

Druckdifferenz berechnen (Teil 2):

Klimabelastung bei Isolierglas

Franz Feldmeier

Vereinfachte Darstellung

Grundlage

In Grundgleichung (13) gehen die unterschiedlichen Einwirkungen in so unübersichtlicher Weise ein, daß die übliche lineare Superposition nicht mehr möglich erscheint. Glücklicherweise läßt sich das vorliegende System aber schrittweise vereinfachen. Hierzu werden geeignete dimensionslose Hilfsgrößen definiert, die Gleichungen danach entwickelt und der verbleibende Fehler abgeschätzt; Einzelheiten sind in [5] dargestellt. Es zeigt sich, daß für praxisrelevante Bedingungen der Linearisierungsfehler im Rahmen der Genauigkeit der Einwirkungen vernachlässigbar ist.

Man erhält schließlich einen einfachen Ausdruck für die gesuchte Druckdifferenz, in die alle Belastungsgrößen linear additiv eingehen. Mithin können auch Klimalasten in ausreichender Näherung wie übliche statische Lastgrößen behandelt werden.

Hilfsgrößen

Die klimatischen Einflüsse lassen sich in einem Klimafaktor C_f zusammenfassen. Dieser Faktor enthält alle klimatisch relevanten Bedingungen bei Produktion und am Einbauort:

$$C_f = \frac{T_E \cdot p_P}{T_P \cdot p_E} - 1 \quad (14)$$

Dabei ist p_E der atmosphärische Druck am Einbauort. Die auf die äußere bzw. innere Scheibe von außen einwirkenden Flächenlasten lassen sich ebenfalls zu einem Faktor W_f zusammenfassen:

$$W_f = \frac{p_i \cdot K_a + p_a \cdot K_i}{p_E \cdot (K_a + K_i)} \quad (15)$$

Die Flächenlasten tragen entsprechend der jeweiligen Biegesteifigkeit der Einzelscheiben bei und werden ebenfalls auf den atmosphärischen Druck am Einbauort bezogen. Beide Hilfsgrößen bleiben für übliche Änderungen der Temperatur und des Luftdruckes, bzw. für übliche Lasten wesentlich kleiner als 1 und erfüllen damit die notwendige Voraussetzung für eine Näherung.

Zur Vereinfachung der Schreibweise wird noch eine weitere dimensionslose Hilfsgröße eingeführt:

$$S_f = \frac{1}{p_E} \cdot \frac{K_a \cdot K_i}{K_a + K_i} \cdot \frac{s}{a^4 \cdot A_V(e)} \quad (16)$$

Diese Größe charakterisiert die Reaktion des Systems „Isolierglas“ auf Klimaänderung: kleine Werte stehen für ein starres, große Werte für ein nachgiebiges System. Besondere Bedeutung hat der Übergangsbereich, da allgemein gezeigt werden kann [2], daß für $S_f=1$ bei gegebener Klimabelastung die größte Biegespannung der Glasscheibe auftritt. Man definiert daher zusätzlich als *charakteristische* oder *kritische* Kantenlänge die Größe:

$$a^* = 4 \sqrt{\frac{1}{p_E} \cdot \frac{K_a \cdot K_i}{K_a + K_i} \cdot \frac{s}{A_V(e)}} \quad (17)$$

Setzt man hier für den atmosphärischen Druck am Einbauort einheitlich 100 kN/m^2 , so kann der Wert a^* für jeden Scheibenaufbau abhängig vom Seitenverhältnis angegeben werden. Z. B. ergibt sich für den Aufbau 4-12-4 ein Wert zwischen 0,34 m und 0,26 m, siehe Tabelle 2.

Linearisierung

Mit den oben eingeführten Hilfsgrößen läßt sich die Lösung der Grundgleichung (13) in kompakter Form angeben:

$$\Delta p = \frac{p_E}{2} \left\{ \sqrt{[1 - S_f + W_f]^2 + 4 \cdot (1 + C_f) \cdot S_f} - [1 + S_f - W_f] \right\} \quad (18)$$

Die Linearisierung dieses Ausdrucks ergibt nach einiger Rechnung:

$$\Delta p = p_E \cdot \frac{S_f \cdot C_f + W_f}{1 + S_f - W_f} \quad (19)$$

Wie eine genauere Analyse zeigt, tritt die größte Abweichung zum exakten Ergebnis mit $(1+W_f)(C_f+W_f)/8$ bei $S_f=1$ auf. Die Güte der Näherung ist damit für übliche Bedingungen völlig ausreichend.

Eine Linearisierung des Klimafaktors ist ebenfalls möglich, da die verschiedenen Einflüsse, Änderung von Temperatur (Kelvin-Skala) und Druck, relativ klein gegen die Größen selbst sind. Man erhält nach einiger Rechnung:

$$p_0 = p_E \cdot C_f = 0,34 \frac{\text{kPa}}{\text{K}} \cdot (T_E - T_P) - (p_{L,E} - p_{L,P}) + 0,012 \frac{\text{kPa}}{\text{m}} \cdot (h_E - h_P) \quad (20)$$

Dieser Druck entspricht einer Zustandsänderung bei konstantem Volumen und wird daher als *isochorer* Druck bezeichnet. Er kann offensichtlich als Summe der einzelnen Einflüsse aus Temperaturänderung, Luftdruckänderung und Veränderung der Ortshöhe geschrieben werden.

Läßt man Windlasten außer Betracht, so läßt sich die Gleichung für die Druckdifferenz (19) mit Hilfe des isochoren Druckes (20) und der charakteristischen Kantenlänge in Abhängigkeit von der Länge der kurzen Kante schließlich schreiben:

$$\Delta p = \frac{p_0}{1 + (a/a^*)^4} \quad (21)$$

Damit ist eine übersichtliche und ausreichend genaue Gleichung für die klimatisch induzierte Druckdifferenz bei Isolierglas gefunden. Die resultierenden Verformungen und Spannungen können analog den üblichen Flächenlasten berechnet und diesen linear überlagert werden. Klimatisch induzierte Belastungen bei Isolierglas können somit ähnlich einfach wie Wind und Schneelasten bei der Bemessung berücksichtigt werden.

Beispiel für Verformung und Spannung

Zur Verdeutlichung der Besonderheiten der klimatischen Belastung sind in Bild 4 Verformung und Biegespannung für die äußere und innere Scheibe einer Isolierglasscheibe abhängig von ihrer Größe dargestellt.

Die Klimabelastung wurde nach Tabelle 3 angenommen und entspricht einem isochoren Druck von 20 kN/m², weitere Lasten sind nicht vorhanden.

Die Verformung in Bild 4(a) zeigt die typische Reaktion des Systems auf die Klimabeanspruchung: kleine und damit biegesteife Scheiben verformen

sich nur gering, während große Formate nachgeben und dabei die Druckdifferenz abbauen; die Verformung nimmt nicht weiter zu. Die resultierende Biegespannung ist in Bild 4(b) dargestellt. Für sehr kleine und für große Scheiben ist die Spannung gering, erste sind biegesteif und ertra-

Aufbau in mm			Seitenverhältnis			
d _a	SZR	d _i	0,33	0,50	0,66	1,0
6 ESG	12	8 VSG	319	341	365	432
8 ESG	12	10 VSG	458	488	524	619
10 ESG	12	12 VSG	535	571	612	724

Tabelle 2: Charakteristische Kantenlänge in mm für typische Isolierglasaufbauten bei Überkopfverglasung

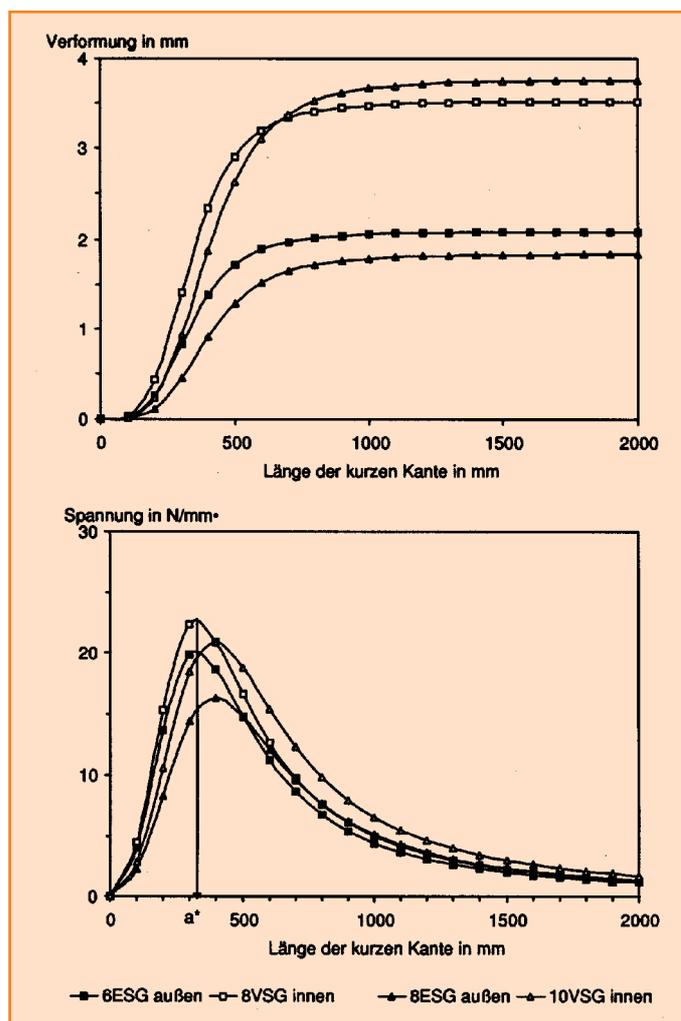


Bild 4: Verformung und Biegespannung bei Isolierglas mit 12 mm Scheibenzwischenraum; Scheibenaufbau 6ESG-12-8VSG bzw. 8ESG-12-10VSG. Die Klimabelastung wurde nach Tabelle 3 angenommen

Produktion		Einbau	
Ortshöhe	100 m	Ortshöhe	400 m
Druck (NN)	1040 mbar	Druck (NN)	980 mbar
Temperatur	20 °C	Temperatur	50 °C

Tabelle 3: Randbedingungen für Bild 4

gen die hohe Belastung, zweite bauen die Belastung durch ihre Nachgiebigkeit ab. Scheiben im Bereich der charakteristischen (kritischen) Kantenlänge werden sehr stark beansprucht.

Zusammenfassung

Ausgehend von der linearen Theorie der dünnen Platte kann die klimatische Belastung in geschlossener Weise berechnet werden. Die resultierenden Verformungen bleiben bei üblichen Klimarandbedingungen unterhalb der Plattendicke und rechtfertigen die Beschränkung auf lineare Effekte. Die Struktur der Gleichungen und die Größenordnung der Einwirkungen erlauben eine weitgehende Linearisierung, so daß die exakten aber komplizierten Ausdrücke in außerordentlich guter Näherung in einfacher Form dargestellt werden können.

Die klimatische Belastung ergibt sich aus Veränderung der Temperatur, des meteorologischen Druckes und der Ortshöhe zwischen Produktion und Einbauort. Diese Einflüsse können in einem *isochoren* Druck zusammengefaßt werden. Der Aufbau und das Seitenverhältnis einer Isolierglasscheibe bestimmen ihre *charakteristische Kantenlänge* a^* . Diese liegt für übliche Isolierglasscheiben zwischen 0,25 m und 0,8 m. Isolierglasscheiben mit dieser Kantenlänge weisen die größten klimainduzierten Biegespannungen auf. Dagegen kann für sehr große Scheiben die Klimabelastung vernachlässigt werden. Bei Überkopfverglasung von üblichen Aufbauten und Formaten ist dies jedoch nicht der Fall.

Die klimatisch induzierte Druckdifferenz zwischen Scheibenzwischenraum und Umgebung kann aus dem isochoren Druck, der charakteristischen Kantenlänge und der Länge der kurzen Kante berechnet werden. Diese Belastung ist analog den äußeren Lasten aus Wind, Schnee usw. zu behandeln und diesen geeignet zu überlagern. Damit ist eine Berechnung von Hand ohne allzu großen Aufwand möglich, wengleich entsprechende Programme die Arbeit wesentlich erleichtern.

Liste der Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
μ	Querkontraktionszahl	1
a	Länge der kurzen Scheibenkante	m
a^*	charakteristische (kritische) Länge	m
A	Beiwerte	1
b	Länge der langen Scheibenkante	m
d	Dicke der Glasscheibe	m
E	Elastizitätsmodul	Pa
e	Seitenverhältnis der Scheibe ($e \leq 1$)	1
K	Plattensteifigkeit	Nm
h	geographische Höhe	m
p	Druck, Flächenlast	Pa
p_0	isochorer Druck	Pa
p_L	meteorologischer Luftdruck (bezogen auf Meereshöhe)	Pa
σ	Spannung	Pa
s	Scheibenabstand (Scheibenzwischenraum)	m
T	Temperatur im Scheibenzwischenraum	K
V	Volumen	m ³
w	maximale Durchbiegung, Biegefläche	m
Index		
P	Produktion (Verschließen des SZR)	
E	Einbauort	
SZR	Scheibenzwischenraum	
a	außen	
i	innen	

Literatur

- [1] Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik 9/94
- [2] Feldmeier, F.: Belastung von Isoliergläsern durch Klimaschwankungen; Fenster und Fassade (1984) Heft 2
- [3] Kirchner, G.: Beanspruchung von Isolierverglasungen; Bauphysik 6 (1984) Heft 3
- [4] Feldmeier, F.: Belastung von Isolierglas durch Wind und Klimaänderung; Fenster und Fassade (1991) Heft 4
- [5] Feldmeier, F.: Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens zur Berücksichtigung der Klimabelastung bei der Bemessung von Isolierglas bei Überkopfverglasung; Deutsches Institut für Bautechnik, IV-1-5-760/94