

Ein Bemessungskonzept für SL-belastete Anschlüsse im konstruktiven Glasbau

Bei Entwurf und Bemessung von tragenden Ganzglaskonstruktionen spielt die Verbindungstechnik eine entscheidende Rolle. Denn dort, wo Glasscheiben zum Beispiel punktförmig gehalten werden, entstehen im Bereich der Bohrungen Spannungsspitzen, die, sofern keine weiteren konstruktiven Maßnahmen ergriffen werden, aufgrund des spröden Werkstoffverhaltens nicht abgebaut oder umgelagert werden und somit plötzlichen Bruch verursachen können. Dies gilt auch für Scher-Lochleibungsverbindungen von in Scheibenebene belasteten Anschlusskonstruktionen, bei denen deswegen die Bolzenlasten nur über eine duktile, lastverteilende Zwischenschicht auf die Bohrungswandung des Glases wirken dürfen.

Im folgenden Beitrag wird eine einfache Bemessungsgleichung für SL-belastete Anschlüsse im Glasbau vorgestellt, die auf einem analytischen Ansatz basiert, bei dem lokale Beanspruchungen infolge Lochleibungsdrucks mit Beanspruchungen im Nettoquerschnitt überlagert werden, und bei dem für beide Anteile eine Lösung für die Airysche Spannungsfunktion gefunden wird. Damit können nun ohne Anwendung von Finite-Elemente-Berechnungen die maßgebenden Spannungen des Glasbauteils in Abhängigkeit der an der Einzelbohrung angreifenden Bemessungsbolzenlast, des Bohrungsdurchmessers und der Scheibendicke ermittelt werden. Dabei wurde der Bemessungsansatz mit Hilfe von Versuchen und numerischen Untersuchungen überprüft. Einzeleinflüsse, die sich einerseits aus Montage- und Herstelltoleranzen sowie andererseits aus Entwurfparametern ergeben, wurden erstmals systematisch mithilfe von FEM-Berechnungen untersucht und konnten zahlenmäßig so erfasst werden, dass sie in Form von Beiwerten in die vorgeschlagene Bemessungsformel einfließen können.

A design concept for bolt connections in structural applications.

For the design of load carrying glazing structures the connection technique plays a very important role, as e.g. there are significant stress concentrations in the vicinity of holes that are subject to a point-like support of glass panes. If no further constructional means are provided, the stress peaks cannot be redistributed and thus a sudden brittle failure is likely to occur. In particular this concerns bolts in bearings of drilled glass holes as long as no ductile stress distributing interlayers in the clearance between hole bearing and bolt shank is provided.

In the article, a simple design formula for glass joints with bolts in bearings is suggested that is based on an analytical approach where the local stress distributions coming on the one hand from the bearing pressure and on the other hand from the net section stress concentrations are superposed, and both for which the solutions according to Airy's differential equation are found respective used further on. By this the relevant stresses in

dependence on the acting design force, the hole diameter and the pane thickness can be determined without performing complex and time consuming Finite Element calculations. However the analytical formulae have been verified by experiments and numerical simulations. Single influences that are due to manifold tolerances from fabrication and erection as well as conceptual parameters have been thoroughly investigated and could be quantitatively laid down as additional values influencing the design formula.

1 Einleitung

Glas wird zunehmend als tragender Baustoff, zum Beispiel für Träger- und Stützenkonstruktionen, zur Absturzsicherung etc., eingesetzt. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass heute Glasprodukte in den erforderlichen Geometrien und Festigkeiten zur Verfügung stehen, die die Transparenzsteigernde Integration von Raumabschluss und Tragwerk aus Glas erlauben. Doch trotz des mittlerweile großen Einsatzspektrums tragender Glasbauten ist die überwiegende Zahl dieser Fälle bauaufsichtlich nicht geregelt und unterliegt Sondergenehmigungen, nicht zuletzt deswegen, weil für die Auslegung von Glasbauanschlüssen noch keine Bemessungsregeln vorliegen. Denn im Gegensatz zum Stahlbau, wo über große Werkstoffduktilitäten Spannungsspitzen herausplastizieren und umgelagert werden können, und auf dieser Grundlage einfache Ingenieurmodelle zum Entwurf und Bemessung von Bauteilen und Anschlüssen möglich werden, ist dies im Glasbau nicht möglich. So kann man Glasbauteile erst dann einsetzen, wenn Quasi-Duktilitäten geschaffen werden, indem Spannungsspitzen abbauende Zwischenschichten aus Kunststoff, Mörtel oder ähnlichem vorgesehen werden (s. Bild 1). Und auch dann verbleiben die Bemessungsmodelle stets auf der Grundlage streng elastischer Ansätze.

Verbindungsstrukturen, die zum Fügen der Glasbauteile, zur Anbindung der Glasscheiben an andere Tragelemente und zur Weiterleitung von Schnittgrößen dienen, spielen vor diesem Hintergrund eine besondere Rolle. Häufig sind die Anschlusskonstruktionen von Glasbauteilen punktförmig und die damit verbundenen lokalen Lasteinleitungen verursachen Spannungskonzentrationen im Glas, die aus verschiedener Art der Belastung herrühren:

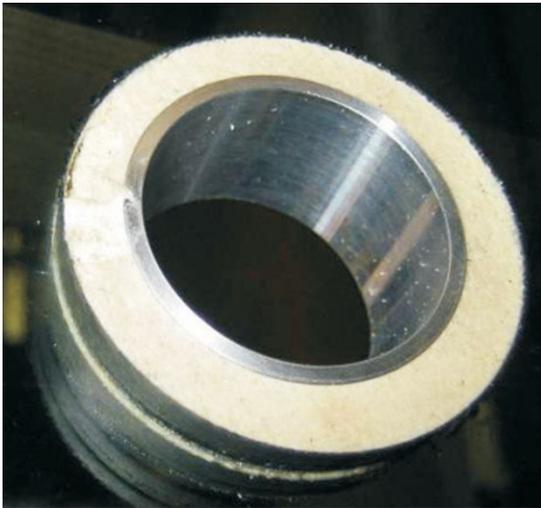


Bild 1. Zwischenschicht aus Mörtel zur Schaffung von Quasi-Duktilitäten
Fig. 1. Mortar-Interlayer to create ductility behaviour



Bild 2. Ausführungsbeispiel, bei dem Scher-Lochleibungsverbindungen vorgesehen wurden, Hauptbahnhof Berlin (links) und Glaspavillon Rheinbach (rechts)
Fig. 2. Example, where bolts in bearings were applied, Central Station Berlin (left hand side) and glass pavilion Rheinbach (right hand side)

1. Plattenbeanspruchung, bei der quer zur Scheibenebene wirkende Lasten aus Wind, Schnee, Eigengewicht etc. Kräfte erzeugen
2. Scheibenbeanspruchung, bei der Kräfte in Ebene der Scheibenmittelfläche, z. B. für Bauteilstöße, abzuleiten sind

Der Überblick über jüngst errichtete Glasbauwerke zeigt, dass insbesondere die in Scheibenebene mit Scher-Lochleibungsanschlüssen eingesetzten Gläser (auch aus Gründen der damit ermöglichten Austauschbarkeit der Glaselemente) häufig vorgesehen werden (s. Bild 2), bisher fehlen jedoch Ingenieurmodelle und Regeln, die die Ermittlung der örtlich auftretenden Spannungen sowie die Vorhersage der örtlichen Festigkeiten unter Ansatz von fertigungs- und montagebedingten Imperfektionen mit der geforderten Sicherheit möglich machen.

Im Folgenden wird ein konsistenter Ansatz für ein Bemessungsmodell für die Auslegung von SL-beanspruchten Anschlüssen im Glasbau vorgestellt, der auf der analytischen Ermittlung der Spannungszustände komplexer An-

schlussgeometrien basiert und darüber hinaus Imperfektionen aus Herstell- und Montagetoleranzen sowie aus Entwurfsparametern berücksichtigt. Er baut dabei auf den in [2] vorgestellten Grundlagen auf.

2 Spannungsgleichungen für beliebige SL-belastete Anschlüsse

Zur Herleitung der Spannungsgleichungen für beliebige SL-belastete Anschlüsse im konstruktiven Glasbau bedarf es scheinbar statischer Aussagen (Gleichgewicht, Verträglichkeit, Werkstoff), die unter Einführung der Airyschen Spannungsfunktion auf die bekannte Scheibendifferentialgleichung reduziert werden können:

$$\Delta\Delta F = 0 \quad (1)$$

Mithilfe dieser Lösung können nun zwei Grundspannungszustände gelöst werden, die dann durch Superposition zur Lösung des Gesamtspannungszustands einer Kreislochscheibe führt, die durch eine über einen Boh-

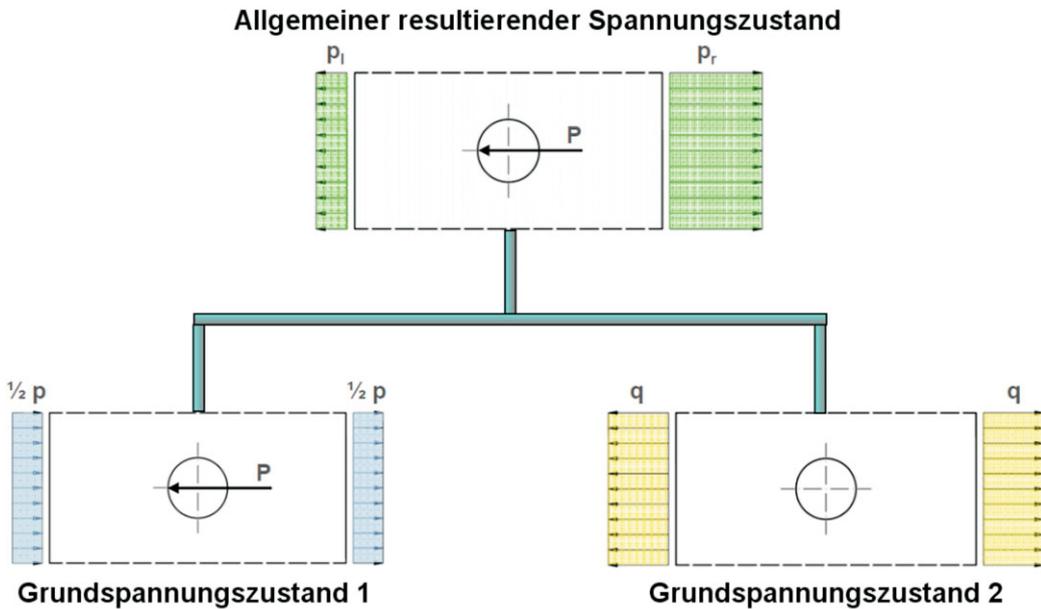


Bild 3. Lineare Kombination der beiden Grundspannungszustände zur Berechnung des allgemeinen resultierenden Spannungszustandes
 Fig. 3. Linear combination of the two basic stress states for calculation of the global resulting stress state

Allgemeiner Zugzustand

Scheibe mit n Lochbohrungen, jeweils belastet durch Bolzendruck $P_{x,i}$, Scheibe steht unter Zug

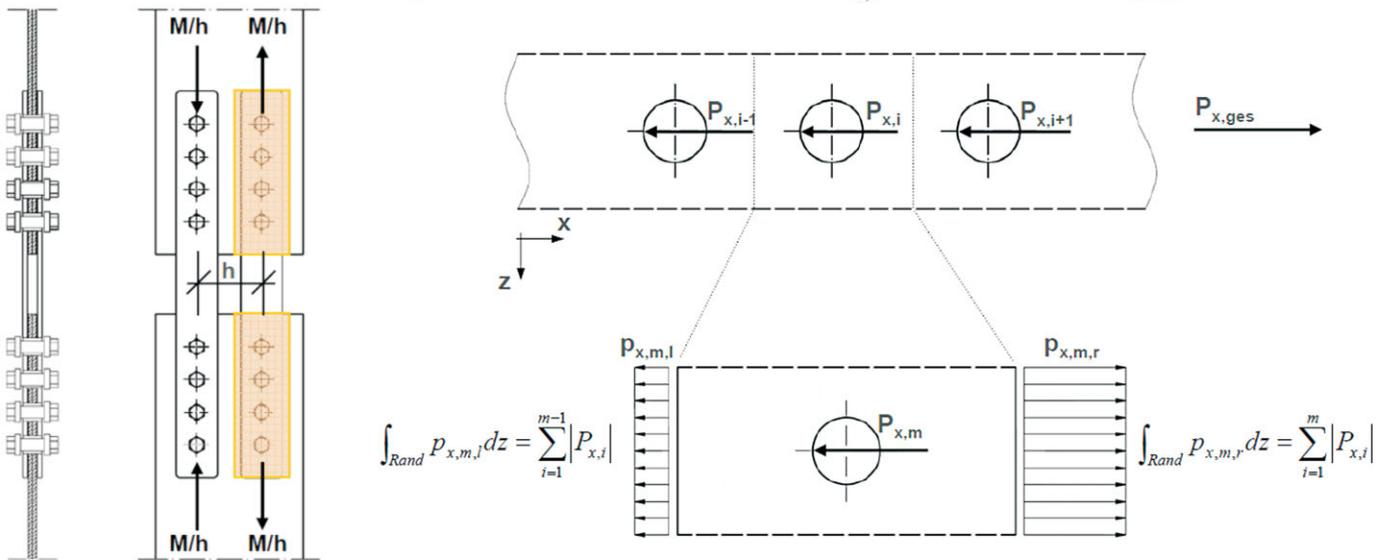


Bild 4. Querkraftfreier Momentenanschluss
 Fig. 4. Joint loaded by a moment, free of shear force

rungsrand eingeleitete Punktlast belastet ist (vgl. Bild 3). Somit lassen sich für beliebige Gleichgewichtssysteme die Spannungen am Bohrungsrand berechnen (vgl. Bild 4). Die beiden Grund-Spannungszustände werden im Folgenden vorgestellt. Die Herleitung der Grundformeln kann [1] bzw. [2] entnommen werden.

**2.1 Grundspannungszustand 1:
 Scheibe, allein durch Bolzendruck im Bohrloch belastet**

Es existieren analytische Lösungen für den Grundspannungszustand 1 für unendlich ausgedehnte Scheiben (s.

Bild 5), die durch Bolzendruck über die Bohrlochwandung (Lochleibung) belastet werden. Dabei kann der Belastungsansatz im Bohrungs-bereich (vgl. Bild 6) durch die Cosinus-Reihe

$$p(\varphi) = p_0 + \sum_{n=1}^{\infty} p_n \cdot \cos n\varphi \quad (2)$$

formuliert werden [2], [4]. Die Reihenwerte p_i sind mithilfe von FEM-Berechnungen zu bestimmen. Der Einfluss aus der Begrenztheit der Scheibenbreite auf Grundspan-

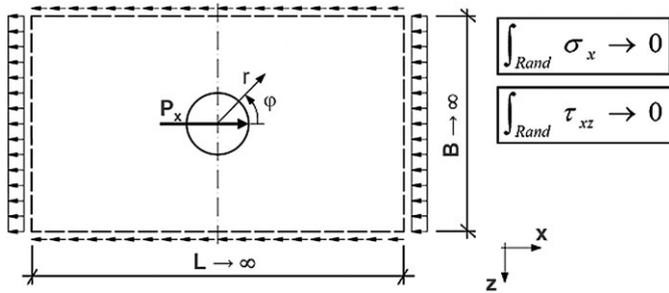


Bild 5. Durch Bolzendruck im Bohrloch belastete Scheibe
Fig. 5. Drilled pane, loaded by bolt pressure

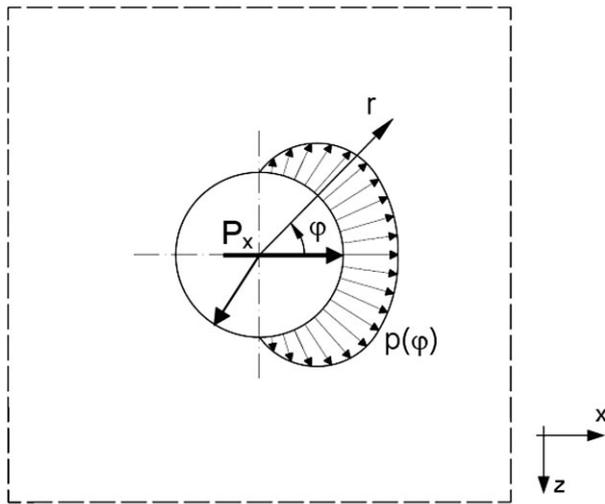


Bild 6. Durch Bolzendruck verursachte Spannungsverteilung im Bereich der Lochbohrung
Fig. 6. Stress distribution in the vicinity of the hole, caused by bolt load

nungszustand 1 wurde rechnerisch untersucht und kann bis zu einer Größe von $3d_o$ (wobei d_o = Bohrungsdurchmesser) vernachlässigt werden, so dass die Lösung für eine zweiseitig linienförmig gelagerte Scheibe mit begrenzter Scheibenbreite, bei der die Bolzenlast jeweils zu gleichen Teilen am linken und am rechten Scheibenrand weitergeleitet werden, hinreichend genau ist (s. Bild 7):

Radialspannung:

$$\sigma_{r, \text{Lochleibung}}(r, \varphi) = -\frac{p_0}{t} \cdot \frac{a^2}{r^2} - \frac{1-\mu}{4t} p_1 \frac{a}{r} \left(\frac{3+\mu}{1-\mu} + \frac{a^2}{r^2} \right) \cos \varphi - \frac{1}{2t} \sum_{n=2}^{\infty} p_n \frac{a^n}{r^n} \left((n+2) - n \cdot \frac{a^2}{r^2} \right) \cos n\varphi \quad (3)$$

Tangentialspannung:

$$\sigma_{\varphi, \text{Lochleibung}}(r, \varphi) = +\frac{p_0}{t} \cdot \frac{a^2}{r^2} + \frac{1-\mu}{4t} p_1 \frac{a}{r} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \cos \varphi + \frac{1}{2t} \sum_{n=2}^{\infty} p_n \frac{a^n}{r^n} \left((n-2) - n \cdot \frac{a^2}{r^2} \right) \cos n\varphi \quad (4)$$

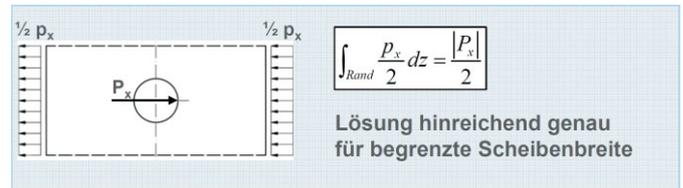


Bild 7. Grundspannungszustand 1
Fig. 7. Basic stress state 1

Schubspannung:

$$\tau_{r\varphi, \text{Lochleibung}}(r, \varphi) = 0 + \frac{1-\mu}{4t} p_1 \frac{a}{r} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \sin \varphi - \frac{1}{2t} \sum_{n=2}^{\infty} p_n \frac{a^n}{r^n} n \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \sin n\varphi \quad (5)$$

mit

- r, φ Polarkoordinatensystem bezogen auf die Bohrungsmitte
- p_i Terme der Reihenentwicklung des Belastungsansatzes
- a Bohrungsradius
- t Scheibendicke
- μ Querkontraktionszahl der Scheibe

2.2 Grundspannungszustand 2: Zugbeanspruchte Scheibe mit Bohrloch ohne Bolzendruck

Grundspannungszustand 2 ist eine Scheibe mit einer kreisförmigen Lochbohrung, die symmetrisch durch Linienlasten der Größe $1/2 p_x$ (resultierende Randlast entspricht genau der halben Bolzenlast, s. Bild 8) an den beiden seitlichen Scheibenkanten belastet wird.

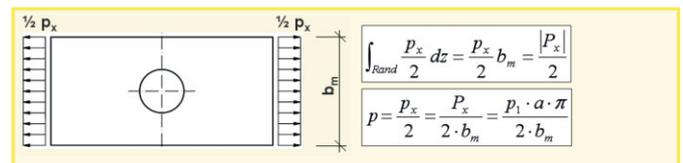


Bild 8. Grundspannungszustand 2
Fig. 8. Basic stress state 2

Die Scheibenbreite ist für die Beanspruchung der Scheibe in Grundspannungszustand 2 von entscheidender Bedeutung. Um eine Lösung auch für komplexe Anschlüsse anzubieten, wird die maßgebende Breite b_m eingeführt, die in Anlehnung an bekannte Lösungen aus dem Stahlbau in Abhängigkeit kleinster Rand- und Bohrlochabstände definiert wird (Bild 9).

Die Spannungskomponenten für Grundspannungszustand 2 lassen sich wie folgt berechnen:

Radialspannung:

$$\sigma_{r, \text{Grund}}(r, \varphi) = \frac{p_1 \cdot a \cdot \pi}{4t \cdot b_m} \cdot \left[1 - \frac{a^2}{r^2} + \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cdot \cos 2\varphi \right] \quad (6)$$

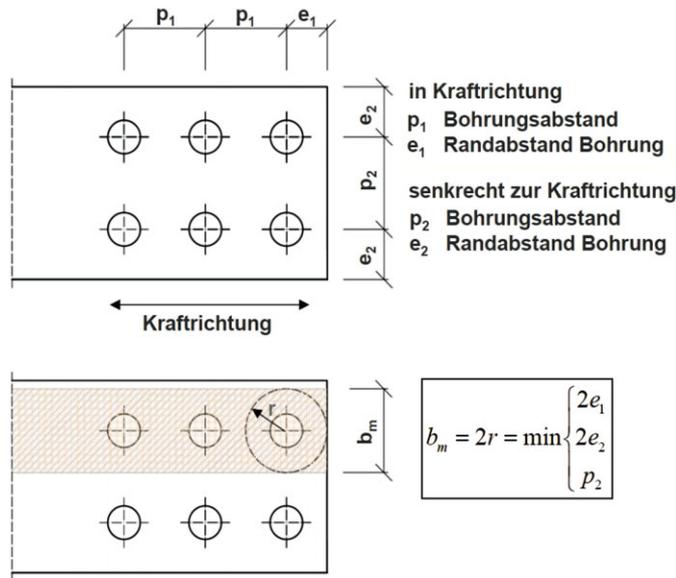


Bild 9. Definition der maßgebenden Scheibenbreite b_m
 Fig. 9. Definition of the relevant pane width b_m

Tangentialspannung:

$$\sigma_{\varphi, \text{Grund}}(r, \varphi) = \frac{p_1 \cdot a \cdot \pi}{4t \cdot b_m} \cdot \left[1 + \frac{a^2}{r^2} - \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cdot \cos 2\varphi \right] \quad (7)$$

Schubspannung:

$$\tau_{r\varphi, \text{Grund}}(r, \varphi) = \frac{p_1 \cdot a \cdot \pi}{4t \cdot b_m} \cdot \left[-1 - \frac{2a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right] \cdot \sin 2\varphi \quad (8)$$

mit

b_m maßgebende Scheibenbreite

K_m Parameter zur Vervielfachung des Grund-Spannungszustandes, der sich in Abhängigkeit der zu modellierenden Randbedingung bestimmt

2.3 Gesamtspannungszustand

Um nun den Gesamtspannungszustand zu berechnen, bedarf es, wie zuvor erläutert, der linearen Kombination der beiden Grundspannungszustände (s. Bild 10), so dass sich die Spannungskomponenten also auch für Verbindungen bei beliebiger Beanspruchung, nach den folgenden Gleichungen berechnen lassen.

Radialspannung:

$$\begin{aligned} \sigma_{r, (\text{SL, ges})}(r, \varphi, \xi) = & - \frac{p_0}{t} \cdot \frac{a^2}{r^2} - \frac{1-\mu}{4t} \cdot p_1 \cdot \frac{a}{r} \cdot \left(\frac{3+\mu}{1-\mu} + \frac{a^2}{r^2} \right) \cdot \cos \varphi - \\ & - \frac{1}{2t} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} p_n \cdot \frac{a^n}{r^n} \cdot \left((n+2) - n \cdot \frac{a^2}{r^2} \right) \cos n\varphi + \\ & + K_m \cdot \frac{p_1 \cdot a \cdot \pi}{4t \cdot b_m} \cdot \left[1 - \frac{a^2}{r^2} + \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cdot \cos 2\xi \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Tangentialspannung:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi, (\text{SL, ges})}(r, \varphi, \xi) = & + \frac{p_0}{t} \cdot \frac{a^2}{r^2} - \frac{1-\mu}{4t} \cdot p_1 \cdot \frac{a}{r} \cdot \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \cdot \cos \varphi + \\ & + \frac{1}{2t} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} p_n \cdot \frac{a^n}{r^n} \cdot \left((n-2) - n \cdot \frac{a^2}{r^2} \right) \cdot \cos n\varphi + \\ & + K_m \cdot \frac{p_1 \cdot a \cdot \pi}{4t \cdot b_m} \cdot \left[1 + \frac{a^2}{r^2} - \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cdot \cos 2\xi \right] \end{aligned} \quad (10)$$

Schubspannung:

$$\begin{aligned} \tau_{r\varphi, (\text{SL, ges})}(r, \varphi, \xi) = & 0 + \frac{1-\mu}{4t} \cdot p_1 \cdot \frac{a}{r} \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \cdot \sin \varphi + \\ & + \frac{1}{2t} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} p_n \cdot \frac{a^n}{r^n} \cdot n \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \cdot \sin n\varphi + \\ & + K_m \cdot \frac{p_1 \cdot a \cdot \pi}{4t \cdot b_m} \cdot \left[-1 - \frac{2a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right] \cdot \sin 2\xi \end{aligned} \quad (11)$$

Der Parameter K_m bestimmt sich dabei in Abhängigkeit des Gleichgewichtssystems des Gesamtanschlusses (vgl. Bilder 10 und 11), indem der Gesamtanschluss vereinfachend in Scheibenstreifen reduziert wird. Eine kreuzweise Untersuchung bei komplexen Schraubenbildern ist dabei zu führen. Die eingeführte Laufkoordinate ξ resultiert daraus, dass lediglich die betrachtete x- bzw. z-Komponente der resultierenden Bolzenlast zur Berechnung des Grundspannungszustandes herangezogen wird (s. Bild 12).

Der analytische Ansatz stellt bei Vergleich der Ergebnisse aus Gleichung (10) mit den Ergebnissen aus so weit durchgeführten numerischen Simulationen eine ingenieurtechnische Lösung dar (s. Bild 13).

3 Einflussgrößen, die sich auf die Spannungen am Bohrungsrand auswirken

Die vorgestellten Spannungsgleichungen gehen bisher von toleranzfreien Systemen aus, bei denen darüber hinaus keine Einflüsse aus Entwurfsparametern berücksichtigt wurden. Um nun Einflussparameter zu erfassen, die sich auf die Beanspruchung der Scheibe auswirken, wurden diese erstmals systematisch mittels FEM-Berechnungen untersucht und zahlenmäßig erfasst.

Unterschieden wurde dabei zwischen Einflussfaktoren, die sich ergeben aus

- der durch die Einzellast hervorgerufenen Druckverteilung am Bohrungsrand, die abhängig ist
 - von der Geometrie der Zwischenschicht
 - dem Bolzendurchmesser d_{Bolzen} und
 - der Steifigkeit der Zwischenschicht E_{ZW}
- dem Entwurf der Verbindung, wie
 - Randabstand der Bohrungen (e_1 und e_2),
 - Bohrungsabstand (p_1 und p_2) und
 - planmäßig unsymmetrische Druckverteilung über die Scheibendicke
- und durch solche, die sich aus Fertigungs- und Herstelltoleranzen ableiten lassen, wie
 - Scheibenversatz d bei VSG

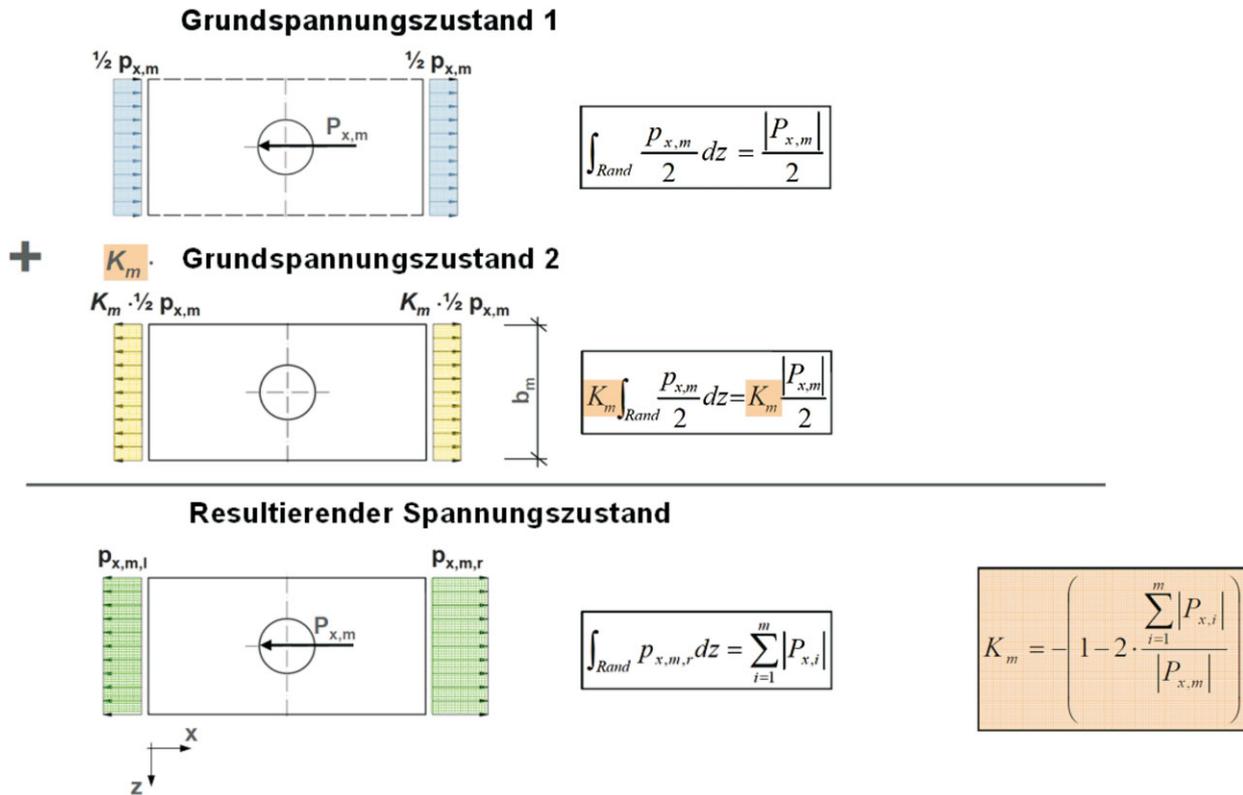


Bild 10. Ermittlung des resultierenden Spannungszustandes und des Parameters K_m für Normalkraftverbindungen
 Fig. 10. Derivation of the resulting stress state and of the parameter K_m for joints loaded by normal load

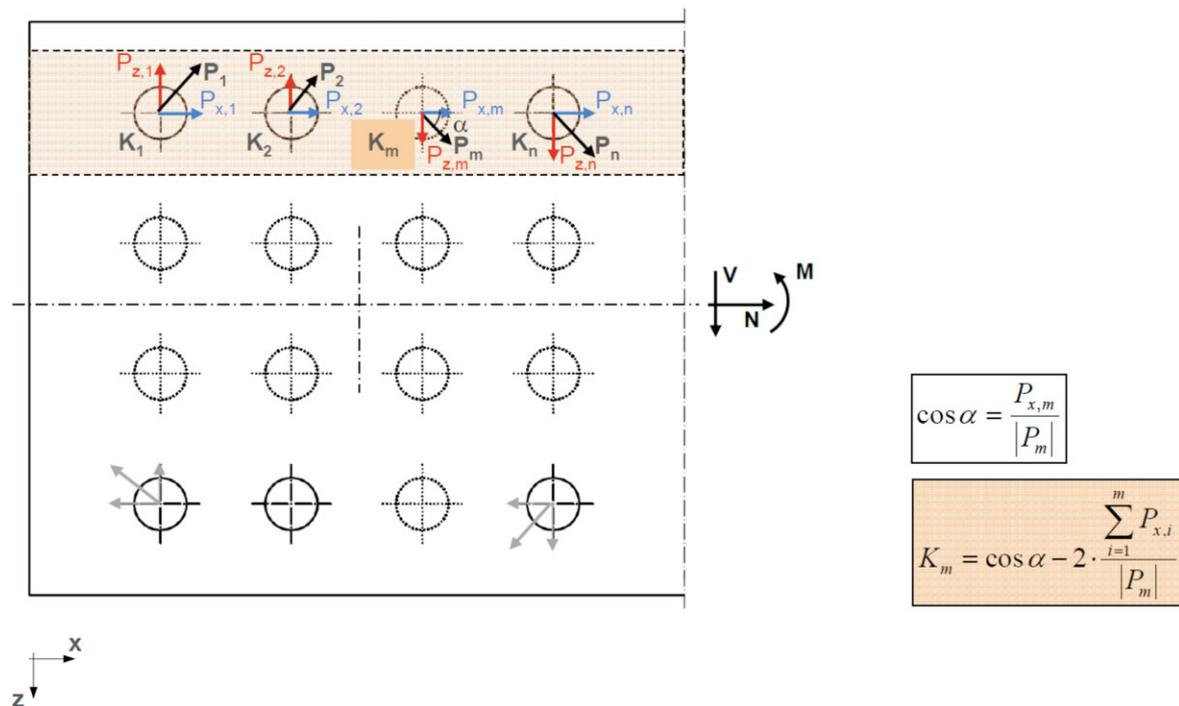
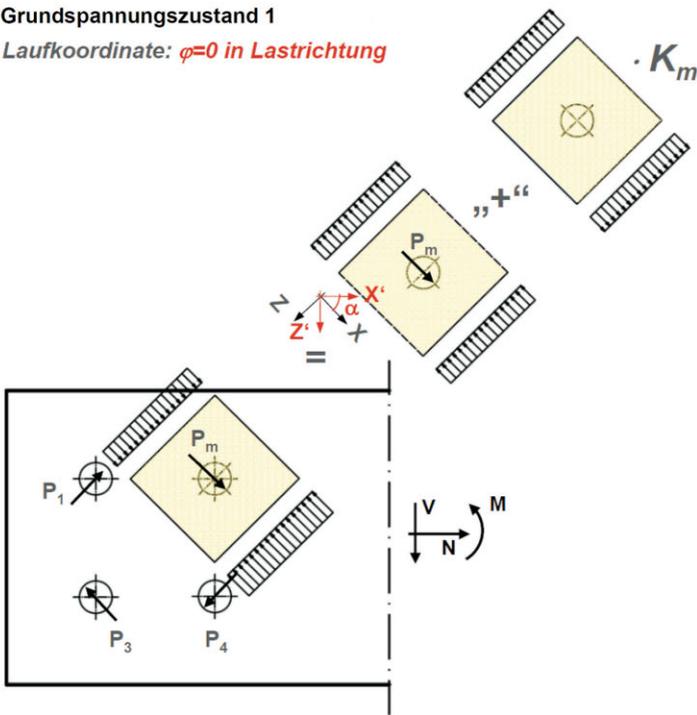


Bild 11. Ermittlung des Parameters K_m für komplexe Verbindungen, die durch Normalkraft, Querkraft und Moment beansprucht werden am Beispiel eines untersuchten Streifens
 Fig. 11. Determination of the parameter K_m for joints loaded by normal and shear load as well as by moment at example of investigated strip

Spannungszustand allgemein

Grundspannungszustand 1

Laufkoordinate: $\varphi=0$ in Lastrichtung



Ermittlung von K_m

Grundspannungszustand 2

Laufkoordinate: $\xi=\varphi+\alpha=0$ in x-Richtung

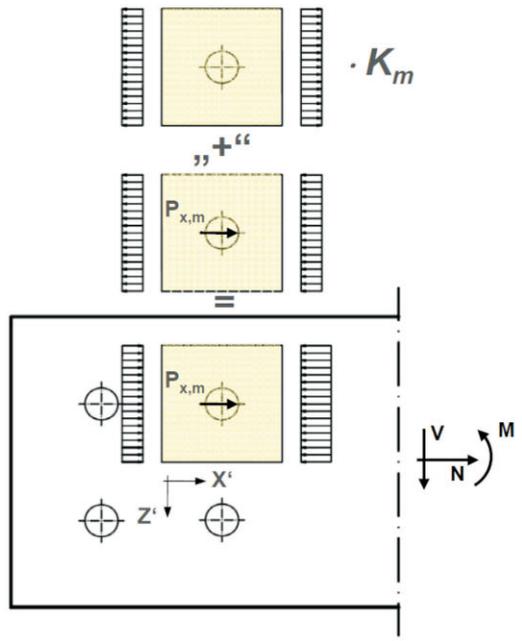


Bild 12. Darstellung der Laufkoordinaten φ und ξ
 Fig. 12. Illustration of the running coordinates φ and ξ

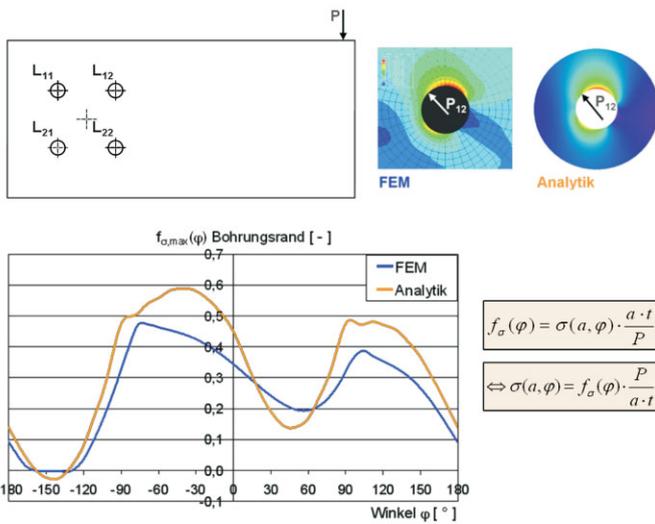


Bild 13. Vergleich der Berechnungsergebnisse aus Analytik und FEM für Querkraft-Momentenanschluss für Lochbohrung L_{12}
 Fig. 13. Comparison of results of analytical and Finite Element calculation for shear-bending joint for hole L_{12}

- Schlupf Δ_s des Bolzens im Zwischenmaterial sowie
- unplanmäßig außermittige Position des Bolzens in der Lochbohrung

Der Einfluss der Scheibenbreite B auf die maximale Spannung am Bohrungsrand kann exemplarisch Bild 14 entnommen werden. Man sieht, dass die maximalen Zugspannungen mit abnehmender Scheibenbreite überproportional ansteigen. Durch umfangreiche rechnerische Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die analytische

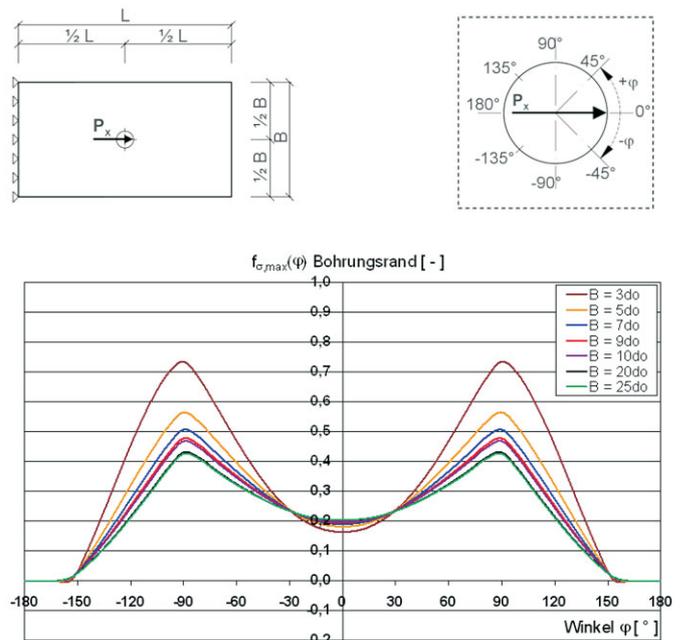


Bild 14. Einfluss der Scheibenbreite auf den Spannungsfaktor f_{σ} (s. Bild 13) am Bohrungsrand
 Fig. 14. Influence of the pane width on the stress factor f_{σ} (cf. Figure 13) at the hole edge

Lösung unter Berücksichtigung von b_m für $b_m \geq 4 d_o$ mit hinreichender Genauigkeit und auf der sicheren Seite liegend gültig ist. Für kleinere maßgebende Breiten sind die berechneten Spannungen mit entsprechenden Beiwerten zu beaufschlagen. Für Scheibenbreiten $b_m \leq 3 d_o$ sind die Gleichungen (9), (10) und (11) nicht mehr anwendbar, da die Bolzenlast bei kleinen Scheibenbreiten eine Einschnü-

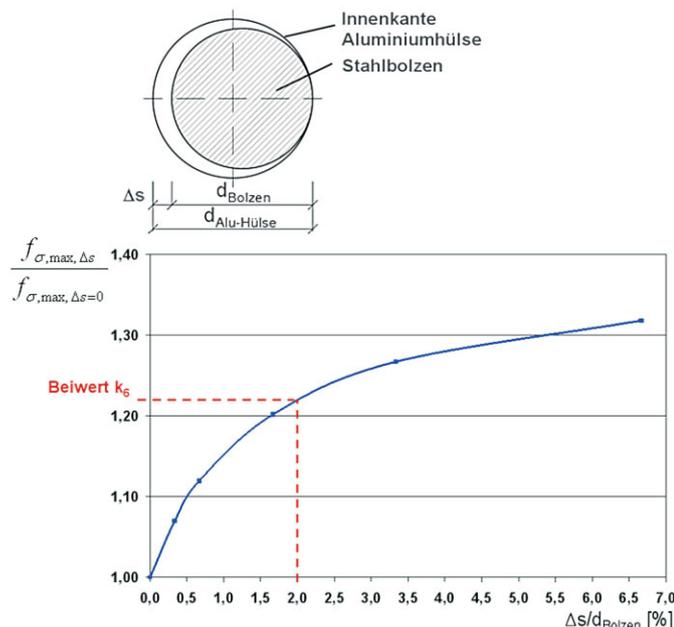


Bild 15. Spannungserhöhung am Bohrungsrand infolge Schlupf Δs
 Fig. 15. Increase of stress at the hole edge caused by slippage Δs

rung der Glasscheibe im Bereich der Lochbohrung bewirkt, die durch die Analytik nicht erfasst wird. Für den konstruktiven Glasbau sind Scheibenbreiten $< 3 d_0$ in der Regel jedoch nicht praxisrelevant, so dass von einer weiterführenden Untersuchung abgesehen wurde.

Die Ergebnisse aus den Parameteruntersuchungen wurden so aufbereitet, dass Spannungserhöhungsfaktoren k_i für die nicht zu vernachlässigenden Einflussfaktoren bereitgestellt werden können, wie dies beispielsweise in Abhängigkeit des Schlupfes Δs in Bild 15 dargestellt ist. Insgesamt wurden sieben Beiwerte k_i erarbeitet, wovon drei Beiwerte aus Gründen der Übersichtlichkeit direkt in die im folgenden Abschnitt vorgestellte Bemessungsformel integriert werden konnten. Die aus Montage und Fertigung zu erwartenden Toleranzen können dadurch bereits im Entwurf Berücksichtigung finden. Bei der Ausführung sind entsprechend einzuhaltende Grenzwerte für maximal zulässigen Schlupf und Außermittigkeit des Bolzens streng zu kontrollieren.

Die Beiwerte k_1 bis k_5 können den folgenden Tabellen unter Berücksichtigung zulässiger Konstruktionsbedingungen entnommen werden [1]:

Beiwert k_1 zur Berücksichtigung von unplanmäßiger Druckverteilung über t

e_y	in mm	0	10	15	20	30	45
k_1	–	1,0	3,5	4,8	6,1	8,7	12,6

Beiwert k_2 zur Berücksichtigung von kleinen maßgebenden Breiten

b_m	$b_m \geq 5 d_0$	$3 d_0 \leq b_m < 5 d_0$
k_2	1,0	1,1

Beiwert k_3 zur Berücksichtigung von kleinen Randabständen $e_1 = e_2$, für $e_1 \neq e_2$ gilt: $k_3 = 1,0$

$e_1 = e_2$	$1,5 d_0$	$2,5 d_0$	$3,5 d_0$	$> 3,5 d_0$
k_3	1,21	1,09	1,03	1,0

Beiwert k_4 zur Berücksichtigung von geringen Bohrlochabständen p_1

p_1	$3 d_0$	$5 d_0$	$7 d_0$	$9 d_0$	$> 9 d_0$
k_4	1,23	1,10	1,06	1,04	1,0

Beiwert k_5 zur Berücksichtigung von Versatz bei VSG

Glasprodukt	2-schichtiges VSG	Monoscheiben
k_5	0,60	1,0

4 Einfache Handrechenformel

Es gelingt, das analytische Verfahren in eine einfache Bemessungsgleichung zu überführen, bei deren Anwendung die maßgebenden Spannungen des Glasbauteils in Abhängigkeit der an der Einzelbohrung angreifenden Bemessungsbolzenlast, des Bohrungsdurchmessers und der Scheibendicke ermittelt werden können, indem die beiden Spannungsanteile jeweils auf den Quotienten $P/(d_0 \cdot t)$ reduziert werden:

$$\sigma_{\phi, \max, d} = \prod_{i=1}^5 k_i \cdot \left(1,2 + 2,2 \frac{K_m}{b_m} \right) \cdot \frac{P_d}{d_0 \cdot t} \leq \sigma_{zul} \quad (12)$$

darin sind

- P_d Resultierende Bemessungslast an der maßgebenden Bohrung
- d_0 Bohrungsdurchmesser
- t Glasdicke (einer Glasschicht bei VSG)
- k_i Beiwerte zur Berücksichtigung von Fertigungs- und Entwurfsparametern gemäß o. a. Tabellen
- b_m maßgebende Breite in $[d_0]$ gemäß Bild 9
- K_m Beiwert zur Berücksichtigung des Gleichgewichtssystems des Anschlusses gemäß Bilder 10 und 11
- σ_{zul} Bemessungswert der Festigkeit des Glasbauteils

Zur Anwendung der Gleichung (12) ist nach folgenden Schritten vorzugehen:

1. Ermittlung der am Gesamtanschluss angreifenden Schnittgrößen M, N, V
2. Verteilung von M, N , und V auf die Einzelbolzen unter Berücksichtigung des polaren Trägheitsmoments I_p und der Längskraftverteilung über die Verbindungslänge
3. Ermittlung der maßgebenden Breite b_m
4. Zusammenstellen der Beiwerte k_i
5. Berechnen des Beiwerts K_m

Dem Bemessungsmodell liegt das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte zugrunde, wie es die DIN 18008 vorsieht. Zur Vervollständigung des Bemessungsvorschlages bedarf es nun noch der Ableitung der Teilsicherheitsbeiwerte

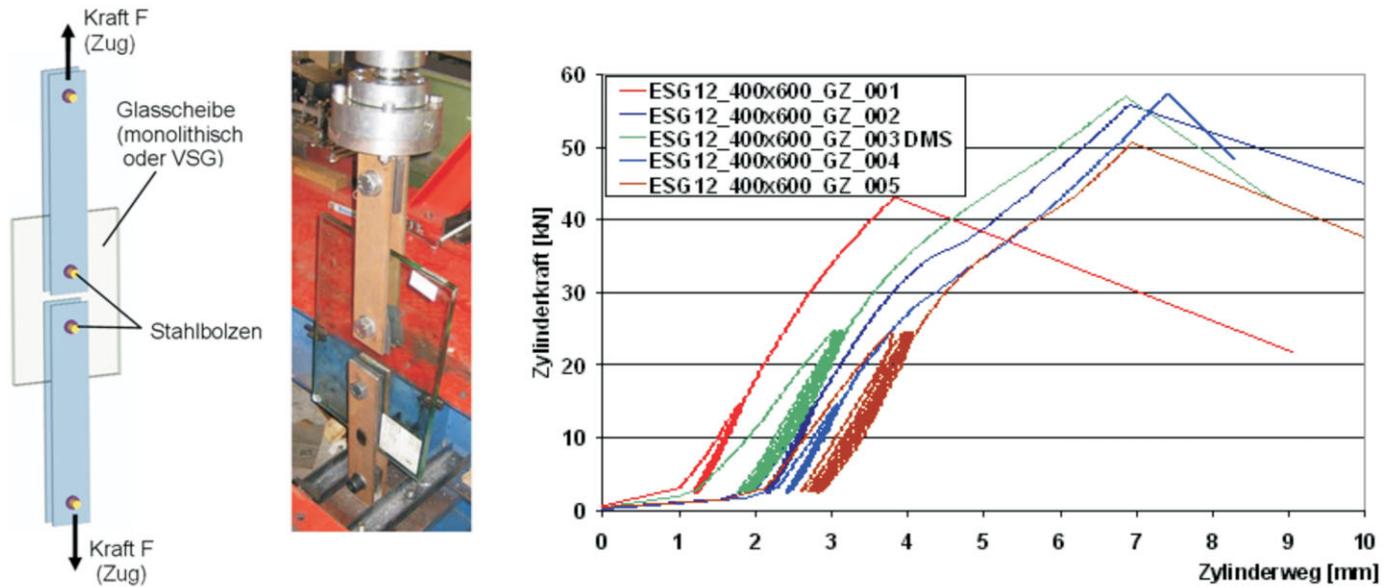
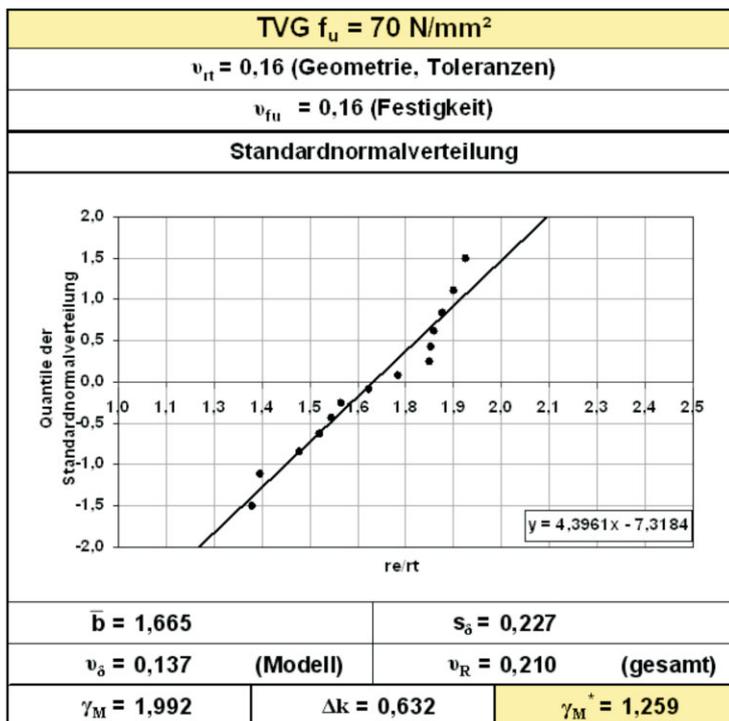


Bild 16. Experimentelle Untersuchungen für Normalkraft-Anschlüsse
 Fig. 16. Experimental investigations for normal joints

te γ_M für ESG und TVG, indem die Modellsicherheit der neu abgeleiteten Bemessungsformel in Hinblick auf die experimentell ermittelten Tragfähigkeiten (Bild 16) bestimmt wird. Die Auswertung erfolgt nach dem semiprobabilistischen Verfahren, wie es die DIN EN 1990 vorsieht, indem Bemessungswerte und Sicherheitselemente durch einen Vergleich der aus der vorgeschlagenen neuen Bemessungsformel berechneten Tragfähigkeiten r_t mit den experimentell ermittelten Traglasten r_e abgeleitet

werden können. Bilder 17 und 18 stellen die Inverse der Summenhäufigkeit der Normalverteilung über den Quotienten r_e/r_t getrennt für TVG und ESG dar, aus denen sich jeweils γ_M bestimmen lässt und mit dem Ziel eines einheitlichen Wertes für beide Glasprodukte $\gamma_M = 1,3$ vorgeschlagen wird. Für TVG liegt dabei ein Festigkeitswert von 70 N/mm^2 und für ESG von 80 N/mm^2 zugrunde [4].



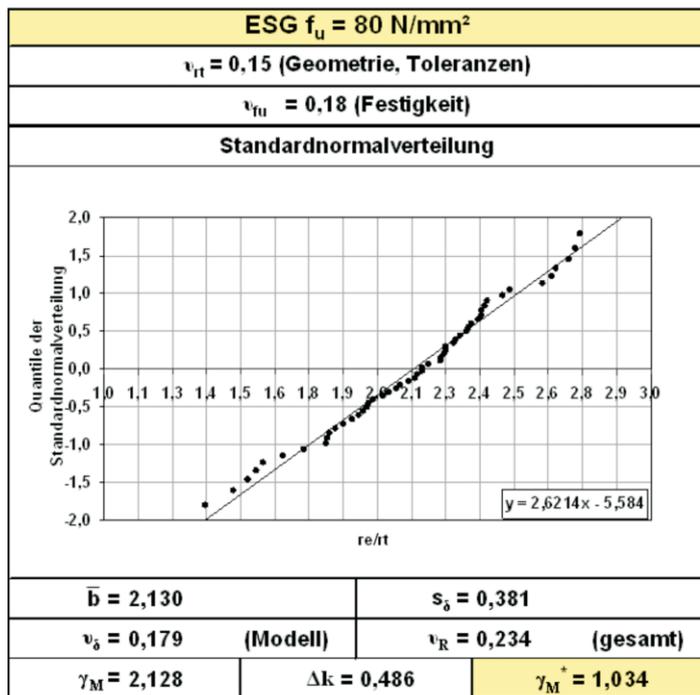
$$\sigma_{zul} = \frac{f_u}{\gamma_M}$$



Bruchbild TVG

Bild 17. Ermittlung des Teilsicherheitsbeiwerts γ_M für TVG in Anlehnung an DIN EN 1990 Anhang D mit 75% Vertrauenswahrscheinlichkeit

Fig. 17. Derivation of the partial safety factor γ_M for heat strengthened glass according to DIN EN 1990 Annex D with 75% confidence probability



$$\sigma_{zul} = \frac{f_u}{\gamma_M}$$



Bruchbild ESG

Bild 18. Ermittlung des Teilsicherheitsbeiwerts γ_M für ESG in Anlehnung an DIN EN 1990 Anhang D mit 75% Vertrauenswahrscheinlichkeit

Fig. 18. Derivation of the partial safety factor γ_M for toughened glass according to DIN EN 1990 Appendix D with 75% confidence probability

5 Zusammenfassung

Die Vorhersage des Tragverhaltens von SL-belasteten Anschlüssen im konstruktiven Glasbau konnte durch jüngste Forschungsarbeiten ([1], [6]) erheblich vereinfacht werden, indem Spannungszustände im Bohrungsbereich mithilfe überschaubarer Handrechenmodelle nun einfach abgebildet werden können. Für in Krafrichtung hintereinander liegende Schrauben ist das Konzept experimentell verifiziert worden. Für komplexere, mit Moment beanspruchte Schraubenbilder sind bisher Einzelversuche durchgeführt worden. Aufgrund der bei diesen Anschlüssen größeren Abweichungen von den Vereinfachungen des Modells, die auf der sicheren Seite liegen, sind hier gegebenenfalls noch weitere Versuche sinnvoll.

Gleichwohl sind bereits jetzt Entwurf und Bemessung somit erheblich vereinfacht, da die Notwendigkeit numerischer Berechnungsmethoden reduziert ist, oder in zahlreichen Fällen ganz auf sie verzichtet werden kann.

6 Danksagung

Die Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert. Beteiligter Industrieverband: Deutscher Ausschuss für Stahlbau e.V. (DAST), Düsseldorf. Zahlreiche experimentelle Untersuchungen wurden durch den Fachverband Konstruktiver Glasbau e.V. und deren Mitglieder bezuschusst. Den Förderern sei herzlich gedankt für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Baitinger, M.: Zur Bemessung SL-belasteter Anschlüsse im konstruktiven Glasbau. Dissertation am Lehrstuhl für Stahlbau RWTH Aachen, Aachen: Shaker Verlag 2010.
- [2] Feldmann, M., Pils, M., Colomer Segura, C.: Tragfähigkeit von Lochleibungsverbindungen vorgespannter Glasscheiben zur Ausbildung von Anschlüssen im konstruktiven Glasbau, Stahlbau 77 (2008), Heft 1, S. 17–25.
- [3] Girkmann, K.: Flächentragwerke Einführung in die Elastostatik der Scheiben, Platten, Schalen und Faltwerke. Unveränderter Nachdruck, Wien – New York: Springer-Verlag 1974.
- [4] Laufs, W.: Ein Bemessungskonzept zur Festigkeit thermisch vorgespannter Gläser. Dissertation am Lehrstuhl für Stahlbau RWTH Aachen, Aachen: Shaker Verlag 2000.
- [5] Techen, H.: Fügetechnik für den konstruktiven Glasbau, Dissertation, Bericht Nr. 11 Technische Universität Darmstadt Institut für Statik, 1997.
- [6] Schlussbericht Nr. 14197/N: Stahl-Glas-Verbindungen in Hinblick auf die Normung. DAST-Forschungsbericht Nr. 2/07.

Autoren des Beitrages:

Dr.-Ing. Mascha Baitinger, baitinger@stb.rwth-aachen.de,
Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann, feldmann@stb.rwth-aachen.de,
Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, RWTH Aachen,
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen