

Belastung des tragenden
Randverbundes von Isolierglas bei
Structural Glazing durch klimatische
Einflüsse

T 2694

T 2694

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

1999

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Fenster
Türen
Fassaden
Werkstoffe
Zubehör



Belastung des tragenden Randverbundes von Isolierglas bei Structural Glazing durch klimatische Einflüsse

Kurztitel:

Klimabelastung von Isolierglas bei Structural Glazing

März 1995

Auftraggeber:

Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
Az.: IV 1-5-753/94

Forschende Stelle:

i.f.t. Rosenheim
Institut für Fenstertechnik e.V.
Theodor-Gietl-Straße 7-9
83026 Rosenheim

Sachbearbeiter:

Prof. Dr. F. Feldmeier

Kurzfassung

Structural Glazing ist eine neue Fassaden-Bauart, bei der die Glasscheiben nicht mehr wie bisher mechanisch gehalten, sondern verklebt werden. Die Klebefuge muß daher die Lasten aufnehmen und entsprechend bemessen werden. Wird Isolierglas angeklebt und der Isolierglasrandverbund zur Lastabtragung herangezogen, so gilt dies auch für die Verklebung des Randverbundes.

Bei Isolierglas führt eine Änderung der Temperatur oder eine Änderung des äußeren Luftdruckes zu einer Druckdifferenz zwischen dem Scheibenzwischenraum und der Umgebung. Diese klimatisch bedingte Belastung führt zu einer zusätzlichen wesentlichen Beanspruchung der Verklebung. Andererseits führt das im Scheibenzwischenraum von Isolierglas eingeschlossene Gasvolumen zu einer mechanischen Kopplung der beiden Glasscheiben und reduziert damit die Beanspruchung bei Windbelastung.

Das elastische Verhalten des Isolierglasrandes wird durch zwei Kenngrößen charakterisiert und die bisherige Theorie entsprechend erweitert. Damit können beide Effekte aufbauend auf der linearen Plattentheorie geschlossen abgeleitet werden. Es zeigt sich, daß die resultierenden Gleichungen mit ausreichender Genauigkeit durch wesentlich einfachere Ausdrücke angenähert werden können.

Die Kenngrößen wurden an Proben typischer Randverbundsysteme experimentell ermittelt. Es zeigt sich, daß durch die Randelastizität letztlich nur eine geringe Abminderung der klimatischen Belastung stattfindet.

Die Klimabelastung beansprucht gerade *kleine* Scheiben am stärksten, während die mittragende Wirkung erst bei großen Isolierglasscheiben zum Tragen kommt. Die Ergebnisse des theoretischen Modells wurden deshalb an einer kleinen Scheibe im Bauteilversuch überprüft. Es ergibt sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung.

Damit kann die klimatische Beanspruchung und die mittragende Wirkung mit einem gesicherten Verfahren einfach berechnet werden. Gerade bei Structural Glazing sollte das Verhalten von Isolierglas bei der Bemessung der Randverbundverklebung berücksichtigt werden.

Summary

Structural Glazing is a new technology for the construction of facades where the glazing is just glued and not fixed mechanically as it was up to now. Thus, the seal now works as a structural seal and must be dimensioned correspondingly. Using insulating glass this may also be valid for the hermetic seal if this bonding is designed to carry loads.

In case of insulating glass the air or gas volume is confined between the glass panes. A change of temperature or of the external air pressure results in a pressure difference between the pane space and the ambient climate. This load caused by climatic changes leads to important additional stresses on the hermetic seal. On the other hand, the gaseous volume confined in the pane space leads to a linkage of both panes and thus to load sharing, this will reduce the stresses caused by wind loads.

The elasticity of the hermetic seal is defined by two characteristic values and the theory based on the linear theory of plates was extended to include this effect. It is shown that the resulting complex equations can be approximated to rather simple expressions with excellent precision.

The characteristic elastic data of the hermetic seal were determined by experiments at test specimens with typical bonding systems. It is shown that the elasticity of the bonding area has only little influence on the reduction of climatic loads.

Especially *small pane sizes* are stressed by climatic loads, whereas the load sharing effect can only be used for big dimensions of panes. Thus, the theoretical model was verified in an experiment using a small pane size. The experimental results are in an excellent agreement.

The climatic loads and the load sharing effect of the insulating glass unit are well understood now. The calculation method is easy to apply and verified by experiment. Dealing with the hermetic seal of insulating glass used as a structural seal the climatic loads and the load sharing effect shall be considered. This results in a more precise design procedure for the hermetic seal of an insulating glazing unit working as a structural seal.

Inhalt

1	Problemstellung	Kapitel 1 Seite 1
2	Grundlagen	Kapitel 2 Seite 1
2.1	Isolierglas	1
2.2	Luftdruck	1
2.2.1	Definition	1
2.2.2	Ortshöhe	2
2.2.3	Meteorologische Änderung	3
2.3	Temperatur	3
2.4	Wind und andere äußere Flächenlasten	3
3	Lineare Plattentheorie	Kapitel 3 Seite 1
3.1	Randbedingungen und Gültigkeit	1
3.2	Lösung der Plattengleichung	1
3.3	Durchbiegung	3
3.4	Volumenänderung	4
3.5	Randwinkel und Randverkürzung	4
3.6	Biegezugspannung	5
3.7	Lagerkräfte	6
3.8	Beiwerte	7
4	Kennwerte des statischen Systems Isolierglas	Kapitel 4 Seite 1
4.1	Die Scheibe	1
4.1.1	Plattensteifigkeit	1
4.1.2	Die charakteristische Kantenlänge	2
4.2	Der Randverbund	4
4.2.1	Verformungsverhalten	4
4.2.2	Zugsteifigkeit	5
4.2.3	Drehsteifigkeit	10
4.3	Das Gesamtsystem	12
4.3.1	Statische Randbedingungen	12
4.3.2	Nachgiebigkeit	14
5	Der Druck im Scheibenzwischenraum	Kapitel 5 Seite 1
5.1	Die äußeren Flächenlasten	1

5.2	Klimaeinwirkung	2
5.3	Der isochore Druck	4
5.4	Gleichgewichtsbedingung	4
5.5	Die Druckdifferenz	7
6	Experimentelle Verifizierung	Kapitel 6 Seite 1
7	Anwendung	Kapitel 7 Seite 1
7.1	Die resultierende Gesamtlast	1
7.2	Der Einwirkungsgrad	2
7.3	Die Spannung in der Klebefuge	8
7.4	Vereinfachte Darstellung	11
7.4.1	Bemessungsgleichung	11
7.4.2	Die Bemessungslast	12
7.5	Beispiel	15
8	Zusammenfassung	Kapitel 8 Seite 1

Literatur

Anhang

1 Problemstellung

Der aktuelle Entwurf "Draft guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing System" [EOTA94] legt unter anderem die Grundlagenversuche zur Beurteilung des Klebesystems (Sealant) fest und gibt in Anhang 2 "Method of Calculation" die Regel zur Bemessung der Klebefuge. Die Bemessung der Klebefuge erfolgt dabei nach einer einfachen Gleichung, die sich auf ursprünglich amerikanische Erfahrungen mit dem Verkleben von Einfachglas mit Silikon stützt. Dabei wird angenommen, daß das System nur über die langen Kanten trägt.

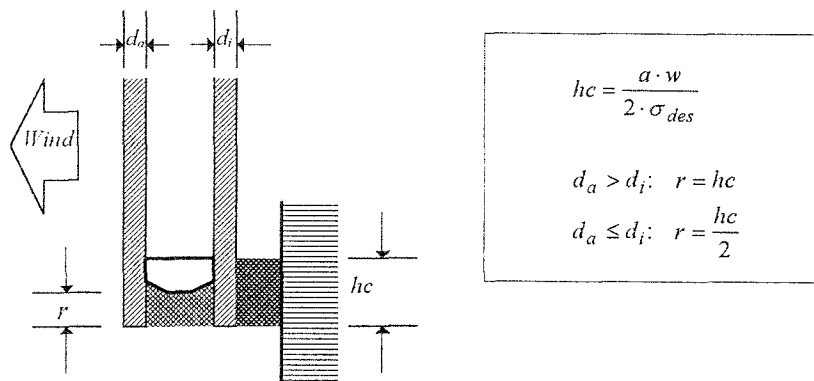


Bild 1.1 Darstellung der Verklebung von Isolierglas an die tragende Grundstruktur. Es ist:

- hc Breite der Klebefuge Glas - tragende Struktur
- r Breite der Klebefuge des Isolierglases
- a kurze Kante der Scheibe
- w Windlast
- σ_{des} zulässige Spannung (design load) des Klebers (sealant)

Dieses Verfahren wird auch zur Bemessung des tragenden Randverbundes von Isolierglas verwendet. Dabei wird unabhängig von der Scheibengröße bei symmetrisch aufgebauten Scheiben die mittragende Wirkung der Innenscheibe voll angesetzt, siehe Formeln in Bild 1.1. Klimatisch induzierte Druckdifferenzen zwischen Scheibenzwischenraum und Umgebung werden dagegen nicht berücksichtigt.

Ziel ist es, die vorhandene Theorie der klimatischen Belastung von Isolierglas den besonderen Gegebenheiten von Structural Glazing anzupassen. Insbesondere sollen die elastischen Eigenschaften des Isolierglasrandverbundes mit einbezogen werden.

Aufbauend auf der erweiterten Theorie soll ein Verfahren zur Berechnung der Klimabeanspruchung und der Lastverteilung bei Windlasten angegeben werden. Dieses Verfahren sollte die Wirklichkeit möglichst genau abbilden, andererseits aber einfach genug sein, um in der Praxis Anwendung zu finden.

2 Grundlagen

2.1 Isolierglas

Zweischeiben-Isolierglas besteht aus zwei parallelen Glasscheiben, die im Randbereich durch einen umlaufenden Abstandhalter und entsprechende Klebstoffe mechanisch stabil und möglichst gasdicht verbunden sind. Das eingeschlossene Luft- bzw. Gasvolumen bestimmt u. a. die thermischen Eigenschaften der Scheibe (k-Wert), bewirkt aber auch eine mechanische Kopplung beider Scheiben und ist Ursache der klimatischen Belastung.

Die klimatische Belastung des Isolierglases entsteht einerseits durch die thermische Ausdehnung des im Scheibenzwischenraum eingeschlossenen Gases bei Temperaturänderung, andererseits durch eine Änderung des äußeren Luftdruckes. Beide Effekte führen zu einer Druckdifferenz zwischen dem Gas im Scheibenzwischenraum und der Außenatmosphäre und damit zu einer flächigen Belastung der Scheiben.

Die absolute Größe der klimatisch bedingten Druckdifferenz kann mit mehreren kN/m^2 übliche Windlasten ganz erheblich übersteigen. Die Größe dieser Belastung mag im ersten Augenblick überraschen, sie wird aber verständlich, wenn man den normalen Luftdruck von ca. 1 bar oder 1013 hPa in die übliche Windlasteinheit umrechnet:

$$1013 \text{ hPa} = 101 \text{ kN/m}^2.$$

Allerdings besteht ein wichtiger Unterschied zur Windlast: während Windlasten unabhängig von der Verformung der Scheibe sind, werden Druckunterschiede zwischen Scheibenzwischenraum und außen durch die Verformung der Scheiben gemildert oder weitestgehend abgebaut. Die am Ende verbleibende klimatische Belastung hängt vom Aufbau der Isolierglasscheibe und der Steifigkeit der Einzelscheiben ab.

2.2 Luftdruck

2.2.1 Definition

Der Luftdruck resultiert aus dem Gewicht der Lufthülle (Schweredruck) und hängt von der Luftdichte und der Höhe der Luftsäule ab. Die Höhe der Luft-

säule hängt von der Höhe der Atmosphäre (meteorologische Hoch- und Tiefdruckgebiete) und der Ortshöhe ab. Die übliche Einheit für den Luftdruck ist das Hektopascal (hPa). Es gilt:

$$1 \text{ hPa} = 0,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,1 \text{ kPa}$$

In der Meteorologie (z. B. Wetterkarten) wird der Luftdruck immer auf Meereshöhe bezogen angegeben. Der mittlere Luftdruck oder Normaldruck bezogen auf Meereshöhe beträgt:

$$760 \text{ mmHg} = 1013 \text{ hPa} = 101,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Da die Bezeichnung „barometrischer Druck“ nicht eindeutig ist, werden zur klaren Unterscheidung folgende Bezeichnungen verwendet:

meteorologischer Druck: Luftdruck bezogen auf Meereshöhe
 atmosphärischer Druck: Luftdruck bezogen auf Ortshöhe

2.2.2 Ortshöhe

Der Luftdruck hängt von der geographischen Höhe eines Orts ab. Auf Meereshöhe beträgt der Luftdruck im Mittel 1013 hPa (Normaldruck). Mit zunehmender Höhe nimmt der Druck ab. Bis in eine Höhe von 11 km gilt die internationale Höhenformel, welche auch die Temperaturabnahme mit zunehmender Höhe berücksichtigt:

$$p(h) = 1013 \text{ hPa} \cdot \left(1 - \frac{h}{44,3 \text{ km}}\right)^{5,255}$$

Diese Gleichung kann abschnittsweise linearisiert werden. Für Höhen bis 1000 m ergibt sich pro 100 m Höhe eine Druckabnahme von 12,0 hPa, so daß sich eine Änderung der Ortshöhe nach folgender Gleichung in eine Druckänderung umrechnen läßt:

$$\Delta p = 0,012 \frac{\text{kPa}}{\text{m}} \cdot \Delta h$$

2.2.3 Meteorologische Änderung

Neben der Ortshöhe hängt der Luftdruck auch von der Wetterlage ab. In Europa können Hochdruckgebiete etwa 1050 hPa, Tiefdruckgebiete 950 hPa erreichen. Für die Änderung relativ zum Normaldruck gilt daher:

$$\Delta p(\text{Hoch}) = +4,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}; \quad \Delta p(\text{Tief}) = -6,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Meteorologische Druckangaben werden dabei immer auf Meereshöhe bezogen und übliche Barometer immer auf Meereshöhe kalibriert. Bei der Ermittlung des atmosphärischen Luftdrucks muß deshalb die Ortshöhe berücksichtigt werden.

2.3 Temperatur

Wie alle Stoffe ändern auch Gase mit der Temperatur ihr Volumen. Da Gase aber wesentlich leichter komprimierbar sind, ist es notwendig, neben der Temperatur auch den Druck des Gases zu berücksichtigen. Für alle bei Isolierglas möglichen Füllgase, auch für Luft, gilt die *Zustandsgleichung idealer Gase*:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const}$$

Hierin bedeutet p der Druck in Pa, V das Volumen in m^3 und T die absolute Temperatur in K. Nimmt man das Volumen des Scheibenzwischenraumes als konstant an, so ergibt sich mit zunehmender Temperatur auch ein zunehmender Druck. Es gilt das *Gay-Lussac'sche Gesetz*, welches sich hier am bequemsten in folgender Form schreibt:

$$\Delta p = 0,34 \frac{\text{kPa}}{\text{K}} \cdot \Delta T$$

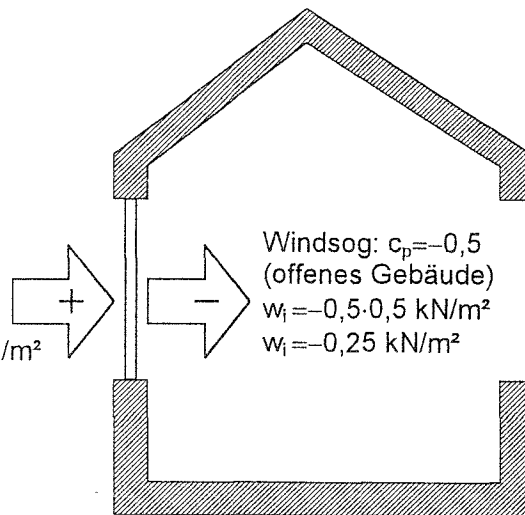
2.4 Wind und andere äußere Flächenlasten

Für vertikale Verglasungen stellt die Winddruck- bzw. Windsogbelastung im allgemeinen die Hauptbeanspruchung dar. Bei der Bemessung der Glasdicke von Isolierglas werden die Lastannahmen nach DIN 1055 „Lastannahmen für Bauten“ zugrunde gelegt, insbesondere die Windlasten nach Teil 4. Abhän-

gig von der Gebäudehöhe wird ein Staudruck von $0,5 \text{ kN/m}^2$ bis zu $1,3 \text{ kN/m}^2$ angenommen. Die Druckbeiwerte hängen von der Gebäudeform und Lage ab und liegen für vertikale Wände zwischen $+0,8$ und $-2,0$ (Sog im Randbereich). Für Teilflächen, wie sie Verglasungen im allgemeinen darstellen, sind die Winddrucklasten noch um 25% zu erhöhen. Bild 2.1 erläutert die Vorzeichen der Windlast an einem einfachen Beispiel. Andere Flächenlasten, z. B. Schnee bei geneigten Verglasungen, können unter Berücksichtigung eventueller Beiwerte analog der Windlast behandelt werden.

Staudruck bis 8 m
Gebäudehöhe
 $q = 0,5 \text{ kN/m}^2$

Winddruck: $c_p = +0,8$
Teilfläche: $+25\%$
 $w_a = +0,8 \cdot 1,25 \cdot 0,5 \text{ kN/m}^2$
 $w_a = +0,50 \text{ kN/m}^2$



Windsog: $c_p = -0,5$
(offenes Gebäude)
 $w_i = -0,5 \cdot 0,5 \text{ kN/m}^2$
 $w_i = -0,25 \text{ kN/m}^2$

Bild 2.1 Beispiel der Windbelastung. Bei Isolierglas muß zwischen äußerer und innerer Belastung unterschieden werden.

3 Lineare Plattentheorie

3.1 Randbedingungen und Gültigkeit

Die Belastung durch Winddruck bzw. Windsog bzw. durch eine klimatisch bedingte Druckdifferenz zwischen dem Scheibenzwischenraum (SZR) und der Umgebung bildet in jedem Fall eine flächige Belastung senkrecht zur Ebene der Glasscheiben.

Solange die Verformung die Dicke der Glasscheiben nicht überschreitet, liefert die klassische lineare Theorie der *Kirchhoff*-Platte [Girk] ausreichend genaue Resultate. Dies gilt in aller Regel für bei Klimabeanspruchung auftretender Durchbiegung und ganz allgemein bei kleinen Scheibenformaten. Im vorliegenden Bericht wird vorrangig die klimatische Belastung untersucht, so daß eine genauere Beschreibung der Platte bei großer Durchbiegung nicht notwendig erscheint, zumal die lineare Plattentheorie eher zu hohe Werte für die Verformungen und die Spannungen ergibt. Desweiteren erlaubt die lineare Theorie eine geschlossene Darstellung, so daß sich schließlich relativ einfache Bemessungsgleichungen ergeben.

Bei der Überlagerung von Klima- und Windlasten bei großen Scheiben und großer Durchbiegung wird allerdings eine genauere Beschreibung unumgänglich. Zur Abgrenzung der Gültigkeit wird deshalb in einem gesonderten Kapitel auf das Verhalten dünner Platten bei großer Durchbiegung eingegangen.

3.2 Lösung der Plattengleichung

Sind die Auflager unnachgiebig ($z=0$), aber momentenfrei, so reduziert sich das Problem auf die Lösung der Differentialgleichung für die Biegefläche $w(x,y)$ bei vorgegebener konstanter Flächenlast p mit den Randbedingungen $w=0$ und $\Delta w=0$ (Bild 3.1):

$$K \cdot \Delta \Delta w = p \qquad \text{Gl. 3.1}$$

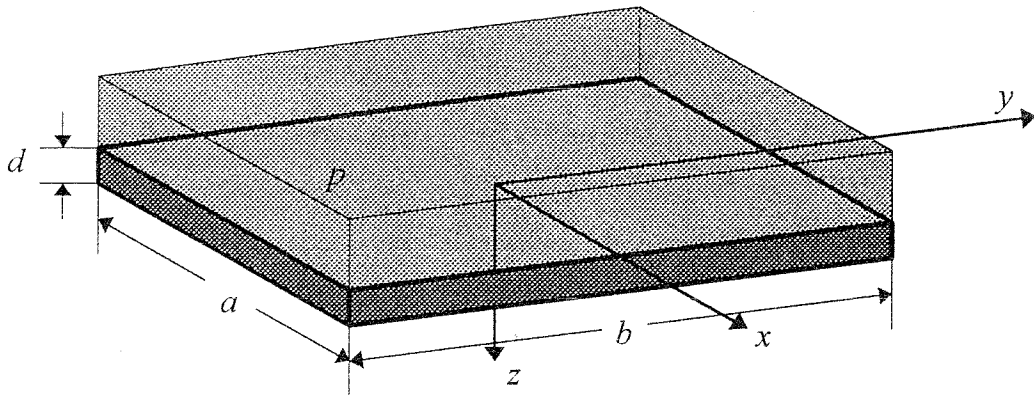


Bild 3.1 Bezeichnung der Abmessungen der Platte und Lage des Koordinatensystems.

a	kurze Kante	d	Dicke der Platte
b	lange Kante	p	Flächenlast

Die Plattensteifigkeit K berechnet sich aus der Dicke der Glasscheibe und den elastischen Konstanten des Glases ($E=70000 \text{ N/mm}^2$; $\mu=0,22$):

$$K = \frac{Ed^3}{12(1-\mu^2)} \quad \text{Gl. 3.2}$$

Zur Lösung der Plattengleichung kann die Biegefläche als *Navier'sche* Doppelreihe dargestellt werden. Die folgende Entwicklung zeigt aber eine deutlich bessere Konvergenz (der Koordinatenursprung liegt in Plattenmitte):

$$w(x, y) = \frac{pa^4}{K} \frac{4}{\pi^5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^5} \sin \frac{n\pi}{2} \cos \alpha_n x \left\{ 1 - \frac{1}{2 \cosh \gamma_n} \left((2 + \gamma_n \tanh \gamma_n) \cosh \alpha_n y - \alpha_n y \sinh \alpha_n y \right) \right\}$$

Dabei bedeutet:

a	Länge der kurzen Kante
b	Länge der langen Kante
$e=a/b$	das Seitenverhältnis kleiner gleich 1

und α_n und γ_n folgende Abkürzungen

$$\alpha_n = n\pi/a$$

$$\gamma_n = \alpha_n b/2 = n\pi/(2e)$$

Aus diesem Ausdruck für die Biegefläche lassen sich dann alle weiteren Größen ableiten. Die dabei auftretenden Summen enthalten für $e=0$ (d. h. im

Grenzübergang für γ_n gegen unendlich) den Plattenstreifen und damit die Balkenlösung. Die verbleibenden Summen werden durch die *Bernoulli'schen* bzw. *Euler'schen* Zahlen B_k bzw. E_k gelöst. Es gilt:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{2k}} \sin^2 \frac{n\pi}{2} = \frac{\pi^{2k} (2^{2k} - 1)}{2 \cdot (2k)!} \cdot B_k \quad \text{und} \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{2k+1}} \sin \frac{n\pi}{2} = \frac{\pi^{2k+1}}{2^{2k+2} \cdot (2k)!} \cdot E_k$$

mit

k	B_k	k	E_k
1	1/6	0	1
2	1/30	1	1
3	1/42	2	5

Durch die Abspaltung der Balkenanteile wird nicht nur das Verhalten der Platte verständlicher, sondern auch das Konvergenzverhalten wird weiter verbessert. Zur Berechnung der Beiwerte sind deshalb nur noch wenige Reihenglieder notwendig. Die resultierenden Beiwerte hängen noch von der Querkontraktionszahl und vom Seitenverhältnis ab. Sie sind für eine Querkontraktionszahl von 0,2 in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

3.3 Durchbiegung

Die maximale Verformung oder Durchbiegung der Scheibe liegt in Scheibenmitte ($x=y=0$). Man erhält

$$w = \frac{pa^4}{K} A_w(e)$$

Gl. 3.3

mit

$$A_w(e) = \frac{4}{\pi^5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^5} \sin \frac{n\pi}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{2 \cosh \gamma_n} (2 + \gamma_n \tanh \gamma_n) \right\}$$

oder besser

$$A_w(e) = \frac{5}{384} - \frac{2}{\pi^5} \sum_{n=1,3,\dots} \pm \frac{2 + \gamma_n \tanh \gamma_n}{n^5 \cosh \gamma_n}$$

3.4 Volumenänderung

Das mit der Verformung verknüpfte Volumen δV erhält man durch Integration der Biegefläche zu:

$$\delta V = \frac{pa^6}{eK} A_V(e) \quad \text{Gl. 3.4}$$

mit

$$A_V(e) = \frac{4}{\pi^6} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^6} \sin^2 \frac{n\pi}{2} \left\{ 2 - 3 \frac{\tanh \gamma_n}{\gamma_n} + \frac{1}{\cosh^2 \gamma_n} \right\}$$

oder besser

$$A_V(e) = \frac{1}{120} - \frac{24e}{\pi^7} \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{n^7} \left\{ \tanh \gamma_n - \frac{\gamma_n}{3 \cosh^2 \gamma_n} \right\}$$

3.5 Randwinkel und Randverkürzung

Der mit der Verformung verknüpfte maximale Randwinkel α und die maximale Verkürzung tritt in der Mitte der langen Kante auf. Dabei wird angenommen, daß die gesamte Verkürzung an einer Seite wirkt (Bild 3.2).

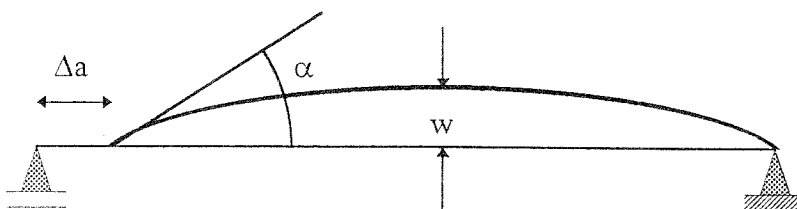


Bild 3.2 Schematische Darstellung der Mittendurchbiegung, des Randwinkels und der Randverkürzung

Man erhält für den Winkel:

$$\alpha = \frac{pa^3}{K} A_\alpha(e) \quad \text{Gl. 3.5}$$

mit

$$A_{\alpha}(e) = \frac{4}{\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} \sin^2 \frac{n\pi}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{2 \cosh \gamma_n} (2 + \gamma_n \tanh \gamma_n) \right\}$$

oder besser

$$A_{\alpha}(e) = \frac{1}{24} - \frac{2}{\pi^4} \sum_{n=1,3,\dots} \frac{2 + \gamma_n \tanh \gamma_n}{n^4 \cosh \gamma_n}$$

und für die Verkürzung:

$$\Delta a = \frac{p^2 a^7}{K^2} A_{\Delta}(e)$$

Gl. 3.6

mit

$$A_{\Delta}(e) = \frac{4}{\pi^8} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^8} \sin^2 \frac{n\pi}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{2 \cosh \gamma_n} (2 + \gamma_n \tanh \gamma_n) \right\}^2$$

Beide Größen stehen in engem Zusammenhang mit der Mittendurchbiegung und lassen sich aus dieser unabhängig vom Seitenverhältnis mit völlig ausreichender Genauigkeit (<1 %) einfach berechnen.

Es gilt für den Randwinkel (im Bogenmaß):

$$\alpha = \frac{w}{a} \cdot \frac{A_{\alpha}(e)}{A_w(e)} = 3,3 \cdot \frac{w}{a}$$

Gl. 3.7

und für die Randverkürzung:

$$\Delta a = \frac{w^2}{a} \cdot \frac{A_{\Delta}(e)}{A_w^2(e)} = 2,5 \cdot \frac{w^2}{a}$$

Gl. 3.8

3.6 Biegezugspannung

Da die kurze Kante parallel zur x-Richtung verläuft, erhält man die maximale Biegespannung in Plattenmitte aus:

$$\sigma = \frac{6}{d^2} \cdot K \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \Bigg|_{x=y=0}$$

oder nach einiger Rechnung:

$$\sigma = \frac{6}{d^2} p a^2 A_m(e) \quad \text{Gl. 3.9}$$

mit

$$A_m(e) = \frac{4}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin \frac{n\pi}{2} \left\{ 1 - \frac{1-\mu}{2 \cosh \gamma_n} \left(\frac{2}{1-\mu} + \gamma_n \tanh \gamma_n \right) \right\}$$

Das Abspalten des langsam konvergierenden Balkenanteils gelingt auch hier und liefert:

$$A_m(e) = \frac{1}{8} - \frac{2}{\pi^3} \sum_{n=1,3,\dots} \pm \frac{2 + (1-\mu)\gamma_n \tanh \gamma_n}{n^3 \cosh \gamma_n}$$

3.7 Lagerkräfte

Die Auflagerkraft (Streckenlast) verteilt sich relativ gleichmäßig über die gesamte Länge der gelagerten Kante mit einem flachen Maximum in Kantenmitte und einem raschen Abfall auf Null zur Ecke. Die hier verwendete klassische Theorie der schubsteifen Platte führt außerdem zu Einzelzugkräften in den Plattenecken.

Es gilt für die größte Streckenlast:

$$q = p a \cdot A_q(e) \quad \text{Gl. 3.10}$$

mit

$$A_q(e) = \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin^2 \frac{n\pi}{2} \left\{ 1 - \frac{1-\mu}{2 \cosh \gamma_n} \left(\frac{2}{1-\mu} - \gamma_n \tanh \gamma_n \right) \right\}$$

oder besser

$$A_q(e) = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1,3,\dots} \frac{2 - (1-\mu)\gamma_n \tanh \gamma_n}{n^2 \cosh \gamma_n}$$

Für die Eckkraft gilt:

$$P = p a^2 \cdot A_p(e) \quad \text{Gl. 3.11}$$

mit

$$A_P(e) = \frac{4}{\pi^3} (1 - \mu) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin^2 \frac{n\pi}{2} \left\{ \frac{\sinh 2\gamma_n - 2\gamma_n}{1 + \cosh 2\gamma_n} \right\}$$

oder besser

$$A_P(e) = \frac{4}{\pi^3} (1 - \mu) \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{n^3} \left\{ \tanh \gamma_n - \frac{\gamma_n}{\cosh^2 \gamma_n} \right\}$$

Zur späteren Diskussion wird außerdem noch die vollständige Gleichung der Randlast entlang der langen Kante angegeben:

$$A_q(e, y) = \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin^2 \frac{n\pi}{2} \left\{ 1 - \frac{1 - \mu}{2 \cosh \gamma_n} \left[\left(\frac{2}{1 - \mu} - \gamma_n \tanh \gamma_n \right) \cosh \alpha_n y + \alpha_n y \sinh \alpha_n y \right] \right\}$$

3.8 Beiwerte

Die folgende Tabelle gibt die zur Berechnung

- der maximalen Durchbiegung,
- des Randwinkels,
- des Volumens,
- der größten Biegespannung,
- von Randlast und Ecklast

einer auf starren Lagern frei drehbar gelagerten Platte notwendigen Beiwerte. Diese Beiwerte sind gültig, solange die Durchbiegung kleiner als die Plattendicke bleibt. Für größere Verformung liegen die Werte für Durchbiegung und Biegespannung auf der „sicheren Seite“, der Wert der Randlast bleibt gültig. Genauere Ergebnisse bei großer Verformung liefert die nichtlineare Theorie.

Tabelle 3.1 Beiwerte zur Berechnung von Durchbiegung A_w , Randwinkel A_α , Volumen A_v , Biegemoment A_m , Randlast A_q und Ecklast A_p in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis e (gültig für Querkontraktionszahl 0,2)

e	A_w	A_α	A_v	A_m	A_q	A_p
1,00	0,00406	0,0135	0,00170	0,0442	0,432	0,074
0,95	0,00449	0,0149	0,00188	0,0483	0,443	0,078
0,90	0,00496	0,0163	0,00208	0,0527	0,453	0,082
0,85	0,00547	0,0179	0,00230	0,0576	0,463	0,085
0,80	0,00603	0,0197	0,00253	0,0628	0,473	0,089
0,75	0,00663	0,0216	0,00279	0,0683	0,482	0,093
0,70	0,00727	0,0236	0,00307	0,0742	0,490	0,096
2:3	0,00772	0,0250	0,00327	0,0783	0,494	0,098
0,65	0,00796	0,0258	0,00338	0,0805	0,497	0,099
0,60	0,00867	0,0280	0,00370	0,0869	0,502	0,102
0,55	0,00940	0,0303	0,00404	0,0934	0,506	0,104
1:2	0,01013	0,0326	0,00440	0,0999	0,509	0,106
0,45	0,01084	0,0348	0,00478	0,1062	0,510	0,107
0,40	0,01150	0,0369	0,00516	0,1119	0,509	0,108
0,35	0,01207	0,0387	0,00555	0,1169	0,507	0,108
1:3	0,01223	0,0392	0,00569	0,1183	0,506	0,108
0,30	0,01252	0,0401	0,00595	0,1208	0,505	0,108
0,25	0,01282	0,0410	0,00635	0,1233	0,502	0,108
0,20	0,01297	0,0415	0,00674	0,1246	0,501	0,108
0,15	0,01302	0,0417	0,00714	0,1250	0,500	0,108
0,10	0,01302	0,0417	0,00754	0,1250	0,500	0,108
0,05	0,01302	0,0417	0,00794	0,1250	0,500	0,108
0,00	0,01302	0,0417	0,00833	0,1250	0,500	0,108

4 Kennwerte des statischen Systems Isolierglas

4.1 Die Scheibe

4.1.1 Plattensteifigkeit

Bei Belastung senkrecht zur Plattenfläche bestimmt die Dicke einer Glasscheibe wesentlich die Verformung. Analog zur Biegesteifigkeit EI beim Balken definiert man als Plattensteifigkeit K der Scheibe folgenden Ausdruck:

$$K = \frac{Ed^3}{12(1-\mu^2)} \quad \text{Gl. 4.1}$$

Dabei ist d die Dicke der Glasscheibe. Verwendet man die für Floatglas üblichen Werte für den Elastizitätsmodul $E=70$ GPa und für die Querkontraktionszahl $\mu=0,22$ (neuerdings verwendet man aufgrund DIN-E 52300 T 5 bzw. prEN 1288 T 5 den Wert $\mu=0,23$, was jedoch zu vernachlässigbaren Unterschieden führt), so erhält man abhängig von der Glasdicke folgende Werte für die Plattensteifigkeit:

Tabelle 4.1 Plattensteifigkeit K in Abhängigkeit der Glasdicke d

d in mm	4	5	6	8	10	12	15	19
K in Nm	392	766	1320	3140	6130	10600	20700	42000

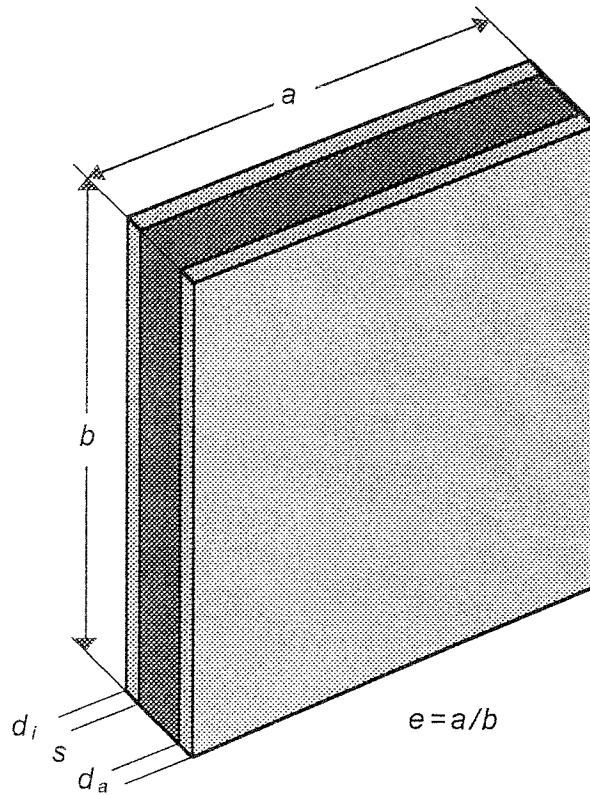


Bild 4.1 Geometrie einer Isolierglasscheibe (schematisch)

Format		Aufbau	
a	kurze Kante	d_a	Dicke der äußeren Scheibe
b	lange Kante	d_i	Dicke der inneren Scheibe
e	Seitenverhältnis $e=a/b$ (Anmerkung: $0 \leq e \leq 1$)	s	Scheibenzwischenraum

Bei Zweischeiben-Isolierglas wird das Zusammenwirken der beiden Scheiben durch das Verhältnis der Plattensteifigkeit der Scheiben zueinander bestimmt. Man definiert die reduzierte Steifigkeit k des Systems:

$$k = \frac{K_a K_i}{K_a + K_i}$$

Gl. 4.2

Dabei ist

- k die reduzierte Plattensteifigkeit
- K_a die Plattensteifigkeit der äußeren Scheibe
- K_i die Plattensteifigkeit der inneren Scheibe.

4.1.2 Die charakteristische Kantenlänge

Das statische Verhalten einer Isolierglaseinheit wird durch den Aufbau, also durch die Dicke und den Abstand (Scheibenzwischenraum) der beiden Glasscheiben, sowie die Größe der Scheiben (Format) bestimmt (Bild 4.1). Die Vielzahl von möglichen Kombinationen kann durch die Definition geeigneter neuer Kenngrößen reduziert werden. Die spätere Rechnung zeigt die Zweckmäßigkeit der Abkürzung

$$a^* = 4 \sqrt{\frac{s \cdot k}{p \cdot A_V}}$$

Gl. 4.3

Dabei ist

- s Scheibenzwischenraum
- k reduzierte Plattensteifigkeit
- p Luftdruck am Einbauort
- A_V der vom Seitenverhältnis abhängige Volumenbeiwert, siehe Abschnitt 2.3.

Diese Größe a^* hat die Dimension einer Länge und wird als *charakteristische* oder auch *kritische Kantenlänge* bezeichnet. Für die meisten Anwendungen ist es zulässig, den Luftdruck mit 100 kN/m² als konstante Größe anzunehmen. Damit hängt die kritische Kantenlänge nur noch vom Aufbau und dem Seitenverhältnis der Isolierglasscheibe ab.

Tabelle 4.1 Charakteristische Kantenlänge a^* in mm für einige typische Aufbauten von Isolierglas (berechnet für $p=100 \text{ kN/m}^2 = 100 \text{ kPa}$)

Isolierglas-Aufbau			Seitenverhältnis			
d_a in mm	s in mm	d_i in mm	1:3	1:2	2:3	1:1
4	12	4	254	271	290	343
5	12	4	272	290	311	368
6	12	6	344	367	393	465
8	12	6	375	400	429	506
8	12	8	427	455	488	577
8	12	VSG 8	339	362	388	459
6	16	6	370	394	423	500
8	16	4	315	336	360	426
8	16	6	402	429	460	544
8	12	VSG 8	365	389	417	493

4.2 Der Randverbund

4.2.1 Verformungsverhalten

Bild 4.2 zeigt einen typischen Isolierglasrandverbund unbelastet und mit Über- bzw. Unterdruck im Scheibenzwischenraum. Während bei Unterdruck der Abstandhalter die Last aufnimmt und lediglich ein Verdrehen um den Winkel α auftritt, wird der freiliegende Rand bei Überdruck zusätzlich zur Verdrehung noch gedehnt. Bei üblichen Verglasungen mit Glashalteleisten wird diese Dehnung behindert und tritt deshalb nicht in Erscheinung. Üblicherweise wird daher davon ausgegangen, daß der Abstand am Glasrand s_0 konstant bleibt, statisch entspricht dies einem starren linienförmigen Auflager.

Bei Structural Glazing ist diese Voraussetzung nicht mehr a priori gegeben. Der Nachgiebigkeit des Randverbundes insbesondere bei Zugbeanspruchung entspricht eine elastische Lagerung der Plattenränder. Auch die Verdrehung (Randwinkel α) im Auflager wird durch den Randverbund behindert, so daß es zumindest prinzipiell zu einer Teileinspannung des Plattenrandes kommt. Wie bedeutend diese Effekte sind, wird durch die elastischen Eigenschaften des Randverbundsystems bestimmt.

Eine geschlossene Lösung der Plattengleichung bei elastischer Lagerung, Teileinspannung und eventuell großer Verformung ist nicht bekannt und wohl auch nicht möglich, so daß eine Berechnung unter diesen Randbedingungen nur noch mit Hilfe von Finite-Element-Methoden möglich ist [DIBt92]. Leider ist es äußerst schwierig aus diesen im Einzelfall gewonnenen Ergebnissen allgemeine Berechnungsgrundlagen abzuleiten. Es wird deshalb hier versucht mit einem einfacheren Modell die Elastizität des Randes zu berücksichtigen.

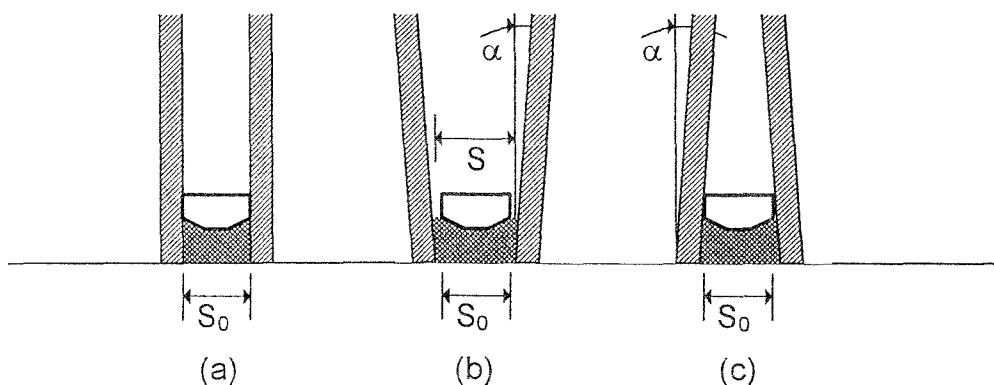


Bild 4.2 Die Verformung am freiliegenden Randverbund bei Überdruck (b) und bei Unterdruck (c) im Scheibenzwischenraum relativ zum unbelasteten Zustand (a). Die Randdehnung und die Randverdrehung sind vergrößert dargestellt.

4.2.2 Zugsteifigkeit

Um die Auswirkung der elastischen Eigenschaften des Randverbundes typischer Structural Glazing Elemente auf die klimatische Beanspruchung abschätzen zu können, wurden orientierende Versuche an einigen Systemen durchgeführt. Wie bereits bekannt [DIBt92], sind die bisherigen Standardproben (Bild 4.3) mit praxisnahen Querschnitten nicht geeignet, die Materialkonstante *Elastizitätsmodul* zu ermitteln.

Der Zusammenhang zwischen Zugkraft und Dehnung der Probe wird deshalb nicht durch den Elastizitätsmodul des Dicht- bzw. Klebstoffes und die Abmessungen der Klebstoffuge getrennt beschrieben, sondern in einer elastischen Kenngröße des Randverbundes als Gesamtsystem zusammengefaßt. Diese Kenngröße enthält neben den Materialeigenschaften des Elastomeres auch die Geometrie der Verklebung. Sie ist damit keine Materialeigenschaft, sondern charakteristisch für das jeweilige System und muß daher auch für jedes System gesondert ermittelt werden.

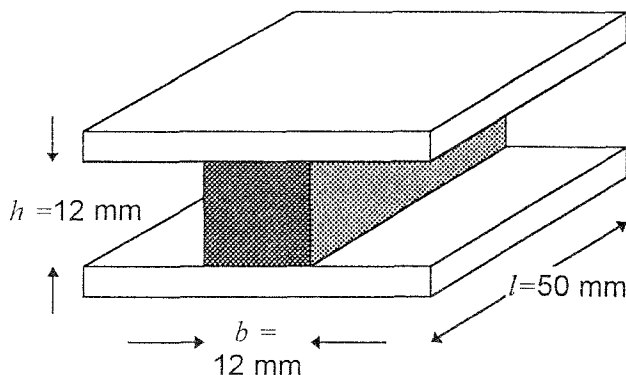


Bild 4.3 Standardprobe zur Prüfung von Structural Glazing Klebstoffen

In allen Fällen ergibt sich bei größeren Verformungen ein nicht linearer Zusammenhang zwischen Einwirkung und Verformung. Um die Auswirkung der elastischen Lagerung auf die Klimabelastung abschätzen zu können, genügt es aber, die Kenngröße im linearen Bereich zu definieren und die Grenze der Gültigkeit zu beachten:

$$\text{für } \Delta h \leq \Delta h_p \quad c = \frac{\Delta F}{l \cdot \Delta h} \quad \text{Gl. 4.4}$$

Hierbei ist:

- c Kenngröße für Zugbelastung in N/mm^2 (Zugsteifigkeit)
- ΔF die Kraft in N

- Δh die Dehnung in mm
 l die Probenlänge in mm (siehe Bild 4.3)
 Δh_p maximale Dehnung im linearen Bereich in mm

Im einfachsten Fall ergibt sich daraus der Elastizitätsmodul E des Materials:

$$E = c \cdot \frac{h}{b}$$

wobei

- h Höhe des Dichtstoffes,
 b Breite des Dichtstoffes ist.

Im Rahmen europäischer Entwürfe zur Beurteilung von Structural Glazing [EOTA94] wird eine auf der Werkstoffmechanik von Gummi-Elastomeren [Flor53] basierende Linearisierung der Spannungs-Dehnungs-Diagramme vorgeschlagen. Anstelle der üblichen Dehnung

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h}$$

wird

$$\varepsilon^* = \frac{1}{3} \left(1 + \varepsilon - \frac{1}{(1 + \varepsilon)^2} \right)$$

in einem Pseudo-Hook'schen Gesetz $\sigma = E \cdot \varepsilon^*$ verwendet. Für kleine Dehnungen stimmt dieses Gesetz mit dem üblichen linearen Zusammenhang überein. Wo es sinnvoll erschien, wurde deshalb auch diese Darstellung ausgewertet.

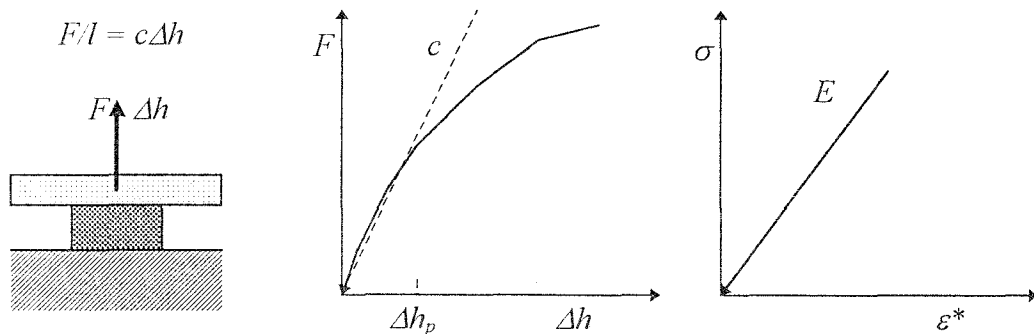


Bild 4.4 Schematische Darstellung der Ermittlung der Kenngröße c für Zugbelastung und die linearisierte Darstellung

Die Ergebnisse der orientierenden Versuche zeigen die folgenden Darstellungen. Wenn nichts anderes angegeben ist, wurde bei Raumtemperatur mit einer Abzugsgeschwindigkeit von 5 mm/min geprüft.

A) Standardprobe

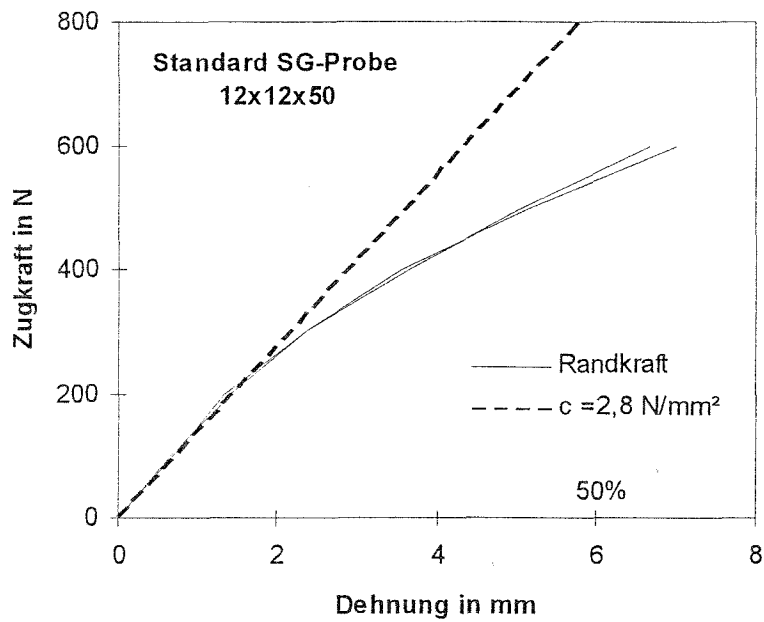


Bild 4.5 Kraft-Dehnungsdiagramm zweier Standardproben. Der lineare Bereich reicht bis 2 mm Dehnung.

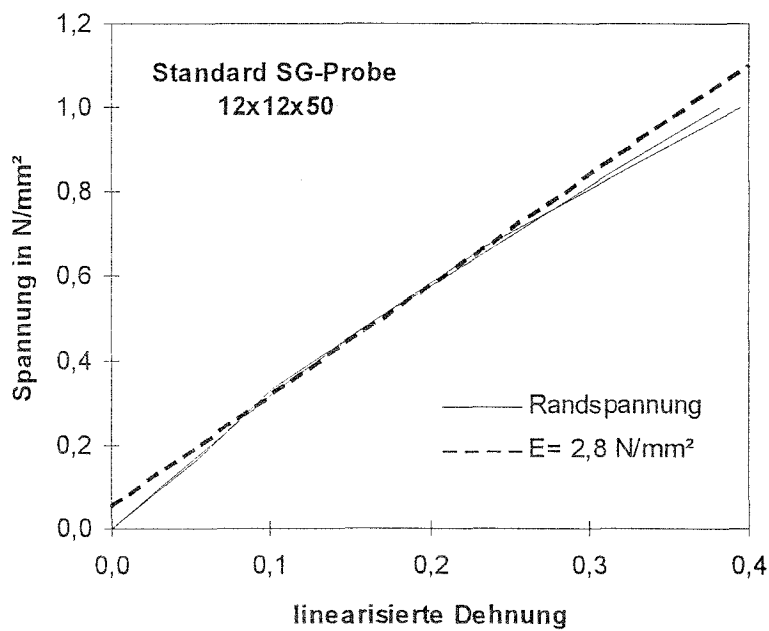


Bild 4.6 Kraft-Dehnungs-Diagramm zweier Standardproben in linearisierter Darstellung

B) SG-Probe

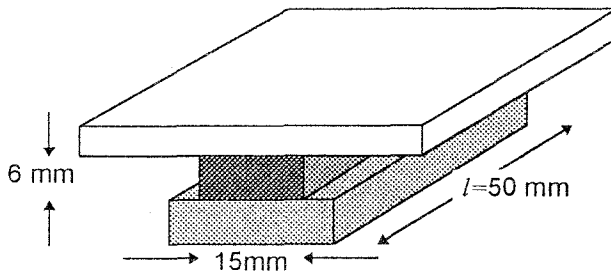


Bild 4.7 Probe mit für Structural Glazing typischen Abmessungen.

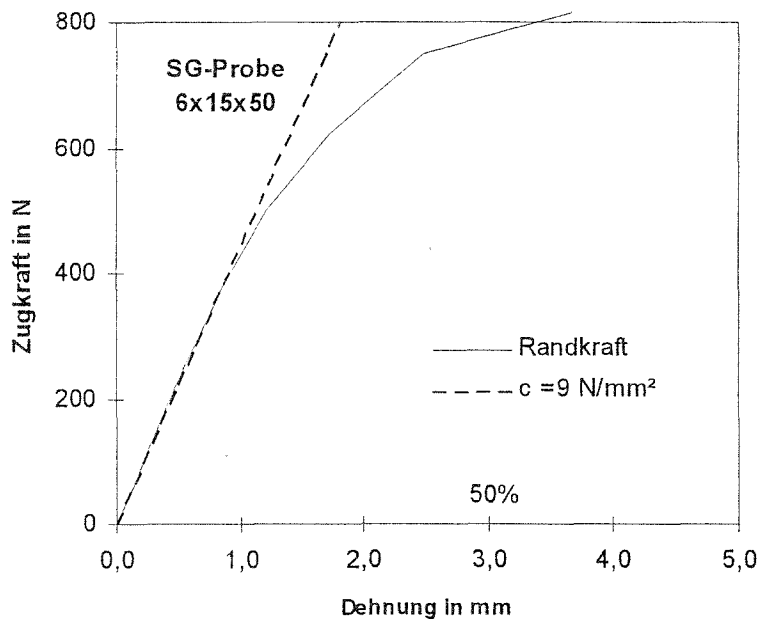


Bild 4.8 Kraft-Dehnungsdiagramm einer Probe mit für Structural Glazing typischen Abmessungen. Der lineare Bereich reicht bis zu 1 mm Dehnung.

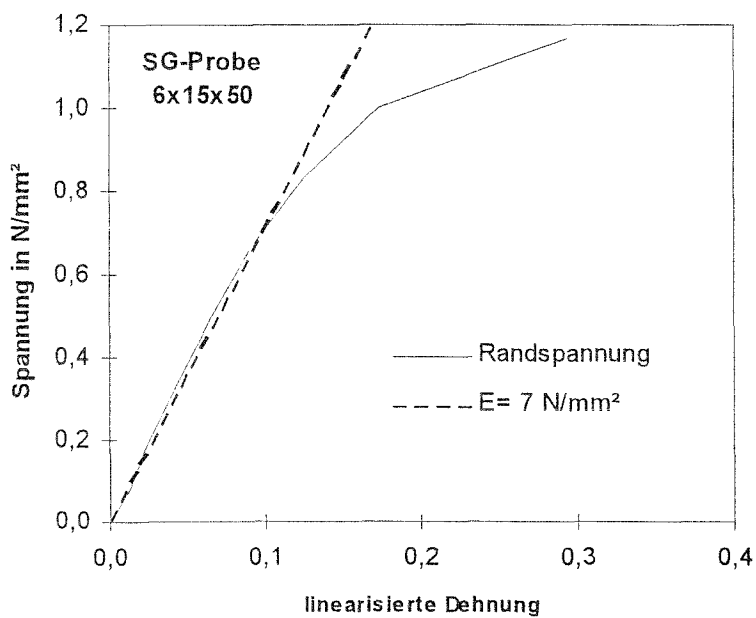


Bild 4.9 Kraft-Dehnungs-Diagramm entsprechend Bild 4.6 in linearisierter Darstellung

C) Isolierglas Randverbund-Probe

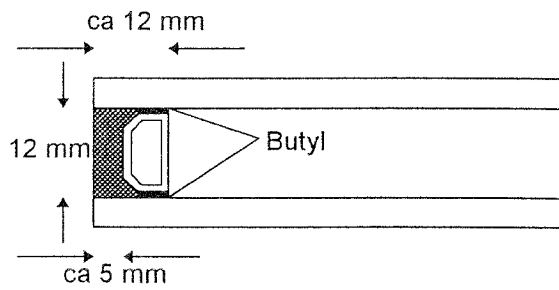


Bild 4.10 Probe mit typischem Isolierglas-Randverbund.

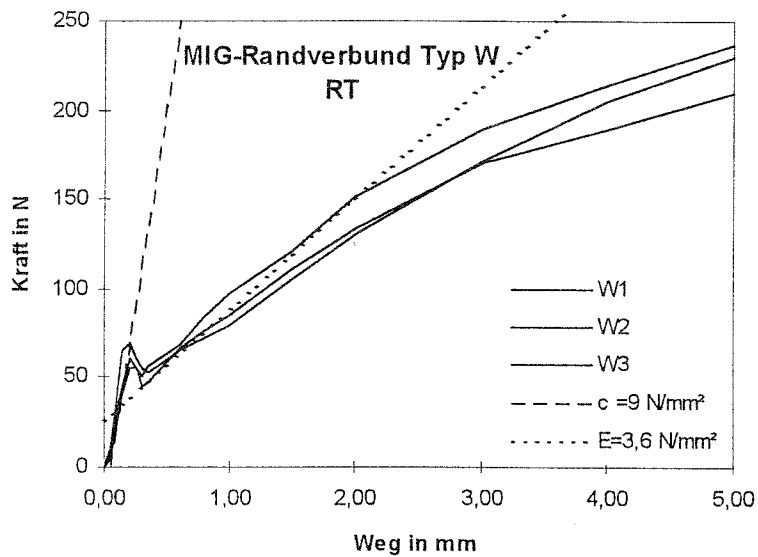


Bild 4.11 Kraft-Dehnungs-Diagramm einer Probe mit typischem Isolierglas-Randverbund. Der lineare Bereich reicht bis zu 0,2 mm Dehnung.

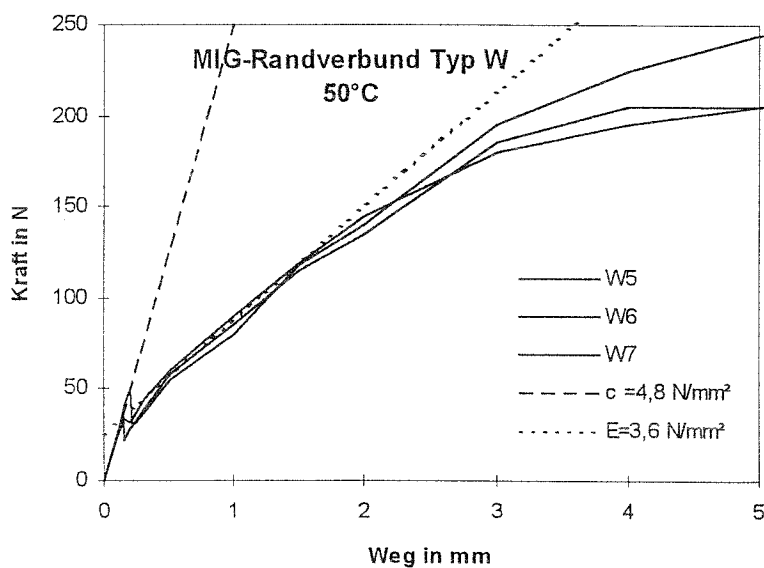


Bild 4.12 Kraft-Dehnungs-Diagramm entsprechend Bild 4.10 aber bei +50 °C. Der lineare Bereich reicht bis zu 0,2 mm Dehnung

4.2.3 Drehsteifigkeit

Neben der Kennzahl c charakteristisch für das Verhalten bei Zugbeanspruchung wird eine weitere Kennzahl c^* , charakteristisch für das Verhalten bei Verdrehung, definiert:

$$c^* = \frac{\Delta M}{l \cdot \Delta \alpha} \quad \text{Gl. 4.5}$$

Hierbei ist:

- c^* Kenngröße bei Verdrehung in Nm/rad/mm (Drehsteifigkeit)
- ΔM das Drehmoment in Nm
- α der Drehwinkel in rad
- l die Probenlänge in mm
- α_p maximaler Drehwinkel im linearen Bereich in rad

Auch diese Kennzahl ist nur für den bei kleinen Verdrehungen $\alpha \leq \alpha_p$ hinreichend linearen Bereich sinnvoll. Es ergibt sich wieder eine starke Abhängigkeit vom Querschnitt der Probe.

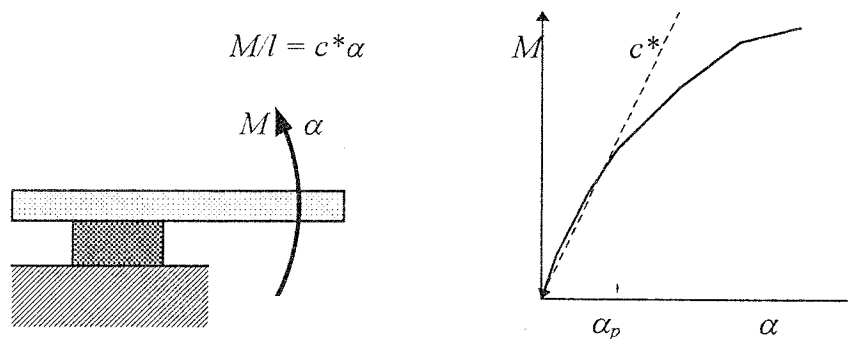


Bild 4.13 Schematische Darstellung der Ermittlung der Kenngröße c^* bei Verdrehung

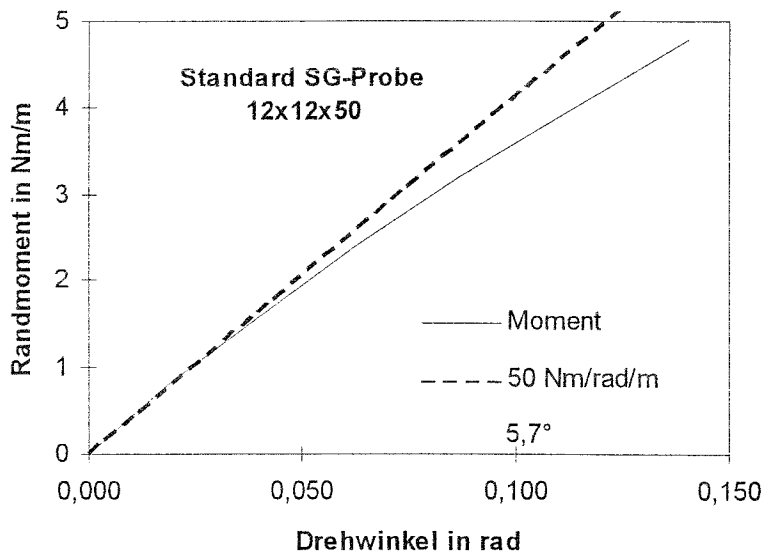


Bild 4.14 Randmoment-Drehwinkel-Diagramm einer Standardproben. Der lineare Bereich reicht bis 0,05 rad

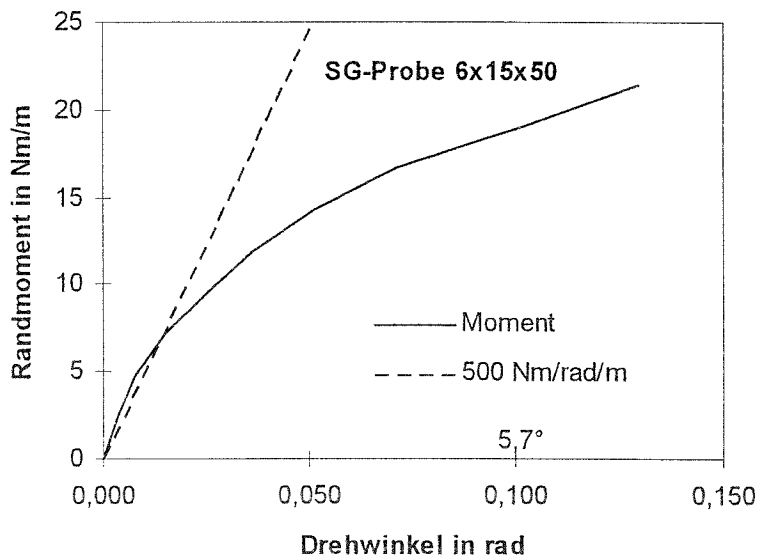


Bild 4.15 Randmoment-Drehwinkel-Diagramm einer Probe mit für Structural Glazing typischen Abmessungen. Der lineare Bereich reicht bis zu 0,02 rad Drehung.

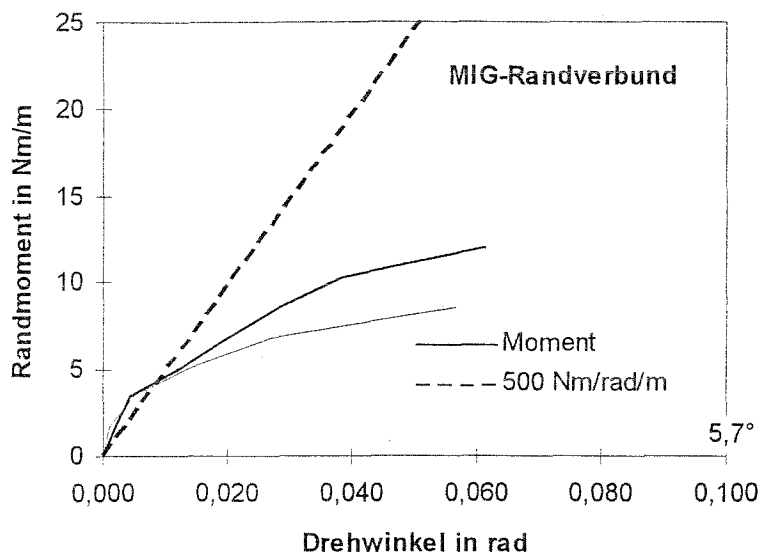


Bild 4.16 Randmoment-Drehwinkel-Diagramm einer Probe mit typischem Isolierglas-Randverbund. Der lineare Bereich reicht bis zu 0,01 rad Drehung.

4.3 Das Gesamtsystem

4.3.1 Statische Randbedingungen

Die folgende Tabelle gibt eine Zusammenfassung der in 4.2.2 und 4.2.3 definierten und ermittelten Kennwerte. Diese Werte sind systemspezifisch und müssen für jedes System, d. h. abhängig von Material und Geometrie der Klebefuge, gesondert bestimmt werden. Im Rahmen dieser Arbeit dienen sie lediglich zur Abschätzung des Einflusses der Randbedingungen auf das Verformungsverhalten der Isolierglasscheibe unter Klimabelastung.

Tabelle 4.1

	Δh_p in mm	c in N/mm ²	α_p in rad	α_p in Grad	c^* in Nm/rad/m
Standardprobe	2	2,8	0,05	3	50
Structural Glazing-Probe	1	9	0,02	2	500
Isolierglas- Randverbund	0,2	9 (5 ¹)	0,01	1	500

¹ bei 50 °C

- *Elastische Bettung*

Die elastische Bettung beschrieben durch den Kennwert c hat vor allem Auswirkungen auf den Verlauf der Randlast im Eckbereich. Die Kirchhoff'sche Einzelecklast (siehe Gl. 3.11) wird bereits bei korrekter Behandlung der schubelastischen Platte auf einen größeren Bereich verteilt [Marg75]. Durch die elastische Bettung wird dieser Bereich weiter vergrößert und die absolute Größe der Ecklast reduziert. Eine Untersuchung dieses Verhaltens ist jedoch nur mit numerischen Methoden möglich. Der Eckbereich kann deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt werden

Wie FEM-Rechnungen zeigen [DIBt92], tritt die größte Beanspruchung aber nicht in der Ecke, sondern weiterhin in der Mitte der langen Kante auf und stimmt gut mit dem Wert der klassischen Theorie überein. Im weiteren wird deshalb die maximale Randbeanspruchung entsprechend Gl. 3.10 berechnet.

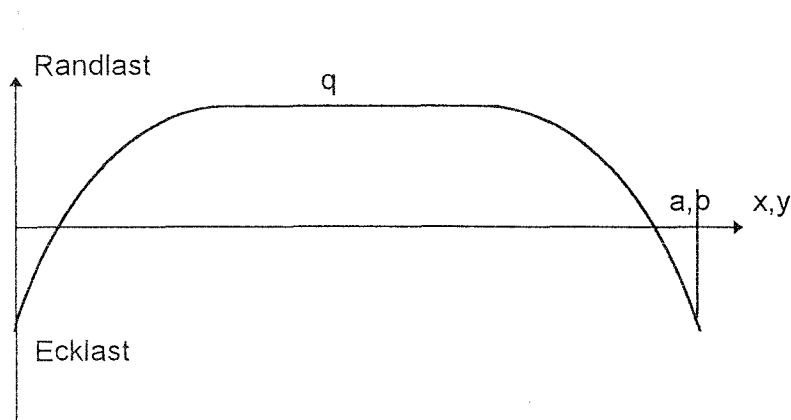


Bild 4.17 Prinzipieller Verlauf der Randlast bei einer schubelastischen Rechteckplatte und elastischer Bettung

- *Elastische Einspannung*

Um die Auswirkung der Einspannung der Plattenränder zu bewerten, werden die Verhältnisse am Beispiel des Plattenstreifens abgeschätzt (Bild 4.18). Da die Klimabelastung bei kleinen Formaten auftritt, wird als typischer Wert eine kurze Stützweite und eine hohe Last gewählt.

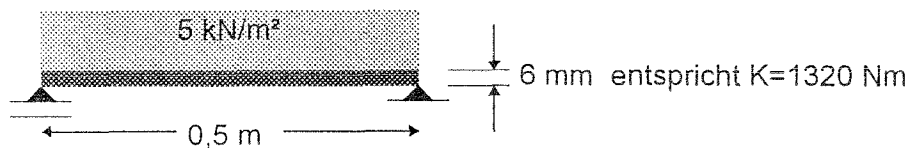


Bild 4.18 Statisches System mit kurzer Stützweite und hoher Last

Die Durchbiegung und der Auflagerwinkel der frei drehbar gelagerten Platte ergibt sich zu (siehe Gl. 3.3 bzw. Gl. 3.5):

$$w = \frac{5}{384} \frac{pa^4}{K} = 3,1 \text{ mm} \quad \text{bzw.} \quad \alpha_{\text{lager}} = 3,3 \cdot \frac{w}{a} = 0,020 \text{ rad}$$

Der Randwinkel liegt gerade noch im linearen Bereich, damit folgt mit einem Kennwert von 500 Nm/rad/m ein Randmoment von etwa

$$M = c \cdot \alpha = 10 \text{ Nm / m}$$

Dem gegenüber steht das für eine vollständige Einspannung notwendige Moment des eingespannten Plattenstreifens von:

$$M_{\text{lager}} = \frac{pa^2}{12} = 104 \frac{\text{Nm}}{\text{m}}$$

Das vorhandene Randmoment beträgt in diesem für die Klimabelastung typischen Fall ca. 10 % des zu einer vollständigen Einspannung notwendigen Moments. Es erscheint daher gerechtfertigt bei der Behandlung der Klimabelastung von einem frei drehbaren Rand auszugehen.

Bei einer genauen Berechnung der Platte unter Windlast und großer Verformung wird allerdings eine Berücksichtigung der Randmomente neben der elastischen Bettung notwendig sein. FEM-Rechnungen im Einzelfall sind dann unumgänglich.

4.3.2 Nachgiebigkeit

Auf eine Differenz zwischen dem Druck im Scheibenzwischenraum (Innenvolumen) und dem Umgebungsdruck reagiert das elastische System Isolierglas durch Verformung und damit einer Veränderung des Innenvolumens, die zum Abbau der Druckdifferenz beiträgt. Bei Überdruck sind folgende Verformungen möglich:

- Ausbauchung der Scheiben,
- Aufweitung des Randverbundes.

Die Aufweitung des Randverbundes und die damit verbundene Volumenzunahme hängt vom genauen Verlauf der Randlasten, auch im Eckbereich, ab. Um weiterhin eine geschlossene Lösung zu ermöglichen, wird der genaue Verlauf durch die maximale Randlast ersetzt und damit das Volumen nach oben abgeschätzt.

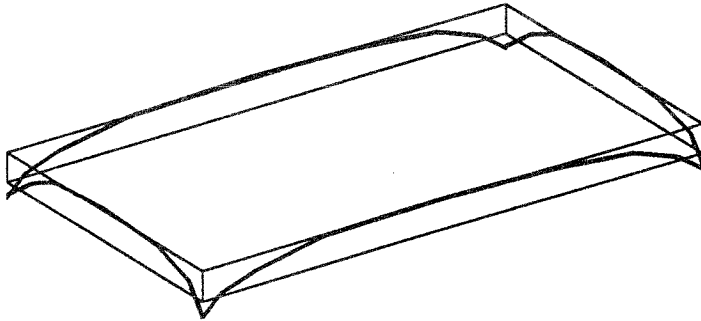


Bild 4.19 Veränderung des Innenvolumens durch Aufweitung des Randverbundes

Wie die weitere Durchrechnung zeigt, ist es bequem den elastischen Kennwert des Randverbundes bei Zugbelastung, siehe Gl. 4.4, mit den bereits in 4.1 definierten Kenngrößen der Isolierglasscheibe zu einer dimensionslosen Größe zusammenzufassen. Man definiert die **Nachgiebigkeit des Randverbundes** durch

$$\chi_r = \frac{p \cdot a}{s \cdot c} \cdot A_q$$

Gl. 4.6

Dabei ist

- χ_r Nachgiebigkeit des Randverbundes
- p Umgebungsdruck am Einbauort
- a Länge der kurze Kante
- s Scheibenzwischenraum
- c Kenngröße für Zugbelastung in N/mm² (Zugsteifigkeit)
- A_q Beiwert der Randlast, siehe Abschnitt 2.3

Ebenso kann die **Nachgiebigkeit der äußeren bzw. inneren Glasplatte** definiert werden:

$$\chi_{a,i} = \frac{p \cdot a^4}{s \cdot K_{a,i}} \cdot A_V$$

Gl. 4.7

Dabei ist

- $\chi_{a,i}$ Nachgiebigkeit der äußeren bzw. inneren Glasplatte
- p Umgebungsdruck am Einbauort
- a Länge der kurze Kante
- s Scheibenzwischenraum
- $K_{a,i}$ Plattensteifigkeit der äußeren bzw. inneren Glasplatte

A_V der vom Seitenverhältnis abhängige Volumenbeiwert, siehe Abschnitt 2.3

Die Summe wird mit β abgekürzt. Damit ist auch die Definition und Bedeutung der **kritische Kantenlänge** a^* der Isolierglaseinheit gegeben. Es gilt:

$$\beta = \chi_a + \chi_i = \left(\frac{a}{a^*}\right)^4$$

Gl. 4.8

a^* kritische Kantenlänge
 β Nachgiebigkeit der Glasplatten

5 Der Druck im Scheibenzwischenraum

5.1 Die äußeren Flächenlasten

Die auf die äußere bzw. innere Scheibe von außen einwirkenden Flächenlasten sind bei senkrechten Verglasungen in der Regel ausschließlich Winddruck- bzw. Windsoglasten. Diese lassen sich zu einer effektiven Flächenlast W zusammenfassen. Bei unnachgiebigem Randlager tragen die Flächenlasten entsprechend der jeweiligen Biegesteifigkeit der Einzelscheiben bei. Bezieht man diese effektive Flächenlast W auf den atmosphärischen Umgebungsdruck p am Einbauort, so erhält man eine mit Wf bezeichnete dimensionslose Größe

$$W = k \cdot \left(\frac{w_i}{K_i} + \frac{w_a}{K_a} \right) \quad \text{und} \quad Wf = \frac{W}{p} \quad \text{Gl. 5.1}$$

Dabei ist

- W effektive Flächenlast
- Wf effektive Flächenlast auf den Umgebungsdruck bezogen
- K_i Biegesteifigkeit der Innenscheibe in Nm
- K_a Biegesteifigkeit der Außenscheibe in Nm
- k reduzierte Biegesteifigkeit in Nm
- w_i Flächenbelastung der Innenscheibe in kN/m²
- w_a Flächenbelastung der Außenscheibe in kN/m²
- p atmosphärischer Druck am Einbauort ca. 1 bar = 100 kN/m²

Anmerkung:

Wegen $k \leq K_i$ bzw. $k \leq K_a$ und $p=100 \text{ kN/m}^2$ gilt für Flächenlasten bis 10 kN/m² jedenfalls: $Wf \leq 0,1$

Bei elastischer Bettung geht neben den Eigenschaften des Randverbundes die Flächenlast der äußeren Scheibe gesondert ein. Auch hier wird eine dimensionslose Größe durch Bezug auf den Umgebungsdruck erreicht:

$$Wf_a = \frac{w_a}{p} \quad \text{Gl. 5.2}$$

Dabei ist

- Wf_a äußere Flächenlast auf den Umgebungsdruck bezogen
- w_a Flächenbelastung der Außenscheibe in kN/m^2
- p atmosphärischer Druck am Einbauort ca 1 bar = 100 kN/m^2

Anmerkung:

Auch für Wf_a gilt weiterhin: $Wf_a \leq 0,1$

5.2 Klimaeinwirkung

Die klimatischen Einflüsse lassen sich in einem Klimafaktor Cf zusammenfassen. Dieser Faktor enthält alle klimatisch relevanten Bedingungen bei Produktion und am Einbauort. Es gilt folgende Definition:

$$Cf = \frac{T_{SZR}}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p} - 1 \quad \text{Gl. 5.3}$$

Dabei ist

- T_0 Temperatur bei Produktion in K
- p_0 atmosphärischer Druck bei Produktion in hPa
- T_{SZR} Temperatur im Scheibenzwischenraum am Einbauort in K
- p atmosphärischer Druck am Einbauort in hPa

Der Klimafaktor ist in der angegebenen Form einfach zu berechnen. Trotzdem ist eine Linearisierung sinnvoll, da die verschiedenen Einflüsse klarer erkennbar werden und eine additive Superposition auch mit anderen Einflüssen möglich wird. Die Linearisierung ist möglich, da die Änderung von Temperatur (Kelvin-Skala) und Druck relativ klein gegen die Größen selbst sind. Als Bezugswerte werden gewählt:

$$T_N = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$$

$$p_N = 1013 \text{ hPa}$$

Die Temperatur der Isolierglasscheibe bei Fertigung und Einbauort lässt sich damit schreiben:

$$T_0 = T_N + \Delta T_P$$

$$T_{SZR} = T_N + \Delta T_E$$

dabei bezeichnet:

- T_N Normaltemperatur 293 K
- T_0 Temperatur im Scheibenzwischenraum bei Produktion in K
- ΔT_P Temperaturdifferenz zur Normaltemperatur bei Produktion in K
- T_{SZR} Temperatur im Scheibenzwischenraum am Einbauort in K
- ΔT_E Temperaturdifferenz zur Normaltemperatur am Einbauort in K

Für den atmosphärischen Druck bei Fertigung und Einbau gilt:

$$p_0 = p_N + \Delta p_P - 12 \frac{hPa}{100m} \cdot h_P$$

$$p = p_N + \Delta p_E - 12 \frac{hPa}{100m} \cdot h_E$$

dabei bezeichnet:

- p_N Normaldruck 1013 hPa
- p_0 Druck im Scheibenzwischenraum bei Produktion in hPa
- Δp_P meteorologische Druckdifferenz zum Normaldruck bei Produktion in hPa
- p atmosphärischer Druck am Einbauort in hPa
- Δp_E meteorologische Druckdifferenz zum Normaldruck am Einbauort in hPa
- h_P Ortshöhe der Produktion in m
- h_E Ortshöhe des Einbauortes in m

Setzt man folgende maximalen Werte für die Temperatur-, Druck und Höhenänderung an:

$$\Delta T_P; \Delta T_E = \pm 30 \text{ K}$$

$$\Delta p_P; \Delta p_E = \pm 50 \text{ hPa}$$

$$h_P = +500 \text{ m}$$

$$h_P - h_E = \pm 500 \text{ m}$$

so zerfällt der Klimafaktor (Gl. 5.3) in die Summe der einzelnen Einflüsse aus Temperatur, meteorologischem Druck und Ortshöhe. Der Linearisierungsfehler liegt bei ca. 1 % und kann vernachlässigt werden. Man erhält schließlich

$$C_f = \frac{\Delta T}{293 \text{ K}} - \frac{\Delta p_{met}}{1013 \text{ hPa}} + 0,012 \frac{\Delta h}{100 \text{ m}}$$

Gl. 5.4

Dabei charakterisieren die folgenden Größen jeweils die Differenz zwischen Einbauort und Fertigung:

$$\begin{array}{ll} \Delta T = \Delta T_E - \Delta T_P & \text{Temperaturdifferenz in } ^\circ\text{C oder K} \\ \Delta p_{met} = \Delta p_E - \Delta p_P & \text{Differenz des meteorologischen Druckes in hPa} \\ \Delta h = h_E - h_P & \text{Differenz der Ortshöhe in m} \end{array}$$

5.3 Der isochore Druck C

In einem völlig starrem System bleibt das Innenvolumen der Isolierglas-scheibe konstant. Der in 5.1.2 definierte Klimafaktor C_f führt damit zu einem Innendruck:

$$C = p \cdot C_f$$

Gl. 5.5

mit

- C isochorer Druck in hPa
- p atmosphärischer Druck am Einbauort in hPa
- C_f Klimafaktor

Dieser klimatisch induzierte Druck C ist analog der in 5.1.1. eingeführten effektiven Flächenlast aus äußeren Lasten und wird im weiteren als (klimatisch induzierter) **isochorer Druck** bezeichnet.

5.4 Gleichgewichtsbedingung

Der Zustand des eingeschlossenen Gases wird durch die Größen

- p_0 Druck
- V_0 Volumen
- T_0 absolute Temperatur

beim Verschließen des Isolierglases bestimmt. Die Adsorption des eingeschlossenen Wasserdampfes an das Trocknungsmittel kann durch eine Korrektur von p_0 berücksichtigt werden. Bei planparalleler Produktion der Schei-

ben berechnet sich das Volumen des Scheibenzwischenraums unter Vernachlässigung der Randverbundbreite zu:

$$V_0 = a \cdot b \cdot s = \frac{a^2 \cdot s}{e} \quad \text{Gl. 5.6}$$

Alle üblichen Füllgase können als *ideale Gase* behandelt werden. Ändern sich die Umgebungsbedingungen und damit auch

- Temperatur T_{SZR} ,
- Druck p_{SZR} ,
- Volumen V_{SZR}

des im Scheibenzwischenraum eingeschlossenen Gases, so gilt aufgrund der Gasgleichung:

$$V_{SZR} = \frac{T_{SZR}}{T_0} \frac{p_0}{p_{SZR}} V_0 \quad \text{Gl. 5.7}$$

Andererseits ergibt sich die Volumenänderung aus der Verformung der Glasscheiben und der Dehnung des Randverbundes zu:

$$V_{SZR} = V_0 + \delta V_a + \delta V_i + \delta V_0 \quad \text{Gl. 5.8}$$

Ursache ist die Differenz zwischen dem Druck im Scheibenzwischenraum p_{SZR} und dem äußeren Druck an der Außenscheibe p_{La} bzw. an der Innenscheibe p_{Li} . Dieser kann, berücksichtigt man z. B. den Staudruck durch Wind oder Schneelasten, durchaus verschieden sein. Es ist üblich, den atmosphärischen Luftdruck p am Einbauort abzuspalten; man schreibt also:

$$p_{La} = p + w_a$$

$$p_{Li} = p + w_i$$

und

$$p_{SZR} = p + \Delta p$$

Dabei sind

p	atmosphärischer Luftdruck der Umgebung
p_{La} bzw. p_{Li}	äußerer Druck auf die äußere bzw. innere Glasscheibe.
w_a bzw. w_i	zusätzliche Flächenlasten durch Wind, Schnee etc. auf die äußere bzw. innere Glasscheibe.
Δp	Druckdifferenz zwischen Scheibenzwischenraum und Umgebungsdruck

Zur Erläuterung (auch der Vorzeichen der Verformung) siehe Bild 5.1. Das mit der Verformung verbundene Volumen für die beiden Scheiben berechnet nach den in 3.2 abgeleiteten Gleichungen.

Man erhält für das Volumen der Außenscheibe:

$$\delta V_a = (p_{SZR} - p_{La}) \cdot \frac{a^6 A_v}{eK_a} = (\Delta p - w_a) \cdot \frac{a^6 A_v}{eK_a}$$

ebenso für die Innenscheibe:

$$\delta V_i = (p_{SZR} - p_{Li}) \cdot \frac{a^6 A_v}{eK_i} = (\Delta p - w_i) \cdot \frac{a^6 A_v}{eK_i}$$

Bei Überdruck im Scheibenzwischenraum berechnet sich das mit die Dehnung des Randverbundes verbundene Volumen in erster Näherung aus der maximalen Randlast und der Kenngröße c des Randverbundes. Man erhält:

$$\delta V_0 = (p_{SZR} - p_{La}) \cdot \frac{aA_q}{c} \cdot ab = (\Delta p - w_a) \cdot \frac{1}{c} \cdot \frac{a^3 A_q}{e}$$

Damit erhält man durch Gleichsetzen von Gl. 5.7 und Gl. 5.8 und Einsetzen der Ausdrücke für die Volumina schließlich folgende Gleichgewichtsbedingung:

$$\frac{T_{SZR}}{T_0} \frac{p_0}{p + \Delta p} = 1 + (\Delta p - w_a) \frac{a^4 A_v}{sK_a} + (\Delta p - w_i) \frac{a^4 A_v}{sK_i} + (\Delta p - w_a) \frac{aA_q}{c \cdot s} \quad \text{Gl. 5.9}$$

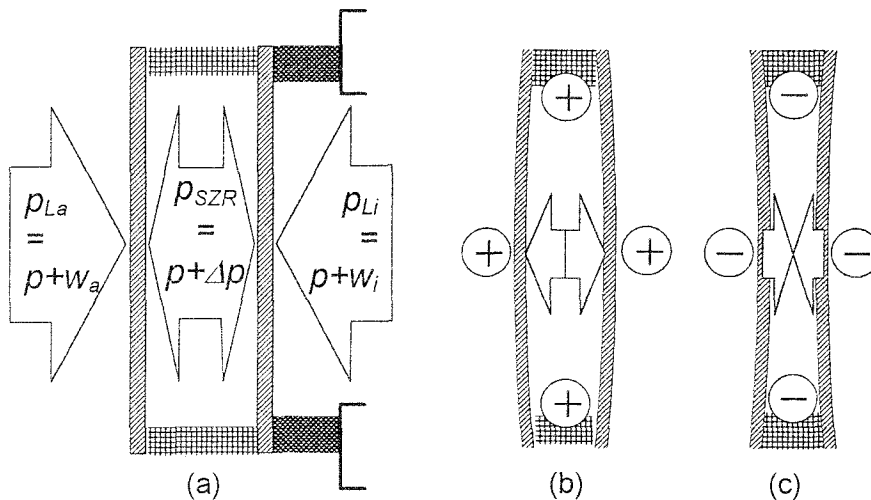


Bild 5.1 (a) Druckbezeichnung am Isolierglas; die Belastung ergibt sich aus der Druckdifferenz, z. B. Außenscheibe: $p_{SZR} - p_a = \Delta p - w_a$
 (b) Bei Überdruck im SZR ergibt sich eine konvexe Verformung (Ausbauchung) und Zugbeanspruchung im Randverbund (positives Vorzeichen).
 (c) Bei Unterdruck im SZR ergibt sich eine konkave Verformung (Einbauchung) und Druckbeanspruchung im Randverbund (negatives Vorzeichen)

5.5 Die Druckdifferenz

Die Lösung der quadratischen Gleichung Gl. 5.9 wird durch die in Kap. 4 definierten Abkürzungen wesentlich übersichtlicher. Man erhält nach Umformung und Einsetzen folgende quadratische Gleichung in dimensionsloser Form:

$$\left(\frac{\Delta p}{p} + 1 \right) \cdot \left(\frac{\Delta p}{p} (\beta + \chi_r) + (1 - \beta \cdot Wf - \chi_r \cdot Wf_a) \right) - (1 + Cf) = 0$$

und damit die gesuchte Druckdifferenz als positive Lösung:

$$\Delta p = \frac{p}{2} \cdot \frac{1 + \beta + \chi_r - (\beta Wf + \chi_r Wf_a)}{\beta + \chi_r} \left\{ \sqrt{1 + \frac{4(\beta + \chi_r) \cdot (Cf + \beta Wf + \chi_r Wf_a)}{(1 + \beta + \chi_r - (\beta Wf + \chi_r Wf_a))^2}} - 1 \right\} \quad \text{Gl. 5.10}$$

dabei ist

Δp	Druckdifferenz zwischen Scheibenzwischenraum und Umgebungsdruck
p	atmosphärischer Luftdruck der Umgebung
β	Nachgiebigkeit der Glasplatten
χ_r	Nachgiebigkeit des Randverbundes
W_f	effektive Flächenlast bezogen auf den Umgebungsdruck
W_f^a	Flächenlast der äußeren Scheibe bezogen auf den Umgebungsdruck
C_f	Klimafaktor

Eine Auswertung dieser Gleichung mit EDV-Unterstützung ist heute kein Problem. Damit kann der Über- bzw. Unterdruck Δp im Scheibenzwischenraum ausgehend von den Belastungen berechnet werden. Alle weiteren Größen lassen sich dann aus den in 3.2 zusammengestellten Gleichungen ableiten.

Die Grundgleichung Gl. 5.10 ist sehr unübersichtlich, so daß daraus das Verhalten des Systems nicht direkt abgelesen werden kann. Insbesondere gehen die Einwirkungen „Klima“ und „Wind“ in komplizierter Weise ein, so daß die übliche lineare Superposition nicht mehr möglich ist. Glücklicherweise läßt das vorliegende System entscheidende Vereinfachungen zu. Bei praxisrelevante Einsatzbedingungen gelten folgende Grenzen für die bezogene äußere Flächenlast und den Klimafaktor, siehe auch 5.1:

$$\begin{aligned} W_f &\leq 0,05 \\ W_f^a &\leq 0,05 \\ C_f &\leq 0,2 \end{aligned}$$

Eine detaillierte Untersuchung des Wurzelausdrucks in Gl. 5.10 zeigt, daß der Wert des Bruches für alle möglichen Werte der Nachgiebigkeit von Randverbund und Glasplatten stets wesentlich kleiner als 1 bleibt. Die Wurzel kann deshalb linearisiert werden.

Gl. 5.10 für den Druck im Scheibenzwischenraum schreibt sich damit wesentlich einfacher und mit völlig ausreichender Genauigkeit:

$$\Delta p = \frac{C + \beta W + \chi_r W^a}{1 + \beta + \chi_r} \quad \text{Gl. 5.11}$$

dabei ist wieder

- Δp Druckdifferenz zwischen Scheibenzwischenraum und Umgebungsdruck
- β Nachgiebigkeit der Glasplatten
- χ_r Nachgiebigkeit des Randverbundes
- W effektive Flächenlast
- w_a äußere Flächenlast
- C isochorer Druck

Damit ist es bei bekannter Nachgiebigkeit der Isolierglasscheibe möglich, den durch die klimatische Belastung und den äußeren Lasten verursachten Druck im Scheibenzwischenraum zu berechnen. Die Auswirkungen dieses Innendruckes werden in Kapitel 7 diskutiert.

6 Experimentelle Verifizierung

Zur Überprüfung wurde ein einfacher Versuch an drei Isolierglaseinheiten durchgeführt. Die Abmessung und der Aufbau wurden so gewählt, daß die dargestellte Theorie möglichst empfindlich überprüft werden kann. Dem Aufbau 5/24/5 entspricht bei quadratischem Format gerade eine kritische Kantenlänge von 0,48 m. Berücksichtigt man eine Randverbundbreite von ca. 1 cm, so erhält man das gewählte Format:

Abmessung	500 x 500 mm ²
Scheibendicken	5 mm
Scheibenabstand	24 mm
Randverbund Typ A, Typ B und Referenzscheibe	

Die Belastung der Scheiben wurde in Form einer Temperaturwechsellagerung durchgeführt. Um Einflüsse aus den Produktionsbedingungen auszuschließen, wurde vor Versuchsbeginn ein Druckausgleich zwischen Innendruck der Scheiben und Druck im Labor hergestellt. Bei den Proben A und B wurde der Randverbund wieder dicht verschlossen. Die Referenzscheibe blieb offen und wurde zur Überprüfung und Korrektur der Wegaufnehmer verwendet.

Während der Versuchsdauer wurden Luftdruck, Temperatur und die Verschiebung der Plattenränder und der Plattenmitte kontinuierlich erfaßt. Die Ergebnisse sind in Bild 6.2 und Bild 6.3 dargestellt. Die Mittendurchbiegung folgt, wie zu erwarten war, bei hoher und tiefer Temperatur im wesentlichen dem Temperaturgang in der Klimakammer. Die Verformung in der Mitte der Kante (Glasrand) erreicht bei hoher Temperatur und damit Überdruck im Scheibenzwischenraum Werte in der Größenordnung von einem Millimeter, wobei die Größe der Verformung vom Randverbundsystem abhängt. Neben der elastischen Verformung zeigt sich während der Konstantlagerung (ca. -2 h bis 12 h) auch ein deutlicher plastischer Anteil durch den weiteren Anstieg. Bei niedrigerer Temperatur und Unterdruck wird die Randverformung für beide Systeme vom Abstandhalter bestimmt und damit etwa gleich. Schlußendlich bleibt bei beiden Systemen eine Randverformung von einigen hundert Mikrometern.

In Bild 6.3 ist außerdem der aus den Klimadaten theoretisch berechnete Verlauf der Mittendurchbiegung eingetragen. Zur Berechnung der Nachgiebigkeit wurde die Kantenlänge mit 48 cm und der Labordruck mit 950 hPa angesetzt, man erhält die Nachgiebigkeit der Glasplatten zu 0,93, die Nachgiebigkeit

des Randverbundes wurde zunächst vernachlässigt. Die Mittendurchbiegung wurde dann nach der in Kapitel 3 und 4 dargestellten Theorie berechnet. Man erhält eine ausgezeichnete Übereinstimmung von Rechnung und Messung. Lediglich im Bereich höherer Temperaturen wird die Verformung etwas zu hoch berechnet.

Verantwortlich hierfür ist die bei Überdruck auftretende Aufweitung des Randverbundes. Berücksichtigt man eine Randverbund-Nachgiebigkeit von ca. 0,4 ($c=5 \text{ N/mm}^2$), so wird die Mittendurchbiegung deutlich reduziert, obwohl die theoretische Randaufweitung noch wesentlich kleiner als der Meßwert bleibt. Dies zeigt, daß die Annahme eines quaderförmigen Volumenzuwachses zumindest bei kleinen Scheiben nur eine Abschätzung zu maximalen Werten darstellt. Dieses Verhalten war zu erwarten und zeigt, daß eine genauere Beschreibung der Randverbundverformung eine vollständige Behandlung der Platte auf elastischen Lagern erfordert. Eine Vernachlässigung der Randaufweitung ist auf dem bisher erreichten Berechnungsniveau daher durchaus gerechtfertigt.

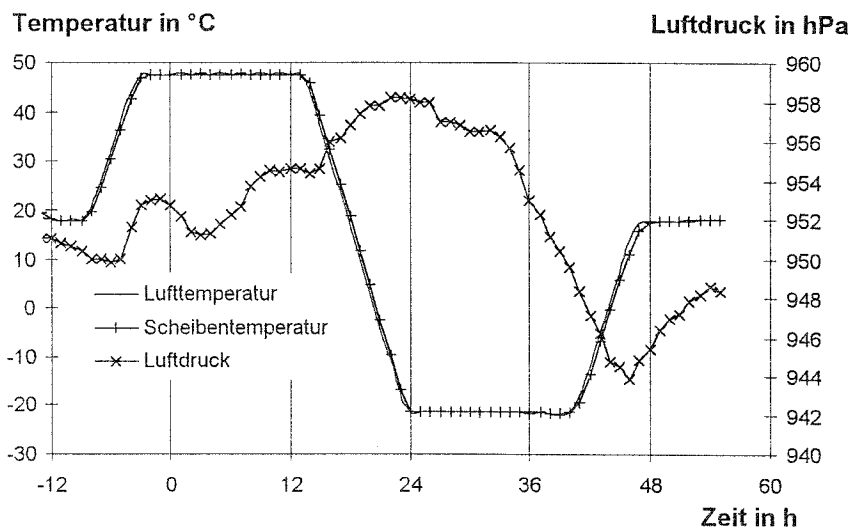


Bild 6.2 Verlauf der Temperatur und des Luftdruckes

Verformung in mm

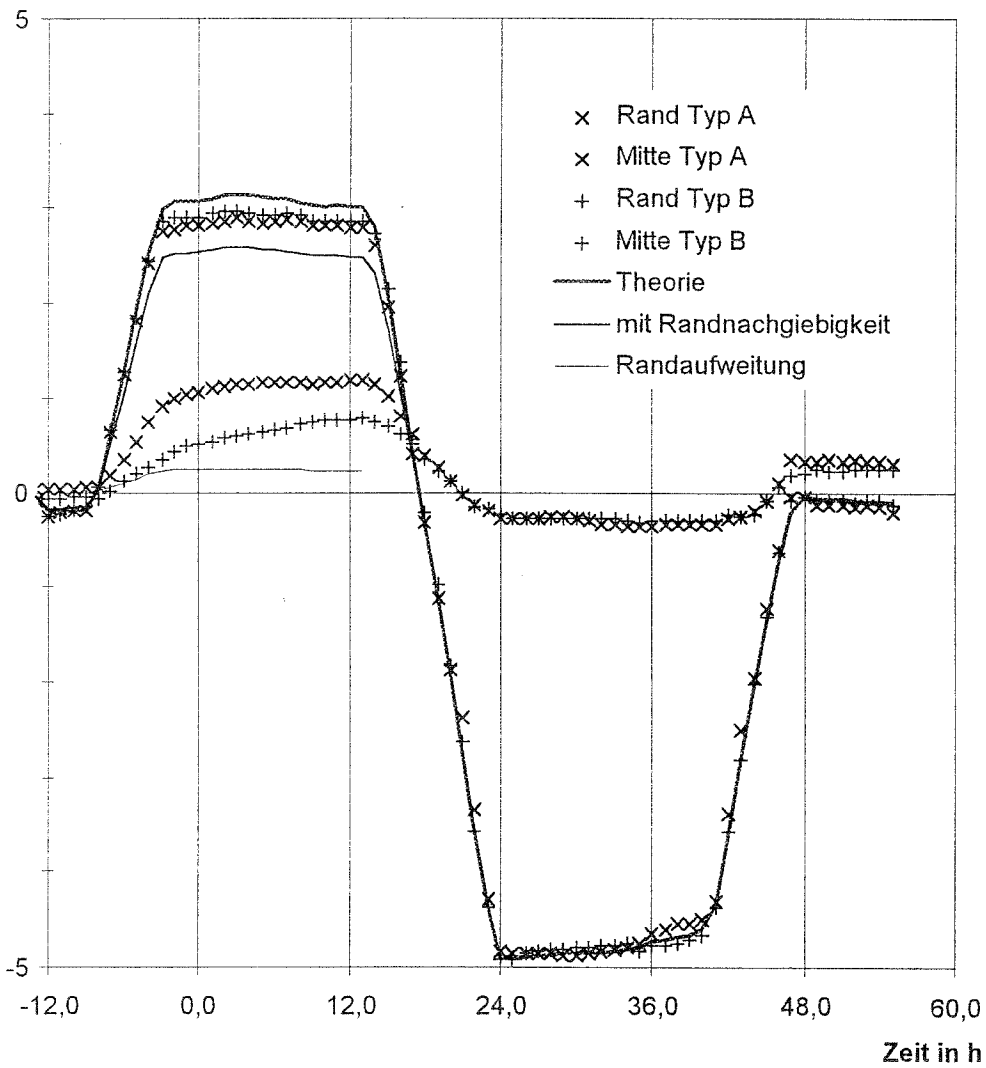


Bild 6.3 Verformung von Isolierglas bei Temperaturänderung
Die Mittenverformung wird durch die theoretische Kurve ausgezeichnet erklärt.

7 Anwendung

7.1 Die resultierende Gesamtlast

Für die Beanspruchung der Klebefuge ist die auf die äußere Scheibe einwirkende, aus allen Einwirkungen resultierende gesamte Flächenlast maßgebend. Ist diese resultierende Gesamtlast bekannt, so können alle weiteren Größen, insbesondere die Randbeanspruchung, nach den in Kapitel 3 gegebenen Gleichungen berechnet werden.

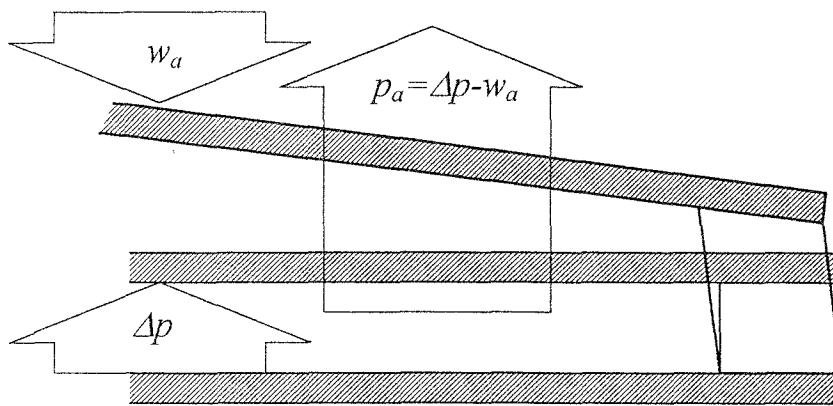


Bild 7.1 Resultierende Gesamtlast der Außenscheibe (äußere Glasplatte)

- p_a resultierende Gesamtlast auf die äußere Glasplatte
- Δp Druckdifferenz zwischen Scheibenzwischenraum und Umgebungsdruck
- w_a Flächenlast der Außenscheibe

Bei den gewählten Vorzeichen, Überdruck im Scheibenzwischenraum und Winddruck von außen jeweils positiv, erhält man die resultierende Gesamtlast als Differenz von Druck im Scheibenzwischenraum und dem Außendruck (Bild 7.1). Da der Druck im Scheibenzwischenraum nicht nur von den Einwirkungen, Wind und Klima, sondern auch vom Tragverhalten des Gesamtsystems abhängt, gilt dies auch für die resultierende Gesamtlast. Man erhält:

$$p_a = \Delta p - w_a = \frac{C + \beta \cdot W + \chi_r \cdot w_a}{1 + \beta + \chi_r} - w_a$$

Gl. 7.1

dabei ist

p_a	resultierende Gesamtlast auf die äußere Glasplatte
Δp	Druckdifferenz zwischen Scheibenzwischenraum und Umgebungsdruck
C	isochorer Druck
W	effektive Flächenlast
w_a	Flächenlast der Außenscheibe
β	Nachgiebigkeit der Glasplatten
χ_r	Nachgiebigkeit des Randverbundes

7.2 Der Einwirkungsgrad

Spaltet man die Nachgiebigkeit der Glasplatten in die Einzelwerte auf, so kann Gleichung Gl. 7.1 für die resultierende Gesamtlast wesentlich übersichtlicher geschrieben werden:

$$p_a = \frac{C - (1 + \chi_i) \cdot w_a + \chi_i \cdot w_i}{1 + \chi_a + \chi_i + \chi_r} \quad \text{Gl. 7.2}$$

dabei ist

p_a	resultierende Gesamtlast auf die äußere Glasplatte
w_a	äußere Flächenlast der äußeren Scheibe
w_i	äußere Flächenlast der inneren Scheibe
C	isochorer Druck
χ_a	Nachgiebigkeit der äußeren Glasplatte
χ_i	Nachgiebigkeit der inneren Glasplatte
χ_r	Nachgiebigkeit des Randverbundes

Gleichung Gl. 7.2 enthält sowohl die Klimabelastung als auch die mittragende Wirkung der inneren Scheibe bei Belastung der äußeren Scheibe und natürlich auch den „Durchgriff“ einer eventuellen Belastung der inneren Scheibe auf die Außenscheibe. Damit ist eine weitere Schreibweise in Anlehnung an die auf der Einwirkungsseite übliche Summe der Einwirkungen naheliegend:

$$p_a = \eta_{a,C} \cdot C + \eta_{a,a} \cdot w_a + \eta_{a,i} \cdot w_i$$

Gl. 7.3

wobei der **Einwirkungsgrad** auf die Außenscheibe η_a jeder Einwirkung definiert wird durch:

- Klima

$$\eta_{a,C} = \frac{1}{1 + \sum \chi}$$

Gl. 7.4

- Flächenlast außen

$$\eta_{a,a} = -\frac{1 + \chi_i}{1 + \sum \chi}$$

Gl. 7.5

- Flächenlast innen

$$\eta_{a,i} = \frac{\chi_i}{1 + \sum \chi}$$

Gl. 7.6

dabei ist

- $\eta_{a,C}$ Einwirkungsgrad des isochoren Drucks auf die Außenscheibe
- $\eta_{a,a}$ Einwirkungsgrad der äußeren Flächenlast auf die Außenscheibe
- $\eta_{a,i}$ Einwirkungsgrad der inneren Flächenlast auf die Außenscheibe
- χ_i Nachgiebigkeit der inneren Glasplatte
- $\sum \chi$ Summe der Nachgiebigkeit Randverbund, äußere und innere Glasplatte

Anmerkung 1:

Die gewählte Vorzeichenkonvention, Winddruck positiv und Scheibenausbauchung positiv, erfordert die in Gl. 7.4 ff angegebenen Vorzeichen. Insbesondere auch das Minuszeichen bei $\eta_{a,a}$.

Anmerkung 2:

Die lineare Überlagerung unterschiedlicher Einwirkungen in Gl. 7.3 erlaubt die Berücksichtigung unterschiedlicher Teilsicherheitsbeiwerte (vergleiche EUROCODES).

Anmerkung 3:

Analog zum Einwirkungsgrad auf die Außenscheibe können die Einwirkungsgrade η_i auf die Innenscheibe definiert werden.

- **Der Einwirkungsgrad der äußeren Flächenlast auf die Außenscheibe**
Die mittragende Wirkung

Betrachtet man den Einwirkungsgrad der äußeren Windlast auf die äußere Scheibe isoliert, so erhält man die „mittragende Wirkung“ der Innenscheibe. Die Außenscheibe trägt bei hinreichend großer Kantenlänge die äußere Windlast nur entsprechend dem Verhältnis der Plattensteifigkeit, d. h. bei einem symmetrischen Aufbau halbiert sich die Flächenlast (Kathedereffekt [Kath58]).

In Bild 7.2 ist der Betrag des Einwirkungsgrades in Abhängigkeit von der Länge der kurzen Kante am Beispiel unterschiedlicher Glasdickenkombinationen bei 12 mm Scheibenzwischenraum und starrem Rand dargestellt. Man erkennt, daß für größere symmetrisch aufgebaute Scheiben (bei 6/12/6 etwa ab 100 cm) die einfache Regel *halbe Windlast* durchaus anwendbar ist. Bei asymmetrischen Aufbau geht das Verhältnis der Plattensteifigkeit mit ein. Bei kleineren Scheiben übernimmt aber die äußere Scheibe immer den größeren Anteil der Last.

Um den Einfluß der Randverbundnachgiebigkeit abzuschätzen, ist in Bild 7.3 der Einwirkungsgrad bei einer Nachgiebigkeit des Randverbundes von $c=10 \text{ N/mm}^2$ dargestellt, die restlichen Parameter sind wie in Bild 7.2. Es ist zu berücksichtigen, daß das einfache Modell den Effekt überschätzt, siehe Kapitel 6. Man erkennt, daß sich der Einfluß auf kleine Scheiben (Kantenlänge unter 50 cm) beschränkt, dort ergibt sich ein etwas geringerer Einwirkungsgrad. Für die Praxis ist dieser Einfluß ohne Bedeutung und kann vernachlässigt werden.

- **Der Einwirkungsgrad der inneren Flächenlast auf die Außenscheibe**
Die mittragende Wirkung

Greift an der Innenscheibe eine Flächenlast an, so teilt sich dies auch der Außenscheibe mit. Betrachtet man den Einwirkungsgrad der inneren Windlast auf die äußere Scheibe, so erhält man unter den Bedingungen von Bild 7.2 den in Bild 7.4 dargestellten Verlauf. Bei symmetrischem Aufbau und großen Scheiben ergibt sich wieder die halbe Last. Ansonsten trägt auch hier die steifere Scheibe die größere Last. In Bild 7.5 ist zusätzlich die Nachgiebigkeit des Randverbundes mit berücksichtigt.

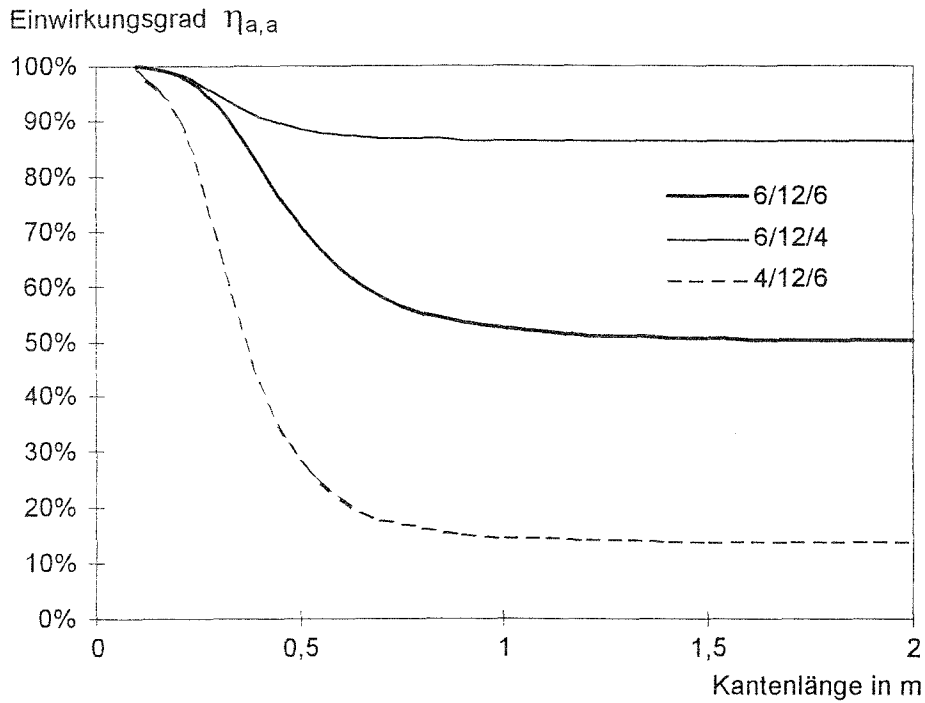


Bild 7.2 Einwirkungsgrad (Betrag) der äußeren Flächenlast auf die Außenscheibe für unterschiedliche Aufbauten ohne Berücksichtigung einer Nachgiebigkeit des Randverbundes (Glasdicke außen/Scheibenzwischenraum/Glasdicke innen)

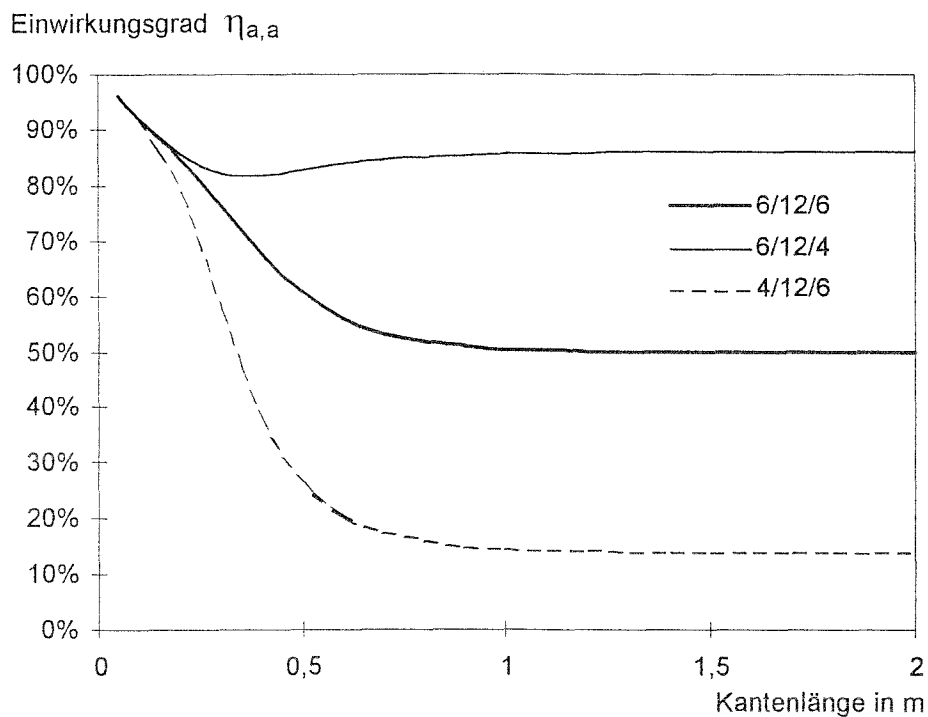


Bild 7.3 Einwirkungsgrad der äußeren Flächenlast auf die Außenscheibe für unterschiedliche Aufbauten (Schreibweise Glasdicke außen/Scheibenzwischenraum/Glasdicke innen) mit Berücksichtigung einer Nachgiebigkeit des Randverbundes ($c=10 \text{ N/mm}^2$)

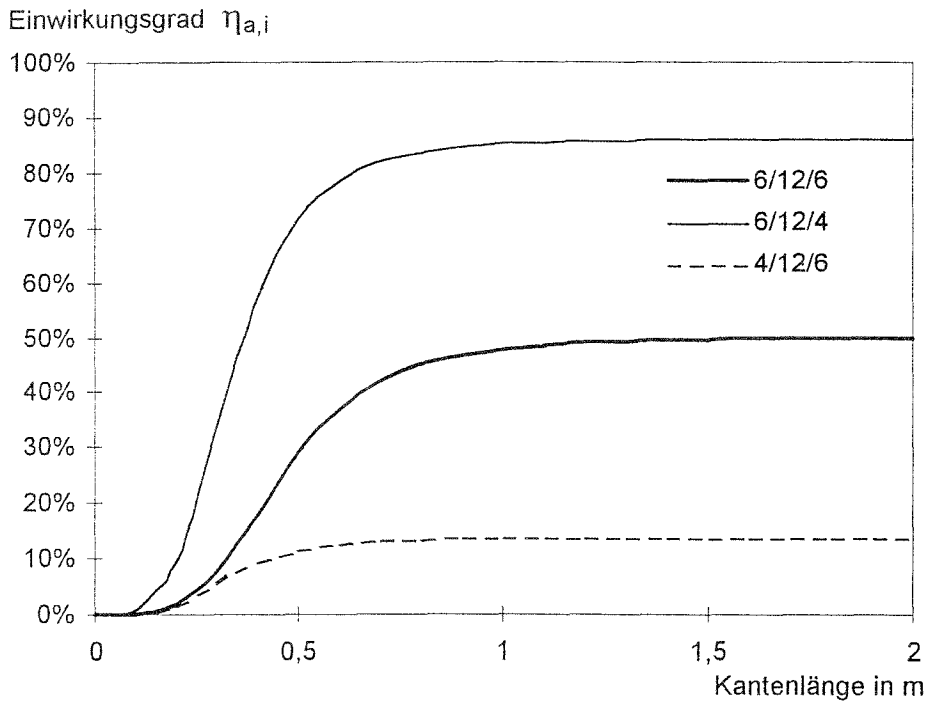


Bild 7.4 Einwirkungsgrad der inneren Flächenlast auf die Außenscheibe für unterschiedliche Aufbauten (Schreibweise Glasdicke außen/Scheibenzwischenraum/Glasdicke innen) ohne Berücksichtigung einer Nachgiebigkeit des Randverbundes

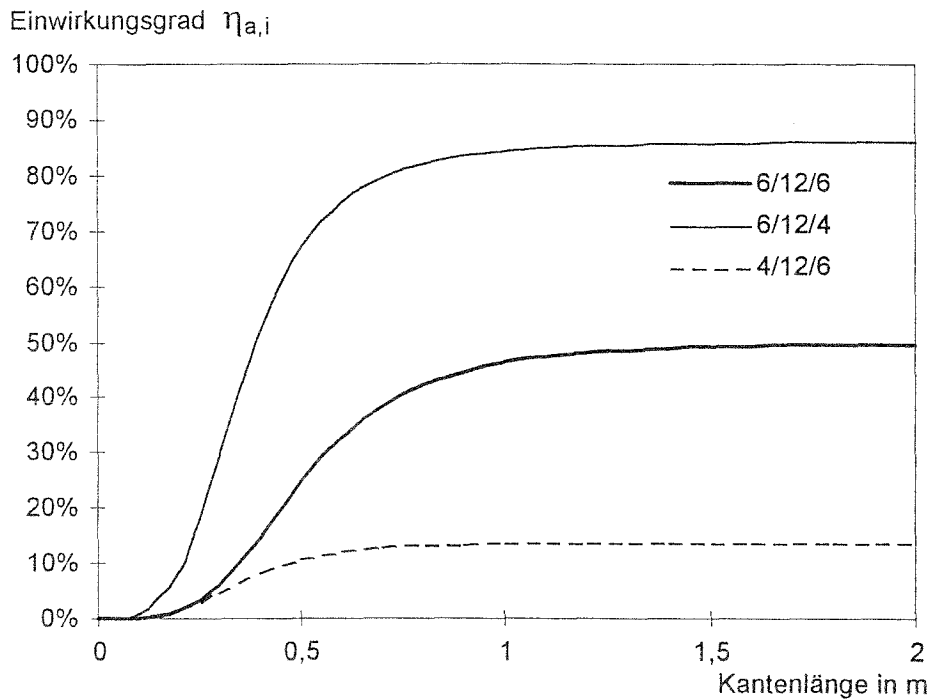


Bild 7.5 Einwirkungsgrad der inneren Flächenlast auf die Außenscheibe für unterschiedliche Aufbauten (Schreibweise Glasdicke außen/Scheibenzwischenraum/Glasdicke innen) mit Berücksichtigung einer Nachgiebigkeit des Randverbundes ($c=10 \text{ N/mm}^2$)

● Der Einwirkungsgrad der Klimabelastung

Der Einwirkungsgrad der Klimabelastung beträgt für kleine Scheiben 100 %, geht dann jedoch mit zunehmender Kantenlänge rasch gegen Null, siehe Bild 7.6. Kennzeichnend ist für jeden Isolierglasaufbau charakteristische Länge a^* . In Bild 7.7 ist wieder zusätzlich die Nachgiebigkeit des Randverbundes mit berücksichtigt.

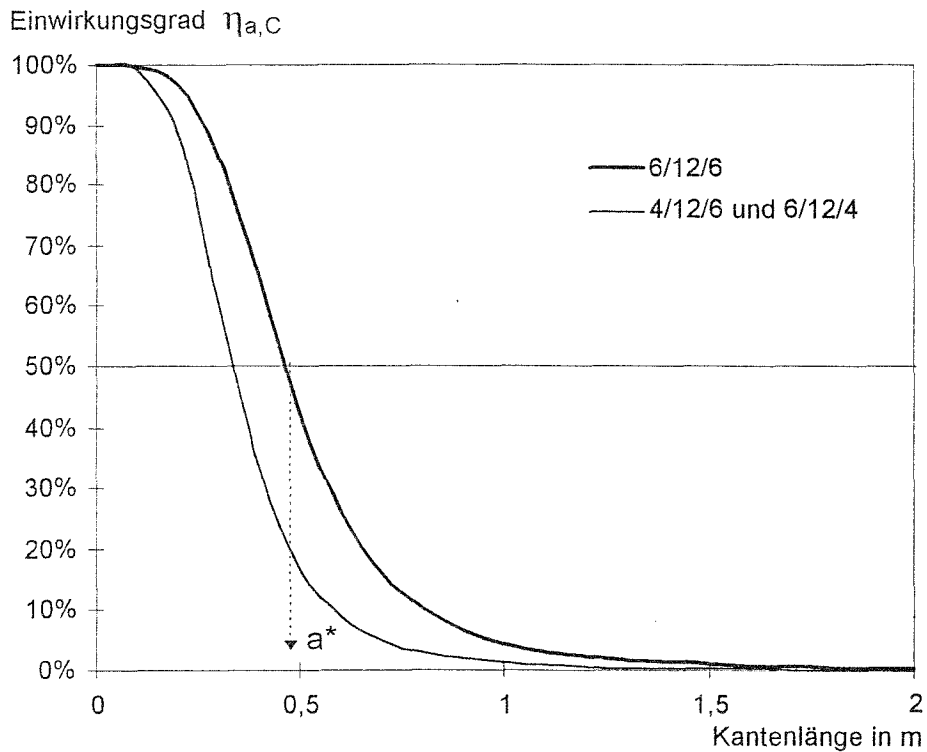


Bild 7.6 Einwirkungsgrad der Klimabelastung für unterschiedliche Aufbauten ohne Berücksichtigung einer Nachgiebigkeit des Randverbundes

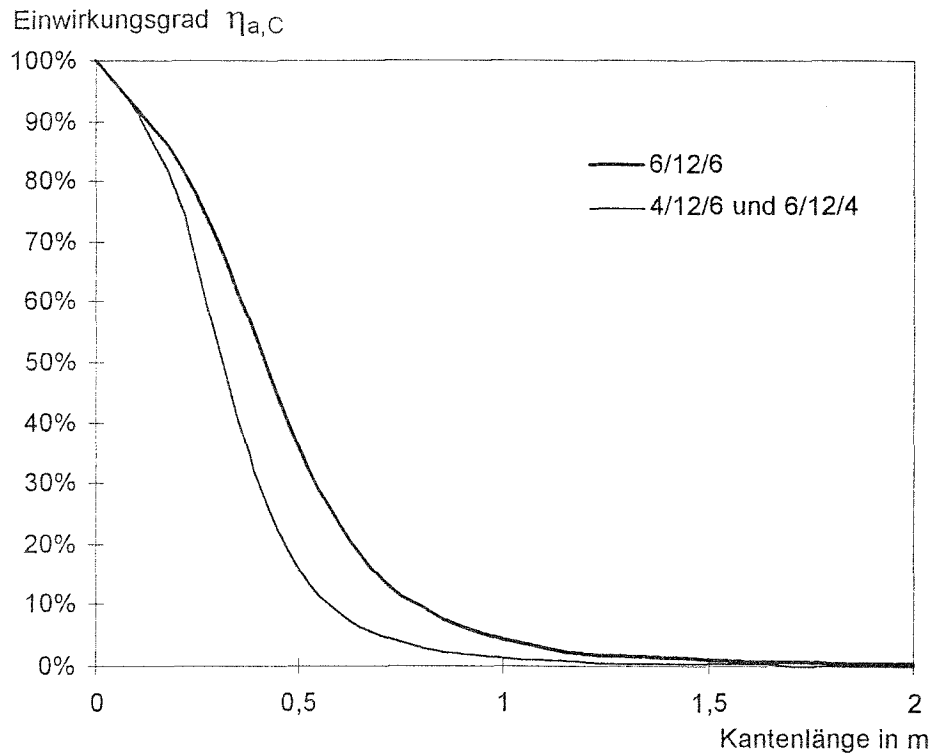


Bild 7.7 Einwirkungsgrad der Klimabelastung für unterschiedliche Aufbauten mit Berücksichtigung einer Nachgiebigkeit des Randverbundes von 10 N/mm²

Die Nachgiebigkeit des Randverbundes reduziert auch hier den Einwirkungsgrad bei kleinen Scheiben. Allerdings gelten wieder die Einschränkungen bezüglich der Gültigkeit des Modells. Die experimentellen Ergebnisse (siehe Kapitel 6) zeigen, daß die tatsächliche Randaufweitung in der Mitte größer ist als theoretisch zu erwarten, andererseits die Mittendurchbiegung der Platte kleiner bleibt.

Es erscheint deshalb sinnvoll, die Randaufweitung nicht als Minderung des Einwirkungsgrades heranzuziehen. Insbesondere solange diese Aufweitung nicht planmäßig vorgesehen wird, sondern im Gegenteil die Lebensdauer des Isolierglases wesentlich beeinträchtigen kann.

7.3 Die Spannung in der Klebefuge

Die Bemessung der Klebefuge erfolgt üblicherweise durch einen Spannungsnachweis. Da eine realitätsnahe Beschreibung der Spannungsverteilung in der Klebefuge bisher auf Schwierigkeiten stößt [DiBt92], wird als Nä-

herung eine gleichmäßige Verteilung über die Fugenbreite angenommen. Dies entspricht dem üblichen und empirisch abgesicherten Vorgehen.

Die kritische Beanspruchung der Klebefuge tritt bei Windsog bzw. bei Überdruck im Scheibenzwischenraum auf. Die Klebefuge wird hierbei im wesentlichen auf Zug senkrecht zur Ebene der Glasplatte beansprucht. Bei größerer Durchbiegung der Glasplatte tritt zusätzlich zu dieser Zugbelastung eine Dehnung durch die Verdrehung und die Verkürzung im Auflager auf (Bild 7.8), was zu einer zusätzlichen Beanspruchung führt und berücksichtigt werden muß [Riem93].

Diese Dehnungen können im Rahmen der linearen Theorie mit berücksichtigt werden. Übersteigt die Mittendurchbiegung der Platte die Plattendicke, so liefert die lineare Theorie, entsprechend einer konservativen Abschätzung, für die Verformung zu große Werte. Die Größe der Randlast selbst wird nur wenig beeinflusst. Deshalb werden die Verformungswerte mit Hilfe des Elastizitätsmoduls in eine Spannung umgerechnet und zur Zugspannung addiert. Bezüglich der Problematik der Definition des Elastizitätsmoduls siehe Kapitel 4.

Die Scherung der Klebefuge parallel zur Glaskante durch thermische Dehnung oder Eigengewicht kann durch eine Vergleichsspannung berücksichtigt werden [Sand69]. Dies ist aber bisher nicht üblich bzw. erst bei großen Verformungen der Glasplatte von Bedeutung. Die Scherung parallel zur Glaskante wird deshalb hier nicht behandelt.

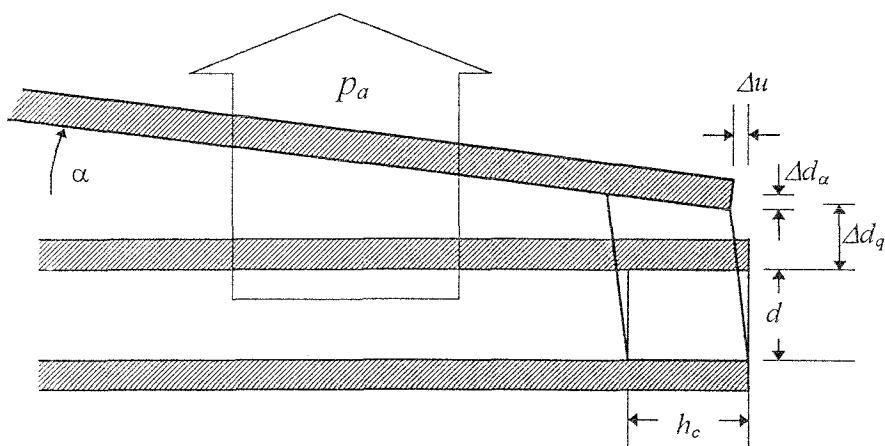


Bild 7.8 Verformung der Klebefuge bei Flächenbelastung der Außenscheibe

Aus der resultierenden Gesamtlast berechnet sich die maximale Randlast in Kantenmitte und daraus die Zugspannung zu

$$\sigma = \frac{p_a \cdot a}{h_c} \cdot A_q(e) \quad \text{Gl. 7.7}$$

dabei ist

- σ Spannung
- p_a resultierende Gesamtlast auf die äußere Glasplatte
- a die Länge der kurzen Kante
- h_c Breite der Klebefuge (siehe Bild 7.8)
- d Dicke der Klebefuge (siehe Bild 7.8)
- A_q Beiwert zwischen 0,43 für $e=1$ (Quadrat) und 0,5 für $e<0,6$

Rechnet man diese Spannung aus der Randlast in eine Dehnung um und addiert die durch Drehung und Randverkürzung erzwungenen Dehnungen (Bild 7.8), so erhält man die Länge der gedehnten Faser und daraus die Gesamtdehnung in erster Ordnung zu:

$$\varepsilon = \frac{p_a \cdot a \cdot A_q}{E \cdot h_c} + 3,3 \cdot \frac{h_c}{2d} \cdot \frac{w}{a} + 3,1 \cdot \left(\frac{w}{d}\right)^2 \cdot \left(\frac{w}{a}\right)^2$$

dabei sind die Bezeichnungen wie in Gl. 7.7 und zusätzlich

- ε Gesamtdehnung
- w Durchbiegung in Mitte der Glasplatte

Der letzte Summand resultiert aus der Auflagerverkürzung und kann vernachlässigt werden. Damit ergibt sich ein verbesserter Ausdruck für die Spannung in der Klebefuge:

$$\sigma = \frac{p_a \cdot a}{h_c} \cdot A_q(e) + 3,3 \cdot E \cdot \frac{h_c}{2d} \cdot \frac{w}{a} \quad \text{Gl. 7.8}$$

dabei ist

- σ maximale Spannung in der Klebefuge
- p_a resultierende Gesamtlast auf die äußere Glasplatte
- a die Länge der kurzen Kante
- w Durchbiegung in Mitte der Glasplatte
- h_c Breite der Klebefuge (siehe Bild 7.8)
- d Dicke der Klebefuge (siehe Bild 7.8)
- A_q Beiwert zwischen 0,43 für $e=1$ (Quadrat) und 0,5 für $e<0,6$
- E der Elastizitätsmodul des Klebstoffes

Während der erste Term mit zunehmender Breite der Klebefuge immer kleiner wird, zeigt der zweite Term, daß eine zu große Breite zu einem Anstieg der Spannung durch Verdrehung führt.

7.4 Vereinfachte Darstellung

7.4.1 Bemessungsgleichung

Zur Bemessung der Breite der Klebefuge sollte ein möglichst einfaches Verfahren angegeben werden. Insbesondere, da die bisherige Bemessungsformel seit langem ohne Probleme angewandt wird. Diese einfache Formel zur Berechnung der Klebefugebreite lautet:

$$h_c = \frac{p \cdot a}{2 \cdot \sigma_{des}}$$

Gl. 7.9

dabei ist

- σ_{des} Bemessungsspannung (Design Load)
- p Gesamtlast
- a Länge der kurzen Kante
- h_c Breite der Klebefuge (siehe Bild 7.8)

Ein Vergleich mit Gleichung Gl. 7.7 zeigt, daß Gl. 7.9 eine Vereinfachung zur sicheren Seite darstellt: der Beiwert wurde mit 0,5 unabhängig vom Seitenverhältnis angenommen. Der Sicherheitsfaktor zwischen Bemessungsspannung und Bruchspannung liegt typischerweise bei 7 und begründet sich im wesentlichen auf Erfahrung mit üblichen bei Structural Glazing eingesetzten Produkten (Silikon).

$$\sigma_{des} = \frac{1}{7} \sigma_{rup}$$

Die verbesserte Bemessungsgleichung Gl. 7.8 läßt sich unter Annahme plausibler konstruktiver Randbedingungen vereinfachen. Begrenzt man das Verhältnis von Breite zu Dicke d der Klebefuge und die Durchbiegung:

$$d \leq h_c \leq 2d \quad \text{und} \quad w \leq \frac{a}{100} \quad \text{Gl. 7.10}$$

so kann der zweite Term eingeschränkt werden. Es gilt:

$$3,3 \cdot E \cdot \frac{h_c}{2d} \cdot \frac{w}{a} \leq 0,033 \cdot E$$

Damit kann die Bemessungsspannung aus den Materialeigenschaften verbessert abgeleitet werden. Unter den in Gl. 7.10 gegebenen Voraussetzungen gilt:

$$\sigma_{des} = \frac{1}{\gamma_M} \sigma_{rup} - 0,033 \cdot E \quad \text{Gl. 7.11}$$

dabei ist

- σ_{des} Bemessungsspannung
- σ_{rup} Bruchlast (5 % Faktile)
- E Elastizitätsmodul

Für typische Materialien (Bruchspannung ca. 1 N/mm²; Elastizitätsmodul ca. 2 N/mm²) ergibt sich bei einem Sicherheitsfaktor von ca. 5 der bekannte Wert der Bemessungsspannung. Das eingeführte Verfahren kann damit bei Beachtung der Bedingungen in Gl. 7.10 und Gl. 7.11 beibehalten werden.

7.4.2 Die Bemessungslast

Die Bemessungslast ist als resultierende Gesamtlast entsprechend Gleichung Gl. 7.3 und den Einwirkungsgraden nach Gl. 7.4 bis 7.6 zu ermitteln. Die Definition des Einwirkungsgrades erlaubt eine übersichtliche Berechnung und die Möglichkeit alle Lasten entsprechend der EUROCODES einzubeziehen. Dabei ist es nach den Ergebnissen in Kapitel 7.3 sinnvoll, den Einfluß der Randaufweitung nicht mit anzusetzen.

Andererseits sind weitere Vereinfachungen gewünscht und wurden bereits vorgeschlagen. So z. B. den Einwirkungsgrad der äußeren Flächenlast (Windlast) auf die Außenscheibe wie folgt zu vereinfachen [EOTA]:

*falls die Dicke der Außenscheibe größer als Dicke der Innenscheibe ($d_a > d_i$),
dann $\eta=1$, sonst $\eta=0,5$*

Diese Vereinfachung ist für hinreichend große Scheiben gültig, muß aber für kleine Scheiben verbessert werden. Vernachlässigt man die Randaufweitung oder andere Maßnahmen zum Ausgleich des Innendruckes, so trägt zur Summe der Nachgiebigkeit des Systems nur die Nachgiebigkeit der Glasplatten bei. Der Nenner der Einwirkungsgrade kann dann auch durch die kritische Kantenlänge a^* ausgedrückt werden:

$$1 + \sum \chi = 1 + \chi_e + \chi_i = 1 + \beta = 1 + \left(\frac{a}{a^*}\right)^4$$

Bei symmetrisch aufgebauten Isolierglas, d. h. Glasplatten gleicher Dicke, gilt außerdem:

$$\chi_e = \chi_i = \frac{\beta}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{a^*}\right)^4$$

Damit schreibt sich die resultierende Gesamtlast bei symmetrischem Isolierglas

$$p_a = \frac{C - \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{a^*}\right)^4\right) \cdot w_a + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{a^*}\right)^4 \cdot w_i}{1 + \left(\frac{a}{a^*}\right)^4} \quad \text{Gl. 7.12}$$

Für hinreichend große ($a \gg a^*$) symmetrische Scheiben kann die 1 gegen $(a/a^*)^4$ vernachlässigt werden und man erhält den einfachen Ausdruck:

$$p_a = C \cdot \left(\frac{a^*}{a}\right)^4 + \frac{1}{2} (-w_a + w_i) \quad \text{Gl. 7.13}$$

dabei ist

- p_a resultierende Gesamtlast auf die äußere Glasplatte
- w_a äußere Flächenlast der äußeren Scheibe
- w_i äußere Flächenlast der inneren Scheibe
- C isochorer Druck
- a Länge der kurzen Kante
- a^* charakteristische Kantenlänge

Falls ein unsymmetrischer Aufbau vorliegt, bei dem die Außenscheibe dicker als die Innenscheibe ist, so ist der Faktor $\frac{1}{2}$ vor der Windlast durch 1 zu ersetzen.

Der isochore Druck C beträgt in der Regel wenigstens 10 kPa, so daß die klimatische Belastung auch noch bei Scheiben mit einer kurzen Kante von der doppelten Länge der charakteristischen Kantenlänge wesentlich ist. Erst bei Scheiben mit $a > 3a^*$ kann der Klimaeinfluß meist vernachlässigt werden.

Die charakteristische Länge ist damit ein wesentliches Kriterium zur Abschätzung der klimatischen Belastung und auch der Gültigkeit der mittragenden Wirkung. In Tabelle 7.1 sind die charakteristischen Längen a^* für übliche Isolierglasaufbauten zusammengestellt.

Tabelle 7.1 Charakteristische Kantenlänge in mm für einige typische Isolierglasaufbauten

d_a in mm	SZR in mm	d_i in mm	Seitenverhältnis			
			0,33	0,50	0,66	1,0
4	12	4	254	271	290	343
6	12	4	283	302	324	382
8	12	4	293	313	335	396
4	16	4	273	291	312	369
6	16	4	304	324	348	411
8	16	4	315	336	360	426
6	12	6	344	367	393	465
8	12	6	375	400	429	506
10	12	6	389	416	446	527
6	16	6	370	394	423	500
8	16	6	402	429	460	544
10	16	6	418	447	479	566
8	12	8	427	455	488	577
10	12	8	458	488	527	619
8	16	8	459	489	525	620
10	16	8	492	525	563	665
10	12	10	504	538	577	682
12	12	10	535	571	612	724
10	16	10	542	578	620	733
12	16	10	575	614	658	778

7.5 Beispiel

Vorbemerkung:

Die Belastungen sind so gewählt, daß sich die ungünstigste Überlagerung ergibt, d. h. Windsog, Temperaturerhöhung, niedriger Luftdruck, hoher Einbaort.

Scheibe 1

Abmessungen Breite 1,0 m Höhe 1,5 m Seitenverhältnis 2:3
vierseitige Lagerung

Aufbau 6/12/6

Charakteristische Kantenlänge (nach Tabelle 7.1): 393 mm

Nachgiebigkeit (siehe Anhang)

$$\chi_e = \chi_i = 20$$

Einwirkungsgrad (Gl. 7.4 bis 7.6)

- Klima

$$\eta_{a,C} = \frac{1}{1 + \sum \chi} = \frac{1}{1 + 20 + 20} = 0,024$$

alternativ

$$\eta_{a,C} = \frac{1}{1 + (a/a^*)^4} = \frac{1}{1 + (1000/393)^4} = 0,023$$

- Flächenlast außen

$$\eta_{a,a} = -\frac{1 + \chi_i}{1 + \sum \chi} = -\frac{1 + 20}{1 + 20 + 20} = -0,51$$

- Flächenlast innen

$$\eta_{a,i} = \frac{\chi_i}{1 + \sum \chi} = \frac{20}{1 + 20 + 20} = 0,49$$

Einwirkung		Beiwert	Grundlast in kPa	Einwirkungs- grad	Last in kPa
<i>Wind</i>					
außen	1,3 kPa	-2,0	-2,6	-0,51	1,33
innen	0	0		0,49	0
<i>Klima</i>					
Temperatur	+30 K	0,34 kPa/K	10	0,024	0,24
Luftdruck	-40 hPa	-1	4	0,024	0,10
Höhendifferenz	+200 m	0,012 kPa/m	2,4	0,024	0,06
resultierende Gesamtlast					1,73

Einwirkung		Beiwert	Grundlast in kPa	Einwirkungs- grad	Last in kPa
<i>Wind</i>					
außen	1,3 kPa	-2,0	-2,6	-0,59	1,53
innen	0	0		0,49	0
<i>Klima</i>					
Temperatur	30 K	0,34 kPa/K	10	0,19	1,90
Luftdruck	40 hPa	1	4	0,19	0,76
Höhendifferenz	200 m	0,012 kPa/m	2,4	0,19	0,46
resultierende Gesamtlast					4,65

Fugenbreite bei Einhaltung von

$$e \leq h_c \leq 2e \quad \text{und} \quad w \leq \frac{a}{100}$$

$$h_c = \frac{p_a \cdot a}{2 \cdot \sigma_{des}} = \frac{4,65 \text{ kPa} \cdot 0,5 \text{ m}}{2 \cdot 0,14 \text{ N/mm}^2} = 8,3 \text{ mm}$$

Kontrolle der Durchbiegung

$$w = \frac{p_a \cdot a^4}{K} A_w = \frac{4,65 \text{ kPa} \cdot (0,5 \text{ m})^4}{1320 \text{ Nm}} 0,00772 = 1,7 \text{ mm} \leq \frac{a}{100}$$

8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, daß für Isolierglas bei Structural Glazing die klimatische Belastung und die mittragende Wirkung der inneren Scheibe einheitlich und übersichtlich berechnet werden können. Gerade bei kleinen Scheiben dürfen die klimatischen Belastungen keinesfalls unbeachtet bleiben. Eine Abgrenzung wird durch die anschauliche Größe der charakteristischen Kantenlänge a^* gegeben, eine Größe die für jeden Isolierglasaufbau durch Glasdicken und Scheibenzwischenraum bestimmt ist. Für Scheiben mit einer Länge der kurzen Kante größer der dreifachen charakteristischen Länge ist die Klimalast ohne Bedeutung und eine Windlastverteilung entsprechend der Biegesteifigkeit möglich. /s

Für kleinere Scheiben, insbesondere in der Nähe der charakteristischen Länge, dominiert dagegen der Klimaeinfluß und kann zu erheblichen Belastungen führen. Diese Belastungen können durch die Elastizität des Randverbundes gemindert werden. Solange der Randverbund nicht gezielt auf eine mögliche Randaufweitung konzipiert wird, ist damit eine Reduktion der Lebensdauer des Isolierglases verbunden. Die Nachgiebigkeit des Randverbundes sollte deshalb zur Zeit nicht planmäßig angesetzt werden.

Zur Berechnung der effektiven Flächenlasten aus Klimaeinflüssen und Wind eignet sich die neue definierte Größe des Einwirkungsgrades besonders gut. Dieser läßt sich auf einfache Weise aus der Nachgiebigkeit des Systems berechnen. Das Konzept der Einwirkungsgrade erlaubt es auch, Teilsicherheitsbeiwerte und Lastkombinationsbeiwerte entsprechend der EUROCODES in das Bemessungskonzept mit einzubeziehen.

Literatur

- Timo59 Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S.:
Theory of Plates and Shells.
McGraw-Hill Book Company, Inc., Inc., New York, N.Y., 1959
- Kais36 Kaiser, R.:
Rechnerische und experimentelle Ermittlung der Durchbiegungen
und Spannungen von quadratischen Platten bei freier Auflagerung
an den Rändern, gleichmäßig verteilter Last und großer Ausbie-
gung.
Z.F.a.M.M. Bd 16, Heft 2, 1936
- Kath58 Katheder, F.:
Über die mechanische Belastbarkeit gekoppelter Glassysteme mit
Luft- oder Gaseinschluß.
Glastechn. Ber. 31. Jahrgang, Heft 3, 1958
- Vall83 Vallabhan, C. V. G.:
Iterative Analysis of nonlinear Glass Plates.
Journal of Structural Engineering, Vol 109, No. 2, 1983
- Vall85 Vallabhan, C. V. G., Wang, B. Y., Ghou, G. D.:
Thin Glass Plates on Elastic Supports.
Journal of Structural Engineering, Vol 111, No. 11, 1985
- Vall86 Vallabhan, C. V. G., Ghou, G. D.:
Interactive nonlinear Analysis of Insulating Glass Units.
Journal of Structural Engineering, Vol 112, No. 6, 1986
- Sand89 Sandberg, L. B., Ahlborn, T. M.:
Combined Stress Behavior of Structural Glazing Joints.
Journal of Structural Engineering, Vol 115, No. 5, 1989
- DIBt92 Krüger, G., Völkel, G. E., Wohlfahrt, R.:
Untersuchung der Beanspruchung in der Klebefuge eines Struc-
tural Glazing-Elements.
Bericht zum Forschungsvorhaben, Institut für Bautechnik, Berlin,
1992

- EOTA EOTA Guideline:
Structural Sealant Glazing.
DOC WG 94/11, Nov 94
- Flor53 Flory, P.:
Principle of polymer chemistry, Cornell Univ. Press, N.Y., USA
1953
- Girk78 Girkmann, K.:
Flächentragwerke.
Springer Verlag, Wien New York, 1978
- Marg 75 Marguerre, K.; Woernle, H.-I.:
Elastische Platten.
B.I. Wissenschaftsverlag, Zürich, 1975
- Riem93 Riemann, H.:
Vorschlag zur Bemessung, CEN/TC 129/WG 16/ ad hoc group
statics

Anhang

Tabelle der
Nachgiebigkeit

SZR 8 mm

8

d= 4 mm

d= 6 mm

d= 8 mm

d= 10 mm

a in m	c in MPa			1:1 2:3 1:2 1:3				1:1 2:3 1:2 1:3				1:1 2:3 1:2 1:3				1:1 2:3 1:2 1:3				
	2	5	10	0,020	0,037	0,050	0,065	0,020	0,037	0,050	0,065	0,020	0,037	0,050	0,065	0,020	0,037	0,050	0,065	
0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,63	0,25	0,13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	1,25	0,50	0,25	0,1	0,2	0,2	0,3	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,3	1,88	0,75	0,38	0,5	0,8	1,1	1,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
0,4	2,50	1,00	0,50	1,4	2,6	3,6	4,6	0,4	0,8	1,1	1,4	0,2	0,3	0,4	0,6	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3
0,5	3,13	1,25	0,63	3,5	6,5	8,7	11,3	1,0	1,9	2,6	3,4	0,4	0,8	1,1	1,4	0,2	0,4	0,6	0,7	0,7
0,6	3,75	1,50	0,75	7,2	13,4	18,1	23,5	2,1	4,0	5,4	7,0	0,9	1,7	2,3	2,9	0,5	0,9	1,2	1,5	1,5
0,7	4,38	1,75	0,88	13,4	24,8	33,5	43,5	4,0	7,3	9,9	12,9	1,7	3,1	4,2	5,4	0,9	1,6	2,1	2,8	2,8
0,8	5,00	2,00	1,00	23	42	57	74	6,8	12,5	16,9	22,0	2,9	5,3	7,1	9,3	1,5	2,7	3,7	4,8	4,8
0,9	5,63	2,25	1,13	37	68	92	119	10,8	20,1	27,1	35,3	4,6	8,5	11,4	14,9	2,3	4,3	5,9	7,6	7,6
1,0	6,25	2,50	1,25	56	103	140	181	17	31	41	54	7,0	12,9	17,4	22,7	3,6	6,6	8,9	11,6	11,6
1,1	6,88	2,75	1,38	82	151	204	266	24	45	61	79	10,2	18,9	25,5	33,2	5,2	9,7	13,1	17,0	17,0
1,2	7,50	3,00	1,50	116	214	289	376	34	63	86	111	14,5	26,8	36,2	47,0	7,4	13,7	18,5	24,1	24,1
1,3	8,13	3,25	1,63	159	295	398	518	47	87	118	153	19,9	36,9	49,8	64,7	10,2	18,9	25,5	33,2	33,2
1,4	8,75	3,50	1,75	214	397	536	697	64	118	159	206	27	50	67	87	13,7	25,4	34,3	44,6	44,6
1,5	9,4	3,8	1,9	283	523	706	918	84	155	209	272	35	65	88	115	18,1	33,4	45,2	58,8	58,8
1,6	10,0	4,0	2,0	366	677	914	1189	108	200	271	352	46	85	114	149	23	43	59	76	76
1,7	10,6	4,3	2,1	466	862	1165	1515	138	255	345	449	58	108	146	189	30	55	75	97	97
1,8	11,3	4,5	2,3	586	1084	1465	1904	174	321	434	564	73	135	183	238	37	69	94	122	122
1,9	11,9	4,8	2,4	727	1345	1818	2364	215	399	539	700	91	168	227	295	47	86	116	151	151
2,0	12,5	5,0	2,5	893	1652	2232	2902	265	489	661	860	112	206	279	363	57	106	143	186	186

Tabelle der
Nachgiebigkeit

SZR 12 mm

12

d= 4 mm

d= 6 mm

d= 8 mm

d= 10 mm

a in m	c in MPa			1:1				2:3				1:2				1:3				
	2	5	10	0,020	0,037	0,050	0,065	0,020	0,037	0,050	0,065	0,020	0,037	0,050	0,065	0,020	0,037	0,050	0,065	
0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,42	0,17	0,08	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	0,83	0,33	0,17	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,3	1,25	0,50	0,25	0,3	0,6	0,8	1,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	
0,4	1,67	0,67	0,33	1,0	1,8	2,4	3,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2	
0,5	2,08	0,83	0,42	2,3	4,3	5,8	7,6	0,7	1,3	1,7	2,2	0,3	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,4	0,5	
0,6	2,50	1,00	0,50	4,8	8,9	12,1	15,7	1,4	2,6	3,6	4,6	0,6	1,1	1,5	2,0	0,3	0,6	0,8	1,0	
0,7	2,92	1,17	0,58	8,9	16,5	22,3	29,0	2,6	4,9	6,6	8,6	1,1	2,1	2,8	3,6	0,6	1,1	1,4	1,9	
0,8	3,33	1,33	0,67	15	28	38	50	4,5	8,4	11,3	14,7	1,9	3,5	4,8	6,2	1,0	1,8	2,4	3,2	
0,9	3,75	1,50	0,75	24	45	61	79	7,2	13,4	18,1	23,5	3,1	5,6	7,6	9,9	1,6	2,9	3,9	5,1	
1,0	4,17	1,67	0,83	37	69	93	121	11,0	20,4	27,6	35,8	4,7	8,6	11,6	15,1	2,4	4,4	6,0	7,7	
1,1	4,58	1,83	0,92	54	101	136	177	16,1	29,9	40,3	52,5	6,8	12,6	17,0	22,1	3,5	6,4	8,7	11,3	
1,2	5,00	2,00	1,00	77	143	193	251	22,9	42,3	57,1	74,3	9,6	17,8	24,1	31,3	4,9	9,1	12,3	16,0	
1,3	5,42	2,17	1,08	106	197	266	345	31	58	79	102	13,3	24,6	33,2	43,2	6,8	12,6	17,0	22,1	
1,4	5,83	2,33	1,17	143	264	357	464	42	78	106	138	17,9	33,0	44,7	58,1	9,1	16,9	22,9	29,7	
1,5	6,25	2,50	1,25	188	348	471	612	56	103	140	181	23,5	43,6	58,9	76,5	12,1	22,3	30,1	39,2	
1,6	6,67	2,67	1,33	244	451	610	792	72	134	181	235	30	56	76	99	15,6	28,9	39,0	50,7	
1,7	7,08	2,83	1,42	311	575	777	1010	92	170	230	299	39	72	97	126	19,9	36,8	49,7	64,6	
1,8	7,50	3,00	1,50	391	722	976	1269	116	214	289	376	49	90	122	159	25	46	62	81	
1,9	7,92	3,17	1,58	485	897	1212	1576	144	266	359	467	61	112	152	197	31	57	78	101	
2,0	8,33	3,33	1,67	595	1101	1488	1935	176	326	441	573	74	138	186	242	38	70	95	124	

Tabelle der
Nachgiebigkeit

SZR 16 mm

16

d= 4 mm

d= 6 mm

d= 8 mm

d= 10 mm

a in m	c in MPa			1:1				2:3				1:2				1:3				
	2	5	10	0,020	0,037	0,050	0,065	0,020	0,037	0,050	0,065	0,020	0,037	0,050	0,065	0,020	0,037	0,050	0,065	
0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,31	0,13	0,06	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	0,63	0,25	0,13	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,3	0,94	0,38	0,19	0,2	0,4	0,6	0,7	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,4	1,25	0,50	0,25	0,7	1,3	1,8	2,3	0,2	0,4	0,5	0,7	0,1	0,2	0,2	0,3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
0,5	1,56	0,63	0,31	1,7	3,2	4,4	5,7	0,5	1,0	1,3	1,7	0,2	0,4	0,5	0,7	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4
0,6	1,88	0,75	0,38	3,6	6,7	9,0	11,8	1,1	2,0	2,7	3,5	0,5	0,8	1,1	1,5	0,2	0,4	0,6	0,8	0,8
0,7	2,19	0,88	0,44	6,7	12,4	16,7	21,8	2,0	3,7	5,0	6,5	0,8	1,5	2,1	2,7	0,4	0,8	1,1	1,4	1,4
0,8	2,50	1,00	0,50	11	21	29	37	3,4	6,3	8,5	11,0	1,4	2,6	3,6	4,6	0,7	1,4	1,8	2,4	2,4
0,9	2,81	1,13	0,56	18	34	46	59	5,4	10,0	13,6	17,6	2,3	4,2	5,7	7,4	1,2	2,2	2,9	3,8	3,8
1,0	3,13	1,25	0,63	28	52	70	91	8,3	15,3	20,7	26,9	3,5	6,5	8,7	11,3	1,8	3,3	4,5	5,8	5,8
1,1	3,44	1,38	0,69	41	76	102	133	12,1	22,4	30,3	39,3	5,1	9,4	12,8	16,6	2,6	4,8	6,5	8,5	8,5
1,2	3,75	1,50	0,75	58	107	145	188	17,1	31,7	42,9	55,7	7,2	13,4	18,1	23,5	3,7	6,9	9,3	12,0	12,0
1,3	4,06	1,63	0,81	80	147	199	259	24	44	59	77	10,0	18,4	24,9	32,4	5,1	9,4	12,8	16,6	16,6
1,4	4,38	1,75	0,88	107	198	268	348	32	59	79	103	13,4	24,8	33,5	43,5	6,9	12,7	17,2	22,3	22,3
1,5	4,69	1,88	0,94	141	261	353	459	42	77	105	136	17,7	32,7	44,1	57,4	9,0	16,7	22,6	29,4	29,4
1,6	5,00	2,00	1,00	183	338	457	594	54	100	135	176	23	42	57	74	11,7	21,7	29,3	38,0	38,0
1,7	5,31	2,13	1,06	233	431	583	757	69	128	173	224	29	54	73	95	14,9	27,6	37,3	48,5	48,5
1,8	5,63	2,25	1,13	293	542	732	952	87	161	217	282	37	68	92	119	19	35	47	61	61
1,9	5,94	2,38	1,19	364	673	909	1182	108	199	269	350	45	84	114	148	23	43	58	76	76
2,0	6,25	2,50	1,25	446	826	1116	1451	132	245	331	430	56	103	140	181	29	53	71	93	93

Tabelle der
Nachgiebigkeit

SZR 20 mm

20

d= 4 mm

d= 6 mm

d= 8 mm

d= 10 mm

a in m	c in MPa			1:1				2:3				1:2				1:3				
	2	5	10	0,020	0,037	0,050	0,065	0,020	0,037	0,050	0,065	0,020	0,037	0,050	0,065	0,020	0,037	0,050	0,065	
0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,25	0,10	0,05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	0,50	0,20	0,10	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,3	0,75	0,30	0,15	0,2	0,3	0,5	0,6	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,4	1,00	0,40	0,20	0,6	1,1	1,4	1,9	0,2	0,3	0,4	0,6	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
0,5	1,25	0,50	0,25	1,4	2,6	3,5	4,5	0,4	0,8	1,0	1,3	0,2	0,3	0,4	0,6	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3
0,6	1,50	0,60	0,30	2,9	5,4	7,2	9,4	0,9	1,6	2,1	2,8	0,4	0,7	0,9	1,2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,6
0,7	1,75	0,70	0,35	5,4	9,9	13,4	17,4	1,6	2,9	4,0	5,2	0,7	1,2	1,7	2,2	0,3	0,6	0,9	1,1	1,1
0,8	2,00	0,80	0,40	9	17	23	30	2,7	5,0	6,8	8,8	1,1	2,1	2,9	3,7	0,6	1,1	1,5	1,9	1,9
0,9	2,25	0,90	0,45	15	27	37	48	4,3	8,0	10,8	14,1	1,8	3,4	4,6	5,9	0,9	1,7	2,3	3,0	3,0
1,0	2,50	1,00	0,50	22	41	56	73	6,6	12,2	16,5	21,5	2,8	5,2	7,0	9,1	1,4	2,6	3,6	4,6	4,6
1,1	2,75	1,10	0,55	33	60	82	106	9,7	17,9	24,2	31,5	4,1	7,6	10,2	13,3	2,1	3,9	5,2	6,8	6,8
1,2	3,00	1,20	0,60	46	86	116	150	13,7	25,4	34,3	44,6	5,8	10,7	14,5	18,8	3,0	5,5	7,4	9,6	9,6
1,3	3,25	1,30	0,65	64	118	159	207	19	35	47	61	8,0	14,7	19,9	25,9	4,1	7,5	10,2	13,3	13,3
1,4	3,50	1,40	0,70	86	159	214	279	25	47	64	83	10,7	19,8	26,8	34,8	5,5	10,2	13,7	17,8	17,8
1,5	3,75	1,50	0,75	113	209	283	367	33	62	84	109	14,1	26,1	35,3	45,9	7,2	13,4	18,1	23,5	23,5
1,6	4,00	1,60	0,80	146	271	366	475	43	80	108	141	18	34	46	59	9,4	17,3	23,4	30,4	30,4
1,7	4,25	1,70	0,85	186	345	466	606	55	102	138	180	23	43	58	76	11,9	22,1	29,8	38,8	38,8
1,8	4,50	1,80	0,90	234	433	586	762	69	128	174	226	29	54	73	95	15	28	37	49	49
1,9	4,75	1,90	0,95	291	538	727	945	86	159	215	280	36	67	91	118	19	34	47	61	61
2,0	5,00	2,00	1,00	357	661	893	1161	106	196	265	344	45	83	112	145	23	42	57	74	74

Anlage

EOTA Guideline: Structural Sealant Glazing, Doc WG 94/11

APPENDIX 2

Calculation Of The Bite Of The Structural Seal And The Structural
Hermetic Seal

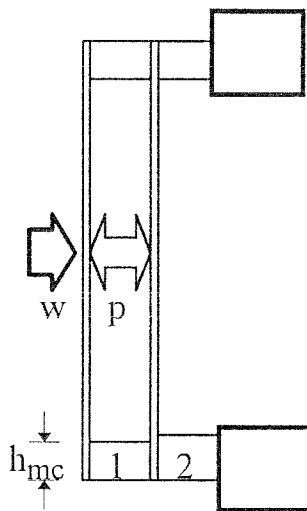
Comments to

EOTA Guideline: Structural Sealant Glazing, Doc WG 94/11

APPENDIX 2

Calculation Of The Bite Of The Structural Seal And The Structural Hermetic Seal

1. Problem



w Windload in kN/m² or kPa
(wind pressure: $w > 0$; suction: $w < 0$)

p Pressure inside the unit in kN/m² or kPa
(more precise: Pressure difference between the gap and the exterior)

1 Structural hermetic seal

2 Structural seal

h_{mc} Bite of the seal 1 or 2
(may be different)

How to determine the bite h_{mc} for seal 1 and 2 ?

The bite of the hermetic seal may be smaller according to the transfer of the windload by the interior pressure of the unit, but effects of temperature and the change of atmospheric pressure must also taken into account.

The following method is a proposal to solve the problem.

Abbreviations:

Unit

Insulating glass unit

a	Length of the short edge of the unit	m
b	Length of the long edge of the unit	m
s	Width of air gap	m
h_{mc}	Bite of the structural seal	m
e	Thickness of the structural seal	m
E_S	Young's Modulus of sealant	Pa
d_e	Thickness of the exterior glass pane	m
d_i	Thickness of the interior glass pane	m
E_G	Young's Modulus of the glass ($E=7,0 \cdot 10^{10}$ Pa)	Pa
μ	Poisson's number of the glass ($\mu=0,22$)	1
K	Stiffness of a glass pane	Nm
k	Reduced stiffness of the system	Nm
p^*	Characteristic pressure for a given unit	Pa
a^*	Characteristic length for a given unit	m

Climate

p_0	Absolute air pressure by production	kPa
T_0	Absolute temperature by production	K
p_a	Absolute air pressure in site	kPa
T_i	Absolute temperature in the gap in site	K
C_f	Climatic factor	1
w	Windload (pressure $w>0$; suction: $w<0$)	kPa

Reaction of the unit

p	Pressure inside the unit (more precise: Pressure difference between the gap and the exterior)	kPa
f	Deflection of the centre of the pane (Convex deflection caused by high pressure in the unit: $f>0$; therefore, wind pressure $w>0$ results in concave deflection $f<0$)	m
α	Angle at the edge of the pane	rad
q	Load on the edge of the pane	N/m

Coefficients all depending on the aspect ratio a/b

A_f	Centre deflection coefficient	1
A_v	Volume coefficient	1
A_m	Maximum glass stress coefficient	1
A_q	Maximum edge load coefficient	1
A_α	Edge angle coefficient	1

a/b	A_f	A_v	A_m	A_q	A_α	A_α / A_f
1,0	0,00406	0,00170	0,0442	0,432	0,0134	3,30
0,8	0,00603	0,00253	0,0628	0,473	0,0196	3,25
0,6	0,00867	0,00370	0,0869	0,502	0,0280	3,23
0,4	0,01150	0,00516	0,1119	0,509	0,0369	3,21
0,2	0,01297	0,00674	0,1246	0,501	0,0415	3,20
0,0	0,01302	0,00833	0,125	0,500	0,0417	3,20

1. Pressure inside the unit induced by wind and climate

1.1. Characteristics of the unit

1.1.1 The stiffness

The stiffness K_e and K_i of the exterior and the interior pane of the unit and the reduced stiffness k :

$$K_e = \frac{E \cdot d_e^3}{12(1 - \mu^2)}; \quad K_i = \frac{E \cdot d_i^3}{12(1 - \mu^2)}; \quad k = \frac{K_e \cdot K_i}{K_e + K_i}$$

1.1.2 The characteristic length a^*

$$a^* = \sqrt[4]{\frac{s \cdot k}{1 \text{ bar} \cdot A_v}}$$

the insulating glass and the aspect ratio of the unit are independent of the size. It is in the range between 0,26 m for a 4/12/4 system and 0,78 m for a 10/20/10 system, see table

1.1.3 The characteristic pressure p^*

$$p^* = \frac{s \cdot k}{a^4 A_v} = 100 \text{ kPa} \cdot \left(\frac{a^*}{a}\right)^4$$

Table 1

The load distribution for big units ($a \gg a^*$) and the characteristic length a^* for selected types of insulating glass

a* in m		load distribution		s=12 mm				s=20 mm			
				aspect ratio a/b				aspect ratio a/b			
d1	d2			1	0,8	0,6	0,4	1	0,8	0,6	0,4
4	4	0,50	0,50	0,34	0,31	0,28	0,26	0,39	0,35	0,32	0,30
6	6	0,50	0,50	0,47	0,42	0,38	0,35	0,53	0,48	0,44	0,40
8	8	0,50	0,50	0,58	0,52	0,48	0,44	0,66	0,59	0,54	0,50
10	10	0,50	0,50	0,68	0,62	0,56	0,52	0,78	0,70	0,64	0,59
4	6	0,23	0,77	0,38	0,35	0,31	0,29	0,43	0,39	0,36	0,33
4	8	0,11	0,89	0,40	0,36	0,33	0,30	0,45	0,41	0,37	0,34
4	10	0,06	0,94	0,40	0,36	0,33	0,30	0,46	0,41	0,38	0,35
6	8	0,30	0,70	0,51	0,46	0,42	0,38	0,58	0,52	0,47	0,44
6	10	0,18	0,82	0,53	0,48	0,43	0,40	0,60	0,54	0,49	0,45

1.2 Temperature and atmospheric pressure

1.2.1 The climatic factor

The climatic factor C_f merges the influence of temperature, meteorological pressure and altitude. A change in the altitude results in a pressure change of about 12,5 Pa/m.

$$C_f = \frac{T_i}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p_a} - 1$$

If you assume a production at 400 m altitude and normal climatic conditions $T_0 = 20 \text{ °C} = 293 \text{ K}$ and $p(\text{sealevel})=101,3 \text{ kPa}$ that is $p_0(400 \text{ m}) = 963 \text{ kPa}$ the table shows the climatic factor for different conditions at site

Table 2
 Climatic factor C_f

Cf	high pressure 110,3 kPa					low pressure 92,3 kPa				
	altitude in m					altitude in m				
	0	200	400	600	800	0	200	400	600	800
T in °C										
-20	-0,25	-0,23	-0,21	-0,19	-0,17	-0,10	-0,07	-0,05	-0,02	0,01
0	-0,19	-0,17	-0,15	-0,13	-0,11	-0,03	0,00	0,03	0,06	0,09
20	-0,13	-0,11	-0,09	-0,06	-0,04	0,04	0,07	0,10	0,14	0,17
40	-0,07	-0,05	-0,02	0,00	0,03	0,11	0,15	0,18	0,21	0,25
60	-0,01	0,02	0,04	0,06	0,09	0,19	0,22	0,25	0,29	0,33

1.2.2 The maximum pressure

The maximum possible pressure in the gap will occur if the unit is completely rigid (assume constant volume) :

$$p_{\max} = p_a \cdot C_f$$

1.3. Pressure inside the unit induced by climate and wind

1.3.1. Exact formula

Exact and complete formula including climatic change C_f and wind suction w

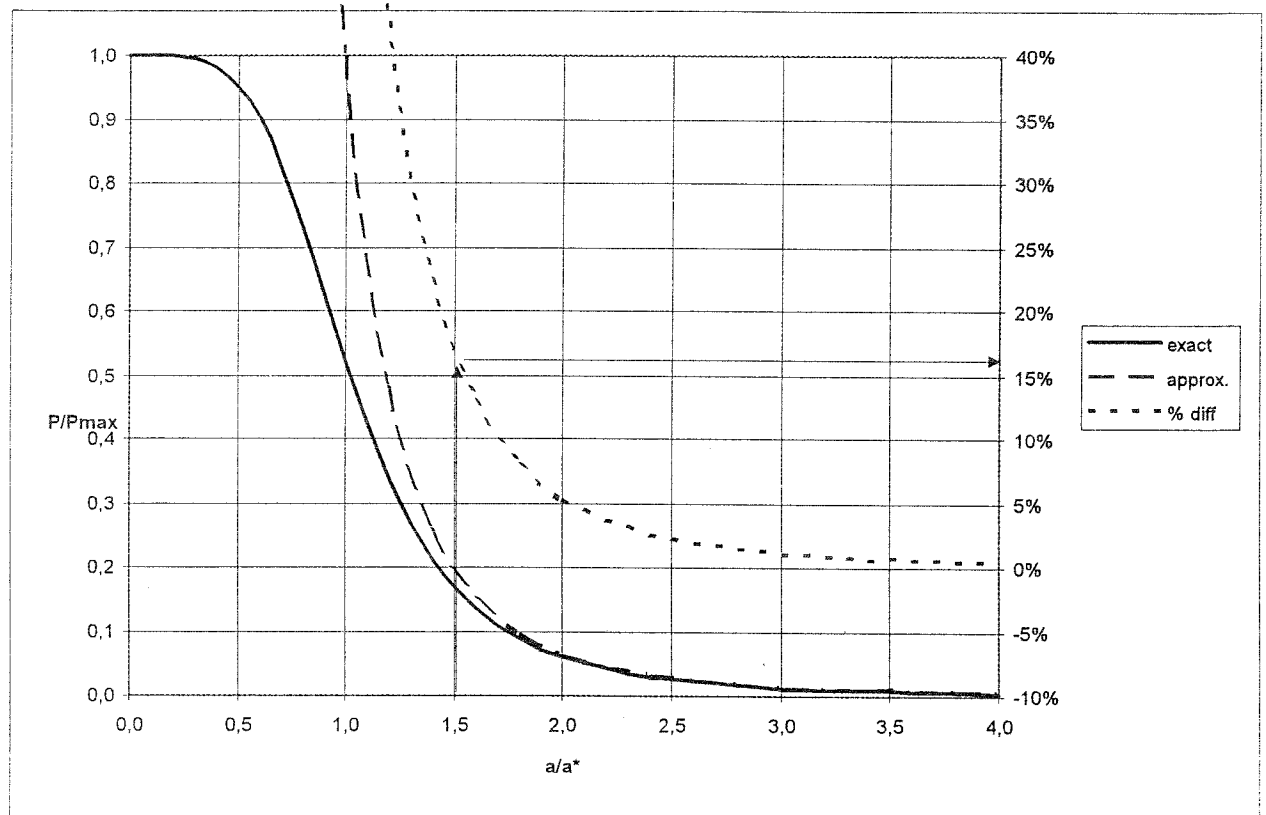
$$p = \frac{p_a}{2} \left\{ \sqrt{\left(1 - \frac{p^*}{p_a} + \frac{k}{K_e} \frac{w}{p_a}\right)^2 + 4 \cdot (1 + C_f) \cdot \frac{p^*}{p_a}} - \left(1 + \frac{p^*}{p_a} - \frac{k}{K_e} \frac{w}{p_a}\right) \right\}$$

1.3.2 Approximate formula

In most cases, the short length a of the unit is much bigger than the characteristic length a^* (see table above). In this case the following formula is applicable:

$$\text{if } a \gg a^* \text{ then } p = p^* \cdot C_f + \frac{k}{K_e} w = 100 \text{ kPa} \cdot \left(\frac{a^*}{a}\right)^4 \cdot C_f + \frac{k}{K_e} w$$

The quality of the approximation is shown in the following figure. For $a = 1.5 a^*$ the deviation is about +15%, for $a > 2a^*$ the deviation is neglectable.



1.4. Load to the exterior pane induced by climate and wind

The total load to the exterior pane is given by the superposition of wind and climate:

$$P_{tot} = p - w$$

where p is given by 1.3.1. If the length of the small edge is bigger than the characteristic length (see table 1), the load is simply given by

$$\text{if } a > 1,5 \cdot a^* \text{ then } P_{tot} = 100 \text{ kPa} \cdot \left(\frac{a^*}{a}\right)^4 \cdot C_f - \frac{K_e}{K_e + K_i} \cdot w$$

This result is in agreement with the classical load distribution but considers the climatic effects.

Example:

Size $0,90 \times 1,20 \text{ m}^2$; normal production at 400 m altitude

Wind suction $w = -2,0 \text{ kPa}$

Climate: altitude 600 m; worst case: low pressure, high temperature: $C_f = 0,29$

Aspect ratio $a/b = 900/1200 = 0,75$

for a system 6/12/6 resulting in (Table 1): $a^* = 0,42 \text{ m}$ and a load distribution of 50:50

$$P_{tot} = 100 \text{ kPa} \cdot \left(\frac{0,42}{0,90}\right)^4 \cdot 0,29 - 0,50 \cdot (-2 \text{ kPa}) = 1,38 \text{ kPa} + 1,00 \text{ kPa} = 2,38 \text{ kPa}$$

for a system 6/12/4 resulting in (Table 1): $a^* = 0,35 \text{ m}$ and a load distribution of 77:23

$$P_{tot} = 100 \text{ kPa} \cdot \left(\frac{0,35}{0,90}\right)^4 \cdot 0,29 - 0,77 \cdot (-2 \text{ kPa}) = 0,66 \text{ kPa} + 1,54 \text{ kPa} = 2,20 \text{ kPa}$$

2. Reactions of the exterior pane induced by climate and wind

2.1 Deflection in the centre of the outer pane

$$f = p_{tot} \frac{a^4}{K_e} A_w(e)$$

2.2 Edge angle of the pane

$$\alpha = p_{tot} \frac{a^3}{K_e} A_\alpha(e) = \frac{f A_\alpha(e)}{a A_f(e)}$$

since the value $A_\alpha/A_f = 3,30$ (for $a/b=1$) is nearly constant, see table, a simplification is possible

$$\alpha = 3,30 \cdot \frac{f}{a}$$

2.3 Load at the edge of the pane

$$q = p_{tot} a A_q(e)$$

as A_q varies only between 0,43 and 0,50 the following formula is on the save side

$$q = 0,5 \cdot p_{tot} \cdot a$$

3. Design of the structural sealant

The classical design formula is based on (2.3) considering $A_q=0,5$

$$\sigma = \frac{q}{h_{mc}} = \frac{0,5 \cdot p_{tot} a}{h_{mc}}$$

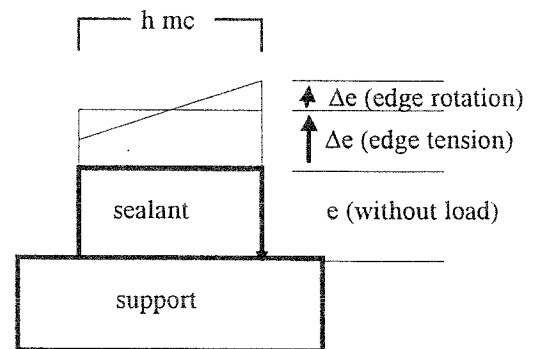
or
$$h_{mc} = \frac{p_{tot} a}{2 \cdot \sigma_{des}} \quad (*)$$

Following the idea of including the edge angle of the pane (2.2) the result is

$$\sigma = \frac{q}{h_{mc}} + \frac{h_{mc}}{2 \cdot e} \cdot E_s \cdot \alpha = \frac{q}{h_{mc}} + \frac{h_{mc}}{2 \cdot e} \cdot E_s \cdot 3,3 \cdot \frac{f}{a}$$

requiring that the deflection is limited to $f/a < 1/100$ and that the bite h_{mc} is less than twice the thickness e of the seal: $h_{mc} \leq 2e$ the second term is limited and the result is

$$\sigma = \frac{q}{h_{mc}} + 0,033 \cdot E_s$$



Therefore, it is possible to use the classic design formula (*) considering a reduced design stress σ'_{des} :

$$\sigma'_{des} = \frac{R_{u,5\%}}{\gamma_M} - 0,033 \cdot E_s$$

For example: if $R_{u,5\%} = 0,84 \text{ N/mm}^2$ and a safety factor $\gamma_M=3$ is assumed, the following σ'_{des} : results

Youngs Modulus in N/mm^2	1,0	2,0	3,0	4,0
Reduced design stress σ'_{des} in N/mm^2	0,25	0,21	0,18	0,15

T 8634

Résumé

Les Vitrages Extérieurs Collés (VEC) (connus aussi sous la dénomination Structural Sealant Glazing Systems) présentent un nouveau type de façade lors duquel les vitrages ne sont plus supportés mécaniquement mais mis en oeuvre par collage. C'est donc le joint de collage qui doit transmettre les charges appliquées et être dimensionné de manière correspondante. Au cas où ce sont des vitrages isolants qui sont collés sur le support et que le système de liaison entre les verres contribue aussi à la transmission des charges appliquées ceci s'applique aussi au collage du système de liaison entre les verres.

Lors des vitrages isolés une variation de température ou une variation de pression atmosphérique résulte dans une différence de pression entre l'espace entre les verres et l'environnement extérieur. Ces charges dues aux conditions climatiques conduisent à une sollicitation supplémentaire considérable du collage. De l'autre côté, le volume de gaz inclus dans l'espace entre les verres du vitrage isolant conduit à un couplage mécanique des deux verres et réduit ainsi les sollicitations résultant des charges dues au vent.

Le comportement élastique des bords du vitrage isolant est caractérisé par deux paramètres et la théorie en vigueur jusqu'à présent est élargie de manière correspondante. C'est ainsi que, basés sur la théorie des plaques linéaires, les deux actions peuvent être transmises ensemble. Il se montre que les équations résultantes peuvent être approchées l'une de l'autre d'une précision suffisante en utilisant des expressions beaucoup plus simples.

Les paramètres ont été déterminés expérimentalement sur des éprouvettes de systèmes de liaison entre les verres typiques. On constate que dû à l'élasticité des bords les sollicitations climatiques ne sont réduites que faiblement.

Ce sont surtout les verres de dimension petite qui sont sollicités le plus par les variations climatiques tandis que l'effet supplémentaire de reprise des charges ne prend effet que dans le cas de vitrages isolants de grandes dimensions. C'est pour cette raison que les résultats obtenus avec le modèle théorique ont été vérifiés dans un essai d'éléments de structure sur un vitrage de petite dimension. L'essai a résulté dans une concordance excellente.

C'est ainsi que la sollicitation climatique ainsi que l'effet supplémentaire de reprise des charges peuvent être calculés à l'aide d'une procédure simple et sûre. Et, en particulier dans le cas des vitrages extérieurs collés, le comportement du vitrage isolé doit être pris en considération lors du dimensionnement du système de liaison des verres.