

Druckdifferenz berechnen:

Klimabelastung bei Isolierglas

Franz Feldmeier

Bei Isolierglas bildet der Scheibenzwischenraum ein abgeschlossenes Luft(Gas-)volumen. Eine Änderung der Temperatur bzw. des äußeren Luftdrucks führt zu einer Druckdifferenz und damit zu einer Belastung der Einzelscheiben. Diese Belastung kann insbesondere bei kleinen Formaten die Belastung aus üblichen Lasten ganz erheblich überschreiten. Die Einflüsse aus Temperaturänderung, Änderung der Ortshöhe und des Luftdrucks können in einfacher Weise zu einem isochoren Druck zusammengefaßt werden. Die statischen Eigenschaften der Isolierglasscheibe werden durch eine charakteristische Kantenlänge erfaßt. Hieraus läßt sich die klimatische Belastung in Form einer resultierenden Druckdifferenz in übersichtlicher Weise berechnen und analog zu üblichen Flächenlasten behandeln.

Dr. rer. nat. Franz Feldmeier ist Professor der Fachhochschule Rosenheim und freier Mitarbeiter des i.f.t. Instituts für Fenstertechnik. Der Beitrag erschien zuerst in der „Stahlbau“-Ausgabe 8/96 des Verlags Ernst & Sohn, Berlin.

Die „Technischen Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Überkopferglasungen“ [1] legen die Grundlagen zur Bemessung von Glas im Überkopfbereich fest. Neben den üblichen Einwirkungen aus Eigengewicht, Wind und Schnee nach DIN 1055 sind bei Isolierglas auch Einwirkungen durch Änderung der Ortshöhe, der Temperatur und des Luftdrucks zu berücksichtigen.

Obwohl diese „Klimabelastung“ in vielen Fällen die wesentliche Beanspruchung darstellt, wurde sie bei der Bemessung von Isolierglas bisher nur vereinzelt berücksichtigt. Ursache hierfür ist die ungewohnte und komplizierte Wechselwirkung zwischen den klimatischen Einwirkungen und dem statischen System „Isolierglas“, die bei kleinen Formaten zu großen Beanspruchungen führt, bei großen Scheiben aber meist unbedeutend ist.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen [2, 3, 4] wurden daher nur einem kleinen Kreis bekannt und sind für den normalen Anwender in der Praxis weder ausreichend noch umsetzbar. Es wird daher versucht, die Grundlagen der klimatischen Beanspruchung von Isolierglas kurz darzustellen und ein vereinfachtes, praxisgerechtes Verfahren zur Berücksichtigung der Klimabelastung bei Isolierglas anzugeben.

Die vorliegende Arbeit wurde durch ein Forschungsvorhaben [5] des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin, gefördert.

Die klimatische Belastung von Isolierglas

Grundprinzip

Zweischeiben-Isolierglas besteht aus zwei parallel zueinander angeordneten Glasscheiben, die im Randbereich durch einen umlaufenden Abstandhalter und entsprechende Kleb- und Dichtstoffe mechanisch stabil und gasdicht verbunden sind. Das eingeschlossene Luft- bzw. Gasvolumen bestimmt wesentlich die thermischen und akustischen Eigenschaften der Scheibe, bewirkt aber auch eine mechanische Kopplung der beiden Glasscheiben und ist Ursache der klimatischen Belastung.

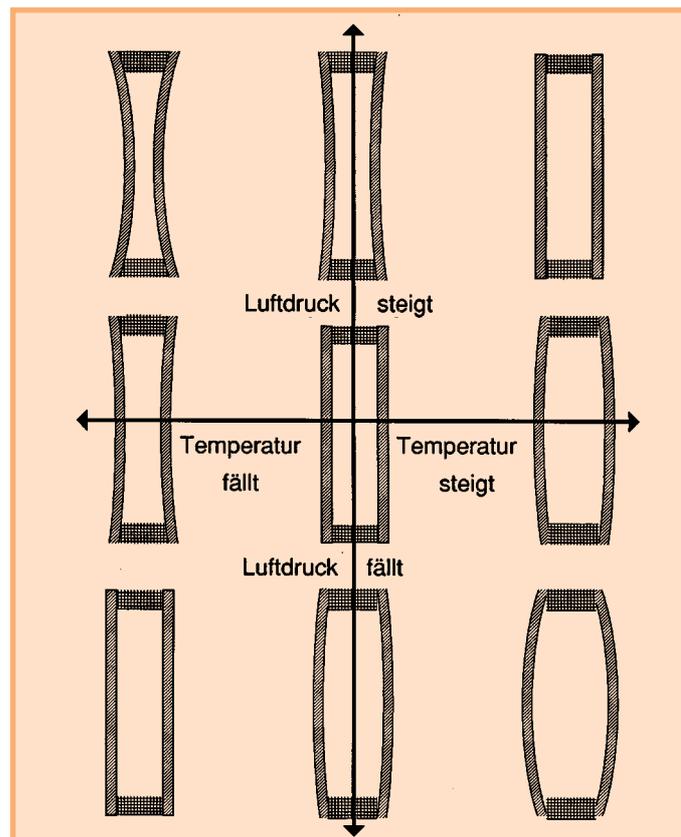


Bild 1: Klimatische Beanspruchung von Isolierglas. Bei steigender Temperatur im Scheibenzwischenraum und bei fallendem äußeren Luftdruck bauchen Isolierglasscheiben aus. Bei steigendem Luftdruck oder fallender Temperatur bauchen sie ein. Bei ungünstiger Überlagerung kommt es zu einer hohen Beanspruchung der Scheibe

Diese 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 bei Änderung von Temperatur und Luftdruck resultierende Verformung einer Isolierglasscheibe ist in Bild 1 anschaulich dargestellt.

Die absolute Größe der klimatisch bedingten Druckdifferenz kann mit mehreren kN/m^2 übliche Windlasten ganz erheblich übersteigen. Die Größe dieser Belastung mag überraschen, sie wird aber verständlich, wenn man bedenkt, daß eine Luftdruckänderung von 1 % entsprechend 10 hPa bereits eine Flächenlast von 1 kN/m^2 darstellt.

Allerdings besteht ein wichtiger Unterschied zur Windlast: während Windlasten unabhängig von der Verformung der Scheibe sind, werden Druckunterschiede zwischen Scheibenzwischenraum und Außenatmosphäre durch die Verformung der Scheiben gemildert oder weitgehend abgebaut. Die am Ende verbleibende Beanspruchung der Einzelscheiben hängt von Format und Aufbau des Isolierglases ab.

Klimatische Einwirkungen

Der Luftdruck resultiert aus dem Gewicht der Lufthülle (Schweredruck) und hängt von der Luftdichte und der Höhe der Luftsäule ab. Für Höhen bis 1000 m ergibt sich pro 100 m Höhe eine Druckabnahme von ca. 12 hPa, so daß sich eine Änderung der Ortshöhe nach folgender Gleichung in eine Druckänderung umrechnen läßt:

$$\Delta p = 0,012 \frac{\text{kPa}}{\text{m}} \cdot \Delta h \quad (1)$$

Neben der Ortshöhe hängt der Luftdruck auch von der Wetterlage ab. In Europa können Hochdruckgebiete etwa 1050 hPa, Tiefdruckgebiete

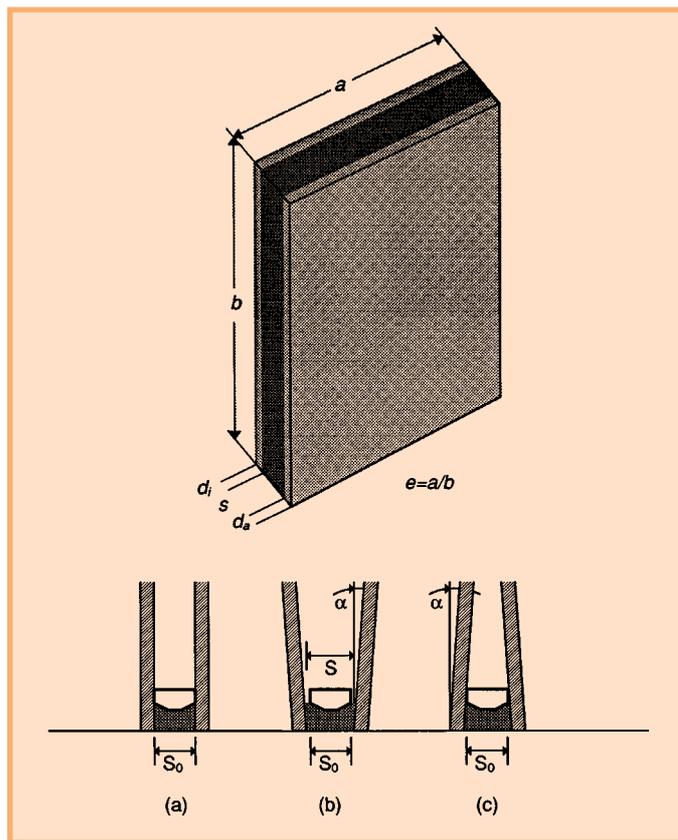


Bild 2: Prinzipieller Aufbau und Bezeichnungen bei Isolierglas. Die Verformung am freiliegenden Randverbund bei Überdruck (b) und bei Unterdruck (c) im Scheibenzwischenraum relativ zum unbelasteten Zustand (a). Die Randdehnung und die Randverdrehung sind vergrößert dargestellt

950 hPa erreichen. Für die Änderung relativ zum Normaldruck gilt daher

$$\Delta p(\text{Hoch}) = +4,0 \text{ kPa};$$

$$\Delta p(\text{Tief}) = -6,0 \text{ kPa} \quad (2)$$

Meteorologische Druckangaben werden dabei immer auf Meereshöhe bezogen, so daß bei der Ermittlung des atmosphärischen Luftdrucks die Ortshöhe berücksichtigt werden muß. Obwohl die Änderung der Ortshöhe keine „klimatische“ Einwirkung im engeren Sinne darstellt, wird sie doch wegen ihrer Auswirkung auf den Luftdruck mit unter diesem Begriff erfaßt.

Erhöht sich die Temperatur, so dehnt sich das Füllgas im Scheibenzwischenraum aus. Wird diese Ausdehnung behindert, so steigt der Druck. Nimmt man das Volumen des Scheibenzwischenraumes als konstant an, so gilt das *Gay-Lussacsche Gesetz*, welches sich hier am bequemsten in folgender Form schreibt:

$$\Delta p = 0,34 \frac{\text{kPa}}{\text{K}} \cdot \Delta T \quad (3)$$

Ändert sich Temperatur und Volumen, so muß die vollständige „Zustandsgleichung idealer Gase“ angesetzt werden.

Das statische System Isolierglas

Randbedingungen

Die Belastung durch Schnee, Winddruck oder Sog 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. Die „Scheibe“ trägt als Platte.

Bild 2 zeigt den Aufbau einer Isolierglasscheibe und das Verhalten des Isolierglasrandverbundes bei 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 Glashalteleiten wird diese Dehnung behindert und tritt deshalb nicht in Erscheinung. Um ein einfaches Modell zu erhalten, wird daher davon ausgegangen, daß der Abstand am Glasrand s_0 konstant bleibt; statisch entspricht dies einem starren Auflager.

Bei den hier vorausgesetzten kleinen Durchbiegungen bleibt auch die Verdrehung (der Winkel α) im Auflager klein. Auch bei Annahme eines sehr harten Dichtstoffes ergibt sich ein übertragenes Drehmoment, das nur wenige Prozent des Einspannmoments beträgt. Damit ist die Verdrehung praktisch unbehindert und das Lager kann statisch als frei drehbar angenommen werden. Diese Abschätzungen gelten auch noch für typische *Structural-Glazing*-Aufbauten mit im Vergleich zu normalem Isolierglas deutlich größeren Klebreiten.

Solange die Verformung die Dicke der Glasscheiben nicht überschreitet, liefert die klassische lineare Theorie der *Kirchhoff*-Platte ausreichend genaue Resultate. Dies gilt in aller Regel für bei Klimabeanspruchung auftretende Durchbiegung und ganz allgemein bei kleinen Scheibenformaten.

Die „Technische Regel Überkopfverglasung“ [1] verlangt bei der Bemessung der oberen Scheibe von Isolierglas eine Begrenzung der Durchbiegung auf die Plattendicke. Für die untere Scheibe ist kein Durchbiegungsnachweis gefordert. Allerdings wird diese Scheibe erst nach Versagen (Bruch) der oberen Scheibe voll belastet. Nach dem Bruch der oberen Scheibe tritt aber keine Klimalast auf. Damit ist in allen Fällen, auch für die Überlagerung aus Schnee, Wind und Klimabelastung der oberen Scheibe, die Gültigkeit der linearen Theorie sichergestellt.

Plattentheorie

Die Theorie der Platte ist gut bekannt und soll hier nicht dargestellt werden. Für den vorliegenden Fall kleiner Verformungen, unnachgiebig aber momentenfreier linienförmiger Lagerung und konstanter Flächenlast kann die Biegefläche als Lösung der Plattengleichung:

$$K \cdot \Delta \Delta w = p \quad (4)$$

Seitenverhältnis	A_w	A_v	A_m
1:1	0,00406	0,00170	0,0442
0,95	0,00449	0,00188	0,0483
0,90	0,00496	0,00208	0,0527
0,85	0,00547	0,00230	0,0576
0,80	0,00603	0,00253	0,0628
0,75	0,00663	0,00279	0,0683
0,70	0,00727	0,00307	0,0742
2:3	0,00772	0,00327	0,0784
0,65	0,00796	0,00338	0,0805
0,60	0,00867	0,00370	0,0869
0,55	0,00940	0,00404	0,0934
1:2	0,01013	0,00440	0,0999
0,45	0,01084	0,00478	0,1062
0,40	0,01150	0,00516	0,1119
0,35	0,01207	0,00555	0,1169
1:3	0,01223	0,00569	0,1183
0,30	0,01252	0,00595	0,1208
0,25	0,01282	0,00635	0,1233
0,20	0,01297	0,00674	0,1246
0,15	0,01302	0,00714	0,1250
0,10	0,01302	0,00754	0,1250
0,05	0,01302	0,00794	0,1250
0,00	0,01302	0,00833	0,1250

Tabelle 1: Beiwerte zur Berechnung von Durchbiegung, Volumen und Spannung

geschlossen angegeben werden. Die Plattensteifigkeit K berechnet sich aus der Dicke der Glasscheibe und den elastischen Konstanten des Glases

$$K = \frac{Ed^3}{12(1-\mu^2)} \quad (5)$$

Neben den üblichen Größen wie maximale Verformung und maximale Spannung ist jetzt aber auch das von der verformten Platte aufgespannte Volumen für die Berechnung notwendig. Man erhält:

- Durchbiegung $w = \frac{pa^4}{K} A_w(e) \quad (6)$

- Volumen $\delta V = \frac{pa^6}{eK} A_v(e) \quad (7)$

- Biegespannung $\sigma = \frac{6}{d^2} pa^2 A_m(e) \quad (8)$

Die zur Berechnung notwendigen Beiwerte $A(e)$ hängen vom Seitenverhältnis $e = a/b \leq 1$ der Glasscheibe ab und sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Klimainduzierte Druckdifferenz

Der Zustand des eingeschlossenen Gases wird durch die Größen p_p Druck, V_p Volumen, T_p absolute Temperatur beim Verschließen des Isolierglases (Produktion) bestimmt. Die Absorption des eingeschlossenen Wasserdampfes an das Trocknungsmittel kann durch eine Korrektur von p_p berücksichtigt werden. Bei planparalleler Produktion der Scheiben berechnet sich das Volumen des Scheibenzwischenraums unter Vernachlässigung der Randverbundbreite zu

$$V_p = a \cdot b \cdot s \quad (9)$$

Alle üblichen Füllgase können als ideale Gase behandelt werden. Ändern

sich die Umgebungsbedingungen und damit auch Temperatur T_{SZR} , Druck p_{SZR} und Volumen V_{SZR} des Scheibenzwischenraums, so gilt aufgrund der Gasgleichung:

$$V_{SZR} = \frac{T_{SZR}}{T_P} \frac{p_P}{p_{SZR}} V_P \quad (10)$$

Andererseits ergibt sich die Volumenänderung aus der Verformung der Glasscheiben zu:

$$V_{SZR} = V_P + \delta V_a + \delta V_i \quad (11)$$

Ursache ist die Differenz zwischen dem Druck im Scheibenzwischenraum p_{SZR} und dem äußeren Druck an der Außenscheibe bzw. an der Innenscheibe. Dieser kann, berücksichtigt man z. B. den Staudruck durch Wind, durchaus verschieden sein. Zur Erläuterung (auch der Vorzeichen) siehe Bild 3. Das mit der Verformung verbundene Volumen für die beiden Scheiben berechnet sich dann zu:

$$\delta V_{a,i} = (\Delta p - p_{a,i}) \cdot \frac{a^6 A_v}{e K_{a,i}} \quad (12)$$

Dabei ist Δp die Differenz zwischen dem Druck im Scheibenzwischenraum und dem äußeren atmosphärischen Druck am Einbauort, p_a und p_i sind die zusätzlichen Flächenlasten z. B. durch Wind. Damit erhält man durch Gleichsetzen von (10) und (11)

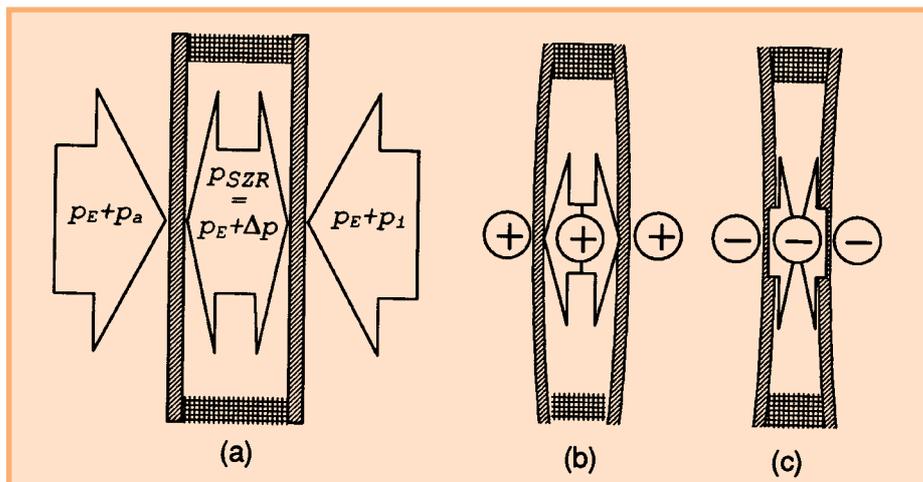


Bild 3:

- (a) Druckbezeichnung am Isolierglas; die Belastung ergibt sich aus der Druckdifferenz
- (b) Bei Überdruck im SZR ergibt sich eine konvexe Verformung (Ausbauchung): positive Vorzeichen
- (c) Bei Unterdruck im SZR ergibt sich eine konkave Verformung (Einbauchung): negative Vorzeichen

sowie durch Einsetzen der Ausdrücke für die Volumina (12) schließlich folgende in der gesuchten Größe Δp quadratische Gleichung:

$$\frac{T_E}{T_P} \frac{p_P}{p_E + \Delta p} = 1 + (\Delta p - p_a) \frac{a^4 A_v}{s K_a} + (\Delta p - p_i) \frac{a^4 A_v}{s K_i} \quad (13)$$

Eine Auswertung dieser Gleichung ist kein prinzipielles Problem und heute mit Hilfe einer geeigneten Soft-

ware leicht möglich. Damit kann der Über- bzw. Unterdruck Δp im Scheibenzwischenraum ausgehend von den Belastungen berechnet werden.

Fortsetzung folgt

Sommer Informatik

Glasstatik-Software nach neuesten Regeln

Die vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) herausgegebene Neuregelung für die Bemessung von Überkopfverglasungen stellt Planer und Anwender vor große Probleme: alle bisherigen Tabellen und Softwarelösungen sind überholt und somit falsch. Die Firma Sommer aus Rosenheim, Anbieter des Programms zur Glasdickenbestimmung „Üko“, hat darauf rasch reagiert und die DIBt-Neuregelung in der neuesten Version

„Üko 2.0“ umgesetzt. Dabei wurde die MS-Windows-Applikation nebenbei noch um Fassadenverglasung und geometrische Sonderformen erweitert. Das Programm berücksichtigt neben den allgemeinen Lasten (Wind, Schnee, Eigengewicht) bei Isolierglas auch die Überlagerung durch Klimlasten, Klimaänderungen und die Höhendifferenz zwischen Einbau- und Produktionsort, wobei die komfortable Handhabung und Übersichtlich-

keit auch Einsteigern hilft, sich rasch mit der Software zurechtzufinden. Nachdem die „Technischen Regeln“ in der endgültigen Fassung jetzt veröffentlicht sind, erhalten die Käufer der alten Version vom Hersteller ein kostenloses Update.

Sommer Informatik,
83026 Rosenheim,
Fax (0 80 31) 2 48 82