagerte HOE-Verbundgläser ($t_1/t_2 = 10/10$ mm), a) starr gelagerte Lamellen, b) nachführbar gelagerte Lamellen	92
Bild 92: Bruchkräfte für liniengelagerte HOE-Gläser in starren sowie nachführbaren Lamellen.....	92
Bild 93: Kraft-Verformungs-Diagramme für starre Lamellen mit punktgelagerten Verbundgläsern, a) gesenkte Tellerhalter (Glas: 8/8 mm) b) Hinterschnittanker (Glas: 8/10 mm).....	93
Bild 94: Kraft-Verformungs-Diagramm für nachführbare Lamellen mit punktgelagerten Gläsern (gesenkte Tellerhalter mit 8/8 mm Glasdicke).....	94
Bild 95: Kraft-Verformungs-Diagramm für starre Lamellen mit punktgelagerten Gläsern, a) gesenkte Tellerhalter (Glas: 8/8 mm) b) Hinterschnittanker (Glas: 8/10 mm).....	95
Bild 96: Versuchsaufbau Resttragfähigkeitsversuche	96
Bild 97: Resttragfähigkeit - Vergleich der Zwischenschichten, a) HOE, b) PVB	97
Bild 98: Splitterbindung - Vergleich der Zwischenschichten, a) HOE, b) PVB.....	97
Bild 99: Momentenaufteilung	98
Bild 100: Querschnittbezeichnung	98
Bild 101: Verzerrungen am geschichteten Querschnitt	100
Bild 102: Verhältnis Ersatzbiegesteifigkeit zu Biegesteifigkeit B_s	103
Bild 103: Verhältnis Biegesteifigkeit der Deckschichten zu Gesamtbiegesteifigkeit.....	104

Bild 104: Normalspannungen am Verbundquerschnitt bei verschiedenen Schubmoduln	105
Bild 105: Plattengeometrie.....	106
Bild 106: FE-Rechenmodell mit Belastung	106
Bild 107: Lamelle 1350 × 400 × 6/6 mm Durchbiegung und Normalspannung	107
Bild 108: Lamelle 1350 × 400 × 10/10 mm Durchbiegung und Normalspannung	107
Bild 109: Schubmodul $G(u)$ für Lamellen 1350×400×6/6 mit HOE oder PVB Zwischenschicht	108
Bild 110: Schubmodul $G(u)$ für Lamelle 1350×400×10/10 mit HOE-Zwischenschicht.....	109
Bild 111: Geometrie 2664 × 370 × 6/6 mm.....	109
Bild 112: Schubmodul $G(u)$ für Lamelle 2664×370×6/6 mit HOE-Zwischenschicht	110
Bild 113: 1350×400×6/6mm - $G = 4,0 \text{ N/mm}^2$ - Versuchs- und FE-Ergebnisse - a) $F(u)$, b) $\sigma(u)$	110
Bild 114: 1350×400×10/10mm - $G = 4,0 \text{ N/mm}^2$ - Versuchs- und FE-Ergebnisse - a) $F(u)$, b) $\sigma(u)$.	111
Bild 115: 2664×370×6/6mm - $G = 4,0 \text{ N/mm}^2$ - Versuchs- und FE-Ergebnisse - a) $F(u)$, b) $\sigma(u)$	111
Bild 116: Funktionsprinzip für konzentrierende Lamellen mit PV	113
Bild 117: Gebogene Lamelle - $L \times B \times t_1/t_2 = 3750 \times 600 \times 6/6 \text{ mm}$, $R \times \alpha = 600 \times 60^\circ$	113
Bild 118: Prototyp-Anlage mit gebogenen Lamellen, a) Außenansicht, b) Innenansicht.....	114
Bild 119: Versuchstand, a) Lamelle komplett mit Stahlkonstruktion, b) nur gebogene VG-Scheibe...	114
Bild 120: $F(u)$ -Diagramm für Lamelle mit gebogenem Glas	115
Bild 121: Rissbild mit Rissursprung am Scheibenrand	116
Bild 122: FE-Modell ohne/ mit Glashalterung	116
Bild 123: Querschnitt.....	117
Bild 124: Gebogenen Lamellen - $L \times B \times t_1/t_2 = 3750 \times 600 \times 6/6 \text{ mm}$, $R = 600$, $\alpha = 60^\circ$ (Aufsicht), a) Hauptmembrankräfte, b) Hauptmomente	117
Bild 125: Lamelle 3750×600×6/6 mm $R = 600$, $\alpha = 60^\circ$ (Schnitt bei $l/2$).....	118
Bild 126: Untersuchte Querschnittsgeometrien	119
Bild 127: Gebogene Lamellen, a) Längsnormalspannungen, b) bezogene Durchbiegungen (jeweils in Feldmitte)	119
Bild 128: Gebogene Lamellen - Ergebnisse bezogen auf die Schlankheit (H/L), a) Längsnormalspannungen, b) bezogene Durchbiegungen (jeweils in Feldmitte)	120
Bild 129: Gebogene Lamellen - Spannungen infolge m_T (Feldmitte), a) $\sigma_m(R)$, b) $\sigma_m(H/L)$	120
Bild 130: Querschnittswerte	121
Bild 131: Stabmodell	122
Bild 132: T-Lamelle, Aufteilung des Biegemoments	128
Bild 133: T-Lamelle, Geometrie	129
Bild 134: T-Lamelle, Versuchsaufbau	129
Bild 135: T-Lamelle, Be-/ Entlastungsphasen (1. Versuch)	130
Bild 136: T-Lamelle, Kraft-Verformungs-Diagramm (1. Versuch)	130
Bild 137: T-Lamelle, Kraft-Durchbiegungs-Diagramm (2. Versuch)	131
Bild 138: T-Lamelle, Kraft-Durchbiegungs-Diagramm (Vergleich).....	132
Bild 139: T-Lamelle, Normalspannungen oben und unten in Feldmitte, a) Glasflansch, b) Stahlsteg.	133
Bild 140: T-Lamelle, Querschnittsstellung und Lastabtrag	133
Bild 141: T-Lamelle, Querschnittsbezeichnungen	134

Bild 142: Stabwerkmodell.....	135
Bild 143: T-Lamelle, Element des Stabwerkmodells.....	135
Bild 144: Stabwerkmodell, Gegenrechnung Vier-Punkt-Biegeversuch, a) Lasten und Auflagerreaktionen, b) Durchbiegungen.....	137
Bild 145: Einfluss Klebschichtdicke (Silicon-Klebung).....	138

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Eigenschaften von Glas [DIN EN 572]	23
Tabelle 2:	Charakteristische Biegezugfestigkeiten verschiedener Glasarten.....	25
Tabelle 3:	Materialdaten PVB-Verbundfolie	29
Tabelle 4:	Materialdaten EVA-Verbundfolie.....	30
Tabelle 5:	Materialdaten HOE-Träger	31
Tabelle 6:	Schlankheiten für Fassaden- und Dachlamellen	45
Tabelle 7:	Konstruktionen für Biegeversuche	81
Tabelle 8:	Wesentliche Daten der Glasprobekörper	81
Tabelle 9:	Lastbildspezifischer Faktor k_L für Auswertungen an der Stelle ($x = l/2$).....	102
Tabelle 10:	Polymerarten [DIN 7724]	124
Tabelle 11:	Exemplarische Materialdaten Silikonkautschuk [ETA-01/005].....	126
Tabelle 12:	Gegenüberstellung Versuchs- und Rechenergebnisse für $F = 3$ kN.....	137

Lebenslauf

Person

Name: Thomas Topp
Wohnort: Fleyer Straße 227c, 58097 Hagen
Geburtsdatum, -ort: 15. Januar 1965, Hagen/ Westf.
Familienstand: verheiratet, zwei Kinder
Staatsangehörigkeit: Deutsch

Ausbildung/ Qualifikation

1971-1975 Karl-Ernst-Osthaus-Grundschule, Hagen
1975-1984 Theodor-Heuss-Gymnasium, Hagen
1984-1990 Universität Dortmund, Fakultät Bauwesen
Studiengang Bauingenieurwesen, Konstruktiver Ingenieurbau
1999 Staatlich anerkannter Sachverständiger für Schall- und Wärmeschutz

Tätigkeiten

06/1990 - 05/1993 Failure Analysis Associates B.V., Düsseldorf
- Tragwerksplanung im Hoch- und Industriebau
- Feuerfestbau
- Software-Entwicklung
- Schadensgutachten
05/1993 - 07/1995 Ingenieurbüro Perlick, Ennepetal
- Tragwerksplanung
08/1995 - 09/1998 Ingenieurbüro Müller Marl GmbH, Marl
- Projektleiter Tragwerksplanung
10/1998 - 02/2008 Lehrstuhl Tragkonstruktionen, Universität Dortmund
- Wissenschaftlicher Angestellter
seit 03/2008 Ingenieurbüro Müller Marl GmbH, Marl
- Prokurist

