

Tech-News Nr. 2009/5 Folge 2 Fachgebiet: Glasbau

Dipl.-Ing.
Jürgen Lorch
Nebelhornstrasse 78
71083 Herrenberg

Linienförmig gelagerte Verglasungen

10. Isolierverglasung

Bei Isolierverglasung (Mehrscheibenglas – MIG) wird mindestens ein Scheibenzwischenraum (SZR, meist zwischen 8 – 16 mm) mit eingeschlossenem Gasvolumen angeordnet. Innere und äußere Scheiben können aus unterschiedlichen Gläsern bestehen, z.B. außen 10 mm SPG und innen VSG aus 2 x 6 mm SPG.

Bedingt durch das hermetisch versiegelte Gasvolumen tritt ein Koppeleffekt ein, der eine Lastübertragung über das eingeschlossene Gas ermöglicht und der beim rechnerischen Nachweis zu beachten ist, d.h. beide Scheiben oder bei mehr als einem SZR alle Scheiben sich bei der Lastabtragung beteiligen. Dieser Koppeleffekt darf nicht mit dem Verbund bei VSG verwechselt werden. In den Rechenbeispielen wird darauf gesondert eingegangen.

Im Anhang A der TRLV wird das Rechenverfahren für allseitig gelagerte rechteckigen Glasscheiben im Fall der Isolierverglasung dargelegt. Die Tabellen A1, A2 und A3 und die zugehörigen Formeln (A1), (A2), (A3), (A4) und (A5) werden in den Rechenbeispielen erläutert.

Die klimatischen Einwirkungskombinationen Winter und Sommer sind in der Tabelle 1 im Abschnitt 4 der TRLV angegeben. Die Erläuterungen der Tabelle 1 erfolgt im Anhang B der TRLV.

Im Anhang B der TRLV werden die Standardmindestwerte, die der Tabelle 1 zugrunde gelegt werden, festgelegt. Wird von diesen Standardwerten abgewichen, so sind gemäß Tabelle B1 Korrekturwerte zu beachten.

Dies kann für den Tragwerksplaner in der Praxis ein Problem darstellen. In der Regel kennt er zum Zeitpunkt der Erstellung der Berechnung nicht alle Parameter. Der so genannte isochore Druck p_0 im SZR ergibt sich gemäß Formel (A5) zu:

$p_0 = c_1 * \Delta T - \Delta p_{\text{met}} + c_2 * \Delta H$, wobei $c_1 = 0,34 \text{ kPa/K}$, $c_2 = 0,012 \text{ kPa/m}$, ΔT = Temperaturdifferenz zwischen Herstellungs- und Einbauort, Δp_{met} = Differenz des meteorologischen Luftdrucks zwischen Herstellungs- und Einbauort und ΔH = Höhendifferenz zwischen Herstellungs- und Einbauort.

Um den Einfluss zu demonstrieren, sind abweichend von den Standardwerten der TRLV folgende Randbedingungen zu beachten: $\Delta H = 800 \text{ m}$, $\Delta T = 25 \text{ K}$ und Absorptionsgrad zwischen 30 und 50%,

gemäß Gleichung (A5) ergibt sich $p_0 = 0,34 * 25 - (-2) + 0,012*800 = + 20,1 \text{ kN/m}^2$, gegenüber dem Standardwert der TRLV von $+ 16 \text{ kN/m}^2$, eine 25% Steigerung. Deshalb sollte im Leistungsverzeichnis unbedingt darauf hingewiesen werden, dass die Scheibendicken auf der Grundlage der Standardwerte der TRLV ermittelt wurden.

Dies ist vor allem dann wichtig, wenn die Schnittkräfte der Isolierverglasung auf der Basis eines nichtlinearen Berechnungsansatzes (z.B. Berücksichtigung von Membraneffekten) ermittelt wurden. Bei diesem Verfahren sind gegenüber der linearen Plattentheorie die Reserven im System aufgebraucht und eine Nichtbeachtung der tatsächlichen Randbedingungen, die von den Standardwerten abweichen, kann einen Schaden hervorrufen.

Im Anhang B der TRLV ist im Abschnitt B2 die Vorzeichenregelung für die Bemessung von vertikaler Isolierverglasung angegeben. Im Rahmen dieser Tech-News wird auf die Wiedergabe der Bilder verzichtet, weil die TRLV unter der angegebenen Internetadresse (siehe Teil 1) heruntergeladen werden kann.

11. Rechenbeispiel für eine vertikale Isolierverglasung

Die Glasfassade eines Bürogebäudes ist zu bemessen. Das geschlossene Gebäude hat im Grundriss folgende Abmessungen $35 \times 20 \text{ m}$ und weist eine Gebäudehöhe von 22 m auf, es liegt im Binnenland und in der Windzone 2.

Die Einzelscheiben weisen folgende Abmessungen auf $b \times a = 1980 \times 1650 \text{ mm}$. Das statische System kann vereinfachend als Platte mit vierseitig linienförmiger, gelenkiger Lagerung angenommen werden. Die Unterkonstruktion ist nicht Gegenstand dieser Berechnung, sie erfüllt jedoch die Forderung der TRLV hinsichtlich der Durchbiegungsbeschränkung der Auflagerprofile von $l/200 = 1650 / 200 = 8,2 \text{ mm} < 15 \text{ mm}$.

Der Glaseinstand erfüllt die Forderung der TRLV und beträgt 10 mm . Für die Schnittkraftermittlung werden, wie im Glasbau üblich, die Glasabmessungen zugrunde gelegt. Das Seitenverhältnis beträgt somit $1980 / 1650 = 1,20$.

Die Außenscheibendicke beträgt $d_a = 12 \text{ mm}$, die Innenscheibendicke $d_i = 8 \text{ mm}$ und der SZR $d_{\text{SZR}} = 16 \text{ mm}$. Das Material ist Spiegelglas. Die Materialwerte von SPG sind gemäß TRLV: $E = 70\,000 \text{ N/mm}^2$, $\mu = 0,23$ $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ und $\sigma_{\text{zul}} = 18 \text{ N/mm}^2$.

Die Glasscheiben liegen nicht im Bereich einer Verkehrsfläche und somit muss keine absturzsichernde Holmlast angesetzt werden. Hier muss unterschieden werden zwischen einer Verkehrsfläche im unmittelbaren Bereich der Scheibe (Kräfte wirken direkt auf die Scheibe) und einer Verkehrsfläche, bei der Personen durch herab fallende Glasteile verletzt werden können. In letzteren Fall sind an die Resttragfähigkeit gemäß Richtlinie Anforderungen an die Glasscheibe zu beachten. Beide Fälle liegen bei diesem Beispiel nicht vor.

Der vereinfachte Böengeschwindigkeitsdruck nach DIN 1055-4 Tabelle 2 beträgt $q = 0,90 \text{ kN/m}^2$. In einer Nebenrechnung wurden die Außendruckbeiwerte wie folgt ermittelt:

$$c_{pe,10}(A) = -1,20 \text{ und } c_{pe,10}(D) = +0,80 \rightarrow w_D = 0,90 * 0,80 = 0,72 \text{ kN/m}^2 \text{ und } w_s = -1,20 * 0,90 = 1,08 \text{ kN/m}^2$$

Aufgrund der Windlast von $1,08 > 0,80 \text{ kN/m}^2$ und der Glasfläche von $3,27 > 1,6 \text{ m}^2$ sind die Randbedingungen, die einen Nachweis gemäß TRLV (siehe Teil 1) nicht erforderlich machen, überschritten.

Gemäß TRLV 4.2 Tabelle 1 beträgt der isochore Druck bei Sommerbedingungen $p_0 = +16 \text{ kN/m}^2$ und bei Winterbedingungen $p_0 = -16 \text{ kN/m}^2$. Die Standardwerte sind für dieses Gebäude zutreffend, Korrekturwerte nach Tabelle B1 der TRLV sind nicht erforderlich.

Die Anteile δ_a und δ_i der Einzelscheiben an der Gesamtbiegesteifigkeit der Isolierverglasung werden nach den Formeln (A1) und (A2) der TRLV ermittelt:

$$\delta_a = d_a^3 / (d_a^3 + d_i^3) = 12^3 / (12^3 + 8^3) = 1728 / (1728 + 512) = 0,772$$

$$\delta_i = 1 - \delta_a = 1 - 0,772 = 0,228$$

Der verformungsbedingte Anteil des isochoren Drucks beträgt $p_i = \varphi * p_0$, hierzu muss der Isolierglasfaktor φ ermittelt werden.

Die Berechnung der charakteristischen Kantenlänge a^* erfolgt nach der Formel (A3) der TRLV:

$$a^* = 28,9 ((d_{SZR} * d_a^3 * d_i^3) / B_v * (d_a^3 + d_i^3))^{0,25} = 28,9 * ((16 * 1728 * 512) / (0,0237 * 2240))^{0,25} = 635 \text{ mm}$$

$B_v = 0,0273$ nach Tabelle A1 der TRLV

$$\text{nach Gleichung (A4) } \varphi = 1 / (1 + (a / a^*)^4) = 1 / (1 + 2,59^4) = 0,0217$$

Es wird empfohlen wegen der Vorzeichenregelung die Vorzeichen im ersten Ansatz mitzuführen, damit ein Flüchtigkeitsfehler vermieden wird. Folgende Lastkombinationen werden berechnet:

$$\text{Lk1 } p_{a,sog} = (\delta_a + \varphi * \delta_i) * w_s - \varphi * p_0 = (0,772 + 0,0217 * 0,228) * (-1,08) - 0,0217 * 16 = -1,18 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Lk2 } p_{a,druck} = (\delta_a + \varphi * \delta_i) * w_D - \varphi * p_0 = (0,772 + 0,0217 * 0,228) * 0,72 - 0,0217 * (-16) = 0,91 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Lk3 } p_{i,druck} = (1 - \varphi) * \delta_i * w_D + \varphi * p_0 = (1 - 0,0217) * 0,228 * 0,72 + 0,0217 * 16 = 0,51 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Lk4 } p_{i,sog} = (1 - \varphi) * \delta_i * w_s + \varphi * p_0 = (1 - 0,0217) * 0,228 * (-1,08) + 0,0217 * (-16) = -0,59 \text{ kN/m}^2$$

Maßgebend wird also für die äußere Scheibe die Lk1 und für die innere Scheibe die Lk4. Aus den Formeln kann man auch entnehmen, dass die maßgebliche rechnerische Belastung stark abhängig ist von der Gesamtsteifigkeit der Isolierverglasung, je weicher das System ist (je kleiner der Isolierglasfaktor φ), umso geringer ist der Anteil des isochoren Drucks; d.h. kleinere Scheibenabmessungen sind durch die Klimalasten eher gefährdet.

Widerstandsmomente und Plattensteifigkeit werden wie folgt ermittelt:

$$W_a = 1 \cdot 12^2 / 6 = 24,0 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

$$W_i = 1 \cdot 8^2 / 6 = 10,6 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

$$K_a = E \cdot d_a^3 / 12 \cdot (1 - \mu^2) = 70000 \cdot 12^3 / 12 \cdot (1 - 0,23^2) = 10,64 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$K_i = E \cdot d_i^3 / 12 \cdot (1 - \mu^2) = 70000 \cdot 8^3 / 12 \cdot (1 - 0,23^2) = 3,15 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Die Durchbiegungen für die äußere und innere Scheiben wurden in einer Nebenrechnung mit Hilfe von Tafeln, die auf der linearen Plattentheorie basieren, ermittelt:

$$\text{Seitenverhältnis } b/a = 1,2 \text{ und Tafelbeiwert } \eta = 0,0038, f = (a^2 + b^2) \cdot p \cdot \eta / K$$

$$\text{LK1 (äußere Scheibe) } f_a = (1650^2 \cdot 1980^2) \cdot 1,18 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0038 / 10,64 \cdot 10^6 = 4,5 \text{ mm}$$

$$\text{LK4 (innere Scheibe) } f_i = (1650^2 \cdot 1980^2) \cdot 0,59 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0038 / 3,15 \cdot 10^6 = 7,6 \text{ mm}$$

Selbstverständlich kann die Durchbiegung auch mit einer FEM-Berechnung durchgeführt werden. Die TRLV gibt für vertikale Verglasungen keine Durchbiegungsbeschränkungen vor. Die Hersteller-richtlinien sind zu beachten. Durchbiegungen, die größer als die Glasdicke sind, sollten vermieden werden, hinsichtlich der Dichtigkeit des Randverbundes.

Schnittkräfte nach der linearen Plattentheorie:

$$m = a \cdot b \cdot p \cdot \eta, \text{ Faktor } \eta = 0,05 \text{ für } b/a = 1,20$$

$$\text{LK1 (äußere Scheibe) } m_a = 1650 \cdot 1980 \cdot 1,18 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05 = 192 \text{ Nmm/mm}$$

$$\text{LK4 (innere Scheibe) } m_i = 1650 \cdot 1980 \cdot 0,59 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05 = 96 \text{ Nmm/mm}$$

Spannungsnachweis:

$$\sigma_a = 192 / 24,0 = 8,0 \text{ N/mm}^2 < 1,15 \cdot 18 = 20,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_i = 96 / 10,6 = 9,0 \text{ N/mm}^2 < 1,15 \cdot 18 = 20,7 \text{ N/mm}^2$$

Bei der Überlagerung der äußeren Lasten mit den Klimlasten, darf die zul. Spannung um 15 % erhöht werden.

12. Rechenbeispiel für eine vertikale Isolierverglasung mit VSG

Das unter Punkt 11 nachgewiesene Beispiel wird abgeändert. Die äußere Scheibe wird durch eine VSG- Scheibe aus Spiegelglas ersetzt. Der Aufbau besteht aus 2 x 6 mm SPG und einer 0,76 mm PVB Folie. Die anderen Bedingungen werden beibehalten.

Gemäß TRLV muss die Isolierverglasung für vollen Verbund und für ohne Verbund der VSG – Scheibe nachgewiesen werden. Für vollen Verbund ergibt deshalb eine rechnerische Scheibendicke von $d^* = d_1 + d_2 = 6 + 6 = 12$ mm, für den Fall ohne Verbund ergibt sich die Ersatzscheibendicke zu $d^* = (d_1^3 + d_2^3)^{0,333} = (6^3 + 6^3)^{0,333} = 7,56$ mm.

Variante ohne Verbund:

Für die Gesamtbiegesteifigkeit der Isolierverglasung wird in diesem Fall die Dicke 7,56 mm maßgebend. Es werden nur die Ergebnisse dargestellt, die Formel können dem Beispiel im Abschnitt 11 entnommen werden.

$$\delta_a = 7,56^3 / (7,56^3 + 8^3) = 0,456$$

$$\delta_i = 1 - 0,456 = 0,544$$

$$a^* = 28,9 * ((16*432*512) / (0,0237*944))^{0,25} = 576 \text{ mm}$$

$$\varphi = 1 / (1 + 2,86^4) = 0,0146$$

$$\text{Lk1 } p_{a,\text{sog}} = (\delta_a + \varphi * \delta_i) * w_s - \varphi * p_0 = (0,456 + 0,0146 * 0,544) * (-1,08) - 0,0146 * 16 = - 0,73 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Lk2 } p_{a,\text{druck}} = (\delta_a + \varphi * \delta_i) * w_D - \varphi * p_0 = (0,456 + 0,0146 * 0,544) * 0,72 - 0,0146 * 16 = 0,57 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Lk3 } p_{i,\text{druck}} = (1 - \varphi) * \delta_i * w_D + \varphi * p_0 = (1 - 0,0146) * 0,544 * 0,72 + 0,0146 * 16 = 0,62 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Lk4 } p_{i,\text{sog}} = (1 - \varphi) * \delta_i * w_s + \varphi * p_0 = (1 - 0,0146) * 0,544 * (-1,08) + 0,0146 * (-16) = - 0,81 \text{ kN/m}^2$$

$$K_a = E * d_a^3 / 12 * (1 - \mu^2) = 70000 * 7,56^3 / 12 * (1 - 0,23^2) = 2,66 * 10^6 \text{ Nmm}$$

$$K_i = E * d_i^3 / 12 * (1 - \mu^2) = 70000 * 8^3 / 12 * (1 - 0,23^2) = 3,15 * 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\text{LK1 (äußere Scheibe) } f_a = (1650^2 * 1980^2) * 0,73 * 10^{-3} * 0,0038 / 2,66 * 10^6 = 11,1 \text{ mm}$$

$$\text{LK4 (innere Scheibe) } f_i = (1650^2 * 1980^2) * 0,81 * 10^{-3} * 0,0038 / 3,15 * 10^6 = 10,41 \text{ mm}$$

Durch die Änderung der einzelnen Steifigkeiten sieht man deutlich, dass eine Umlagerung der Belastungen stattfindet. Die Durchbiegung auf der Basis der linearen Plattentheorie ergibt zu große Durchbiegungen. In diesem Fall müsste man eine nichtlineare Bemessung durchführen oder die Scheibendicken ändern. Die Variante mit einer VSG – Verglasung auf der Innenseite bei Isolierverglasung (MIG) wird häufig benutzt, wenn eine absturzsichere Verglasung erforderlich ist.

$$\text{LK1 (äußere Scheibe)} \quad m_a = 1650 * 1980 * 0,73 \cdot 10^{-3} * 0,05 = 119 \text{ Nmm/mm}$$

$$\text{LK4 (innere Scheibe)} \quad m_i = 1650 * 1980 * 0,81 \cdot 10^{-3} * 0,05 = 132 \text{ Nmm/mm}$$

Spannungsnachweis:

$$W_a = 2 * 1 * 6^2 / 6 = 12,0 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

$$W_i = 1 * 8^2 / 6 = 10,6 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

$$\sigma_a = 119 / 12 = 9,9 \text{ N/mm}^2 < 1,15 * 18 = 20,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_i = 132 / 10,6 = 12,5 \text{ N/mm}^2 < 1,15 * 18 = 20,7 \text{ N/mm}^2$$

Variante 2 mit Verbund:

Die Ersatzdicke der VSG ergibt sich zu: $d^* = d_1 + d_2 = 6 + 6 = 12 \text{ mm}$. Beim Beispiel Nr. 11 beträgt die äußere Scheibendicke auch 12 mm. Ein weiterer Nachweis ist deshalb nicht erforderlich.