

Sicherheit von Glasfassaden

1. Einleitung

Entsprechend eines Grundsatzbeschlusses des Sachverständigenausschusses "Klebertechnik" des Deutschen Instituts für Bautechnik sind beim Einsatz von Structural-Glazing-Elementen oberhalb von 8 m zusätzliche mechanische Halterungen als additive Sicherheitselemente für die Aufnahme des Windsogs vorzusehen, die die äußere Scheibe der Fassade bei einem Versagen der Silikonklebung abfangen kann. Um einen Kontakt Glas-Metall auszuschließen, werden diese mechanischen Halterungen durch Elastomere abgepolstert, damit sie die Belastung erst übertragen, nachdem die Silikonklebung versagt hat. Von den Fassadenherstellern wurden zur Erfüllung dieser Auflage verschiedene Systeme entwickelt. Die zusätzliche Halterung führt zu einer zusätzlichen Sicherheit für die Glasfassade. Die Frage stellt sich, ob die Halterung notwendig ist, wenn die Verklebung mit einer hinreichend großen Sicherheit dimensioniert ist.

Im Rahmen des vom DIBt geförderten Forschungsvorhaben sollte geklärt werden, inwieweit die Glasscheiben, die mechanischen Halterungen und die Silikonklebung mit ihren deterministischen Sicherheitsfaktoren die Gesamtsicherheit der Fassade beeinflussen, oder welche Sicherheitsfaktoren für eine befriedigende Gesamtsicherheit angesetzt werden müssen.

2. Vorhandene Zulassungsverfahren und deterministisches Vorgehen

2.1 Betrachtetes System

Für die Glasscheibe wird in der Bemessung der Sicherheitsbeiwert γ_G verwendet. Die Silikonklebung erhält eine horizontale Beanspruchung infolge Windsog senkrecht zur Verklebungfläche. Die Sicherheit gegenüber dieser Beanspruchung wird durch γ_s gewährleistet. Sobald die Verklebung versagt, greift die mechanische Halterung. In Abhängigkeit von der Art der Halterung entsteht dann für den Lastabtrag der Scheibe ein neues statisches System, in dem wieder für das Glas ein Sicherheitsfaktor γ_G und für die Halterung ein Sicherheitsfaktor γ_H definiert werden.

2.2 Vorhandene Zulassungsverfahren

In vorhandenen Zulassungsverfahren [1,2] ist der Nachweis der Standsicherheit der Einselemente und ihrer Befestigung am Tragwerk erforderlich.

2.3 Deterministisches Vorgehen

Für die Untersuchung der Systemsicherheit führt ein deterministisches Vorgehen rasch zu folgender Aussage. Sofern nämlich γ_H kleiner als γ_S gewählt wird, ist das System nach Versagen der Verklebung nicht in der Lage, die Lasten aufzunehmen. Die Systemsicherheit ist gleich der Sicherheit der Silikonverklebung. Sofern γ_H größer als γ_S gewählt wird, ist die Systemsicherheit gleich γ_H .

3. Grundlagen der probabilistischen Zuverlässigkeitstheorie

Für den Nachweis der Zuverlässigkeit wurden verschiedene Verfahren entwickelt [10]. Mit Hilfe einer probabilistischen Beschreibung der Einwirkungen und der Widerstände wird die Versagenswahrscheinlichkeit der Glasfassaden direkt untersucht. Weil die Zufallsvariablen R und S voneinander unabhängig sind, wird die Versagenswahrscheinlichkeit p_f mit

$$\begin{aligned} p_f &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_R(r) f_S(s) dr ds \\ &= \int_0^{\infty} f_R(r) [1 - F_S(r)] dr \end{aligned} \quad (7)$$

eingeführt, worin $F_S(s)$ die Verteilungsfunktion der Einwirkung S ist.

4. Bestimmung der Systemsicherheit

4.1 Probabilistisches Vorgehen

Da jedes einzelne Element der Glasfassade eine unterschiedliche Rolle bei der Systemsicherheit spielt, wird ein sogenannter „probabilistischer Baum“ in Bild 9 dargestellt, an dem der Einfluß der einzelnen Elemente auf die Systemsicherheit erklärt wird.

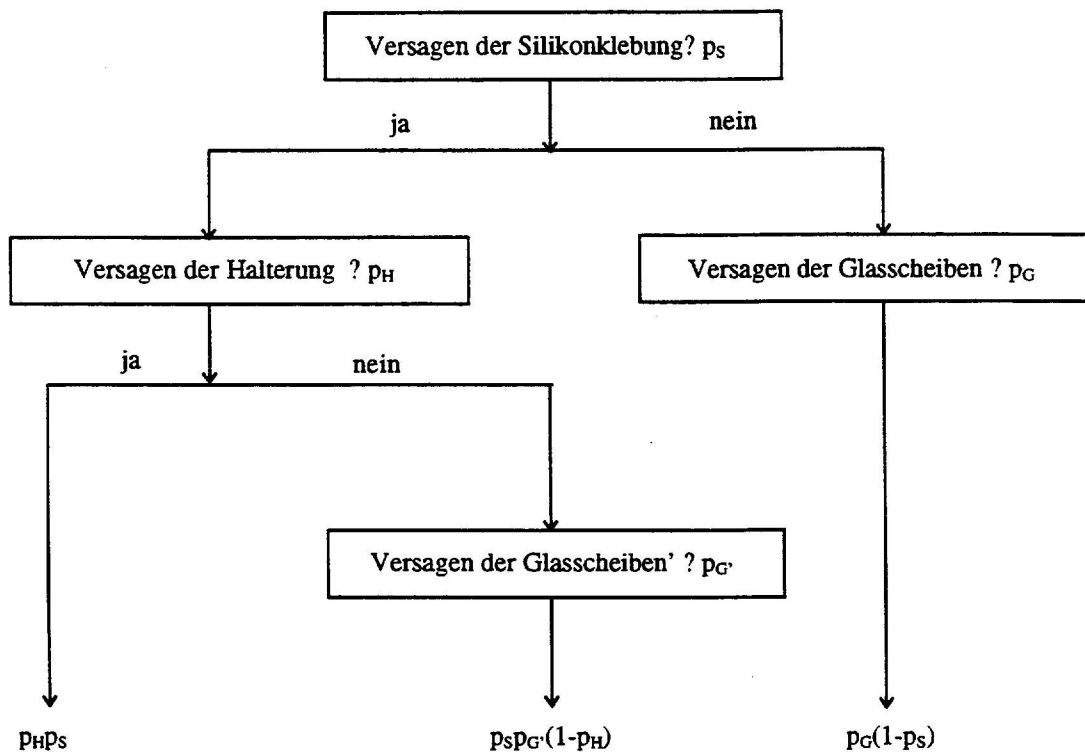


Bild 9. Versagenswahrscheinlichkeit der Fassade mit Halterung

Unter der Voraussetzung, daß das Versagen der einzelnen Elemente nicht voneinander abhängig ist, kann die Versagenswahrscheinlichkeit der Glasfassade nach Bild 9 durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$p_f = p_H \cdot p_s + p_s \cdot p_{G'} \cdot (1 - p_H) + p_G (1 - p_s) \quad (9)$$

mit

p_f =Versagenswahrscheinlichkeit des Systems

p_G =Versagenswahrscheinlichkeit der Glasscheibe

p_s =Versagenswahrscheinlichkeit der Silikonklebung

$p_{G'}$ =Versagenswahrscheinlichkeit der Glasscheibe nach dem Versagen der Silikonklebung

p_H =Versagenswahrscheinlichkeit der mechanischen Halterung

Analog ergibt sich für die Versagenswahrscheinlichkeit der Glasfassade ohne mechanische Halterung:

$$p_f = p_s + p_G (1 - p_s) \quad (10)$$

Nach den und Gln. (9) und (10) ist es möglich, die Ermittlung der Systemsicherheit in die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Elemente zu verwandeln. Mit Hilfe dieses quantitativen Zusammenhangs kann eine sichere und wirtschaftliche Bemessung für Glasfassaden durchgeführt werden.

4.2 Versagenswahrscheinlichkeit der einzelnen Elemente

4.2.1 Verteilungen der Lasten und ihre charakteristischen Werte

Einwirkung infolge Windbelastung

Die Windbelastung wird durch den Staudruck und den Formbeiwert beschrieben. Die Jahresextremwerte des Staudruckes werden ebenfalls näherungsweise als Extremwertverteilung Typ I mit $V=0,24$ ($\alpha_s\mu_s=4,8$) für Normallagen in Deutschland angenommen [10].

4.2.2 Verteilung der Widerstände und ihre charakteristischen Werte

Die Widerstandsfähigkeit eines Baustoffes gegenüber äußeren Beanspruchungen ist im wesentlichen von der Festigkeit des Baustoffes abhängig.

Glasscheibe

Aus [13] kann geschlossen werden, daß die Verteilung der Biegezugfestigkeit des Glases mit log-Normalverteilung gut beschrieben werden kann. Nach den Untersuchungen in [13] beträgt der Variationskoeffizient der Festigkeit von ESG 0,05-0,07.

Silikonklebung

Die Tragfähigkeit der Silikonklebung wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. [16] enthält Angaben zur Versuchsdurchführung, mit denen die Tragfähigkeit der Silikonklebung bestimmt werden kann. Im allgemeinen wird hier die Festigkeit der Silikonklebung auch als log-Normalverteilung angenommen. Der Variationskoeffizient beträgt 0,2.

Mechanische Halterung

In der Regel besteht die mechanische Halterung aus Aluminium. Nach [10] wird die Festigkeit der mechanischen Halterung ebenfalls durch eine log-Normalverteilung beschrieben. Der Variationskoeffizient wird mit $V < 0,1$ angenommen.

4.2.3 Versagenswahrscheinlichkeit des einzelnen Elementes

Nach Gl.(7) für die Versagenswahrscheinlichkeit des einzelnen Elementes für den Bezugszeitsraum von einem Jahr erhält man

$$p_f = \int_0^{\infty} \frac{1}{z\sqrt{2\pi}V_R} \exp\left\{-\frac{\left(\ln \frac{z}{\gamma_0}\right)^2}{2V_R^2}\right\} \left\{1 - \exp[-\exp(\alpha_s \mu_s (1-z))]\right\} dz \quad (19)$$

Bei den bekannten Variationskoeffizienten und den festgelegten Fraktilen auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite ist die Versagenswahrscheinlichkeit eine Funktion des Sicherheitsfaktors γ .

In Bild 12 ist die Einwirkung verschiedener q %-Fraktiler der Last unter verschiedenen Sicherheitsfaktoren eingetragen. Hier ist die q -Fraktile der Windbelastung ein bestimmter Wert, der mit einer Wahrscheinlichkeit von $1-q$ in einem Jahr erreicht und überschritten wird. Da die in DIN 1055 [11] angegebene Windlast verschiedene Fraktile für die unterschiedlichen Windzonen besitzt, zeigt ein Vergleich in Bild 12, daß ein fester Sicherheitsfaktor für die vier verschiedenen Windzonen unterschiedliche Versagenswahrscheinlichkeiten bringt.

In Bild 13 ist beispielhaft die Versagenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von dem gewählten Sicherheitsbeiwert für Windbelastung mit 98%-Fraktilewert (Zone I DIN 1055 Teil 4 [11]) aufgetragen. Dabei sind verschiedene Streuungen des Widerstands berücksichtigt worden. Bei einem einzelnen Element ist ein Sicherheitsfaktor von $\gamma \approx 2,0$ für eine Versagenswahrscheinlichkeit von 10^{-6} ausreichend.

4.3 Systemversagen

Das Systemversagen wird nach den Bildern 9 und 10 und Gl.(9) und (10) bestimmt. Die Versagenswahrscheinlichkeit des einzelnen Elementes kann dem Bild 13 entnommen werden.

Bild 14a zeigt die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Glasfassade mit und ohne mechanische Halterung in Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors der Silikonklebung. Es ist deutlich festzustellen, daß nur bei relativ niedrigen Sicherheitsfaktoren für die Klebung ein relevanter Einfluß der Halterung vorhanden ist. Für größere Werte von γ_s ist kein signifikanter Unterschied mit und ohne Halterung zu erkennen. Die gleiche Aussage kann auch aus der umgerechneten Gesamtsicherheit geschlossen werden, die in Bild 14b als Funktion der Sicherheit der Klebung dargestellt ist.

Bild 15 zeigt den Vergleich der verschiedenen Sicherheitsfaktoren für die Glasscheibe der Glasfassade mit Halterung. Es ist darauf hinzuweisen, daß für die Gesamtsicherheit der Glasfassade die Sicherheitsfaktoren der Glasscheibe von ausschlaggebender Bedeutung ist, egal ob mit oder ohne mechanische Halterung. Ein Mindestsicherheitsfaktor von 2,0 für die Glasscheibe ist erforderlich, um die Gesamtsicherheit des Systems zu gewährleisten. Ohne eine mechanische Halterung besitzen die Glasscheibe und die Silikonverklebung die gleiche Bedeutung auf die Gesamtsicherheit der Fassade. Beide Elemente müssen mit dem gleichen Sicherheitsfaktor bemessen werden.

Bild 16 zeigt den Einfluß der Sicherheit der Glasscheibe nach dem Versagen der Silikonklebung. Die Beanspruchung der Glasscheibe nach dem Versagen der Silikonklebung ist von der Form der mechanischen Halterung abhängig. Aus Bild 16 kann entnommen, daß die Form der mechanischen Halterung nur einen sehr geringen Einfluß auf die Gesamtsicherheit der Fassade hat.

Bild 17 zeigt den Einfluß der Sicherheit der mechanischen Halterung. Wenn $\gamma_H > 1$, nimmt die Gesamtsicherheit der Fassade mit dem Sicherheitsfaktor der mechanischen Halterung nicht deutlich zu.

Die Bilder 18 und 19 zeigen den Einfluß der verschiedenen Fraktile der Windbelastung auf die Gesamtsicherheit der Glasfassade. Prinzipiell darf dieser Einfluß nicht vernachlässigt werden.

3. Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Eine Betrachtung der Gesamtsicherheit der Glasfassade führt nur unter Ansatz eines probabilistischen Vorgehens zu vernünftigen Ergebnissen. Die durchgeführte Studie zeigte folgende grundlegende Erkenntnisse auf:

- 1) Die Sicherheit der Glasscheibe spielt eine ausschlaggebende Rolle auf die Gesamtsicherheit der Glasfassade.
- 2) Die vom Sachverständigenausschuß des DIBt getroffene Regelung, die mechanische Halterung für Windsog mit einem Sicherheitsfaktor von $\gamma_H = 1,1$ zu bemessen, hat einen positiven Einfluß auf die Gesamtsicherheit. Ein pauschale Erhöhung des Sicherheitsfaktors $\gamma_H > 1,1$ oder Änderung der Ausführung der mechanischen Halterung bringt allein in der Regel keine zusätzliche Sicherheit für die Beanspruchung der Glasfassade.
- 3) Eine hinreichend große Sicherheit der Klebung führt dazu, daß die Windsoghaltung keinen signifikanten Einfluß auf die Gesamtsicherheit besitzt. Sofern das mechanische Verhalten und die auftretende Beanspruchung der Silikonklebung hinreichend genau bekannt sind, können aus den errechneten Beziehungen auch die Grenzen des Einflusses ermittelt werden.

Vor einer Freigabe eines entsprechenden Vorgehens in der Praxis sind jedoch noch weitere Untersuchungen erforderlich, durch die insbesondere die Berechnung der lokalen Beanspruchungen unter Berücksichtigung des Langzeitverhaltens abgesichert werden müssen. Auch wenn die Glasscheibe, die Silikonverklebung und die mechanische Halterung nicht zum Versagen führen, sollten die auftretenden Verformungen bei einer Bemessung der Glasscheibe und der mechanischen Halterung berücksichtigt werden. Prinzipiell ist es denkbar, daß bei dem Ausfall der Silikonverklebung und Lastabtrag über die mechanische Halterung die Verformungen von Halterung und Glasscheibe dazu führen können, daß die Glasscheibe aus der mechanische Halterung herausrutscht. Dies kann insbesondere bei Klemmkonstruktion, wie z. B. der Einsatz von Fotoecken, auftreten. Die Festlegung einer Mindesteinstandstiefe bzw. eine Verformungsbegrenzung der Glasscheibe für diesen Betrachtungsfall sollten Ziel nachfolgender Arbeiten sein.