

Moderne Fassaden - Explosionsschutz

Dr.-Ing. Albrecht Burmeister

DELTA-X GmbH Ingenieurgesellschaft, 70182 Stuttgart

1. Einleitung

Fassaden schützen das Gebäudeinnere vor Beeinträchtigungen durch Klimaschwankungen inklusive Feuchtigkeit, Schall und vor zu starker Sonneneinstrahlung. Den Planern und Bauausführenden steht eine breite Palette unterschiedlicher Materialien und Systeme zur Verfügung, um selbst komplexen bauphysikalischen Anforderungen bei gleichzeitiger Befriedigung hoher gestalterischer Ansprüche zu entsprechen.

Leider sind sowohl Menschen als auch Bauwerke durch Sprengstoff-Explosionen infolge terroristischer Angriffe bedroht. Die dabei entstehenden Drücke können um ein Vielfaches über denen üblicher Windbelastungen liegen, so dass es im Nahbereich der Explosion in der Regel zu Zerstörungen von Fassadenverglasungen kommen wird. Sehr komplex sind die Zusammenhänge zwischen Ladungsgeometrie und Ausbreitung der Druckwelle im Nahbereich einer Explosion. Diese sowie Innenraumexplosionen sollen in dem vorliegenden Beitrag ausgeklammert werden.

Die gleichzeitige Zunahme des Anteils von gläsernen Fassaden sowie der Bedrohung und des Schutzbedürfnisses begründen die Notwendigkeit, Fragen, inwieweit Glasfassaden auch Aufgaben des Explosionsschutzes übernehmen können, intensiver nachzugehen. Moderne Fassaden reagieren komplexer in ihrem Strukturverhalten auf die in Abschnitt 2 skizzierte Druck-Zeit-Funktion als einfache Fenster. In der Regel ist von einer Interaktion von Verglasung und Tragstruktur auszugehen. Einfache Bemessungsdiagramme verlieren vor diesem Hintergrund ihre Gültigkeit.

Typische Beispiele zeigen die Bilder 1 und 2.



Bild 1: Zepplin-University, Friedrichshafen

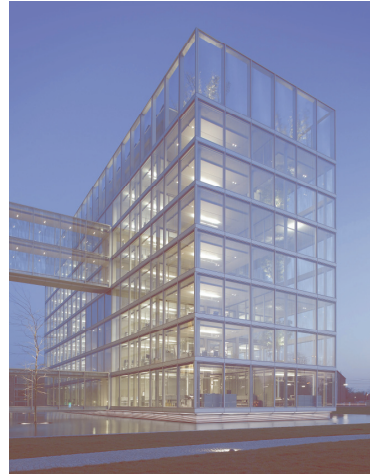


Bild 2: Hauptverwaltung Gelsenwasser AG

2. Charakterisierung der Explosionsbelastung

Die Abhängigkeiten der wesentlichen Blast-Parameter: Impuls, Spitzendruck und Dauer der Überdruckphase können der einschlägigen Literatur entnommen werden. Beispielhaft sind diese in Bild 3 für die Detonation einer 1kg-TNT-Kugel dargestellt [1]. Gleichermaßen bekannt ist das aus einer Freifeldexplosion resultierende Druck-Zeit-Profil als Folge einer halbkugel- bzw. kugelförmigen Druckausbreitung (Bild 3).

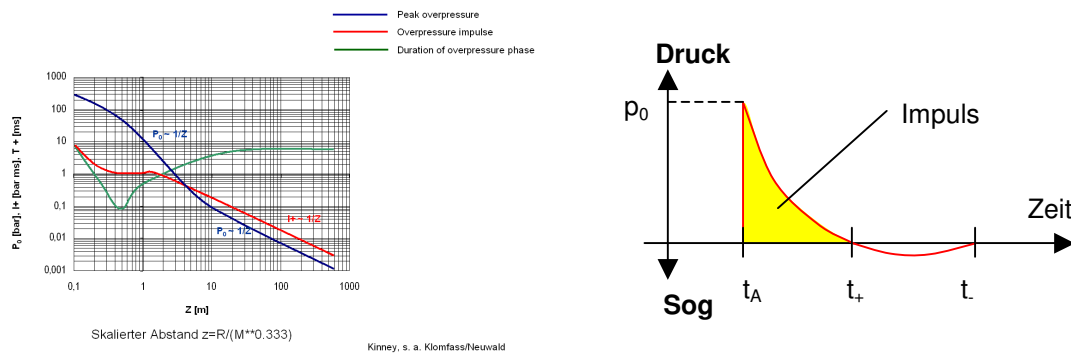


Bild 3: Cube-Root-Gesetz (1kg TNT-Kugel), Druck-Zeit-Verlauf einer Detonation im Freifeld

Die positive Druckdauer wird beschrieben durch die Zeit zwischen t_A und t_+ . Die anschließende negative Druckphase ist von wesentlich geringerer Amplitude. Diese Zusammenhänge werden durch die Friedlander-Gleichung gut wiedergegeben. Mit diesen Gesetzmäßigkeiten ist die Antwort der Fassade im Wesentlichen abhängig von der Art und der Menge des Sprengstoffes, dem Abstand zur Explosion, den dynamischen Eigenschaften des Fassaden-Tragwerkes und der Scheibengeometrie.

Die Antwort des Fassadentragwerkes auf diese Impulsbelastung kann dem im Bild 4 angegebenen Antwortspektrum – hier ist näherungsweise dasjenige für den Dreiecksimpuls wiedergegeben – entnommen werden. Leicht ablesbar ist, dass kleine t_d/T – Verhältnisse wesentlich günstigere dynamische Überhöhungen bedeuten als große t_d/T -Verhältnisse. Um diese günstigen Effekte für festgehaltene Impulsdauern t_d zu nutzen, sind tief frequente Lösungen zu empfehlen. Hierunter einzuordnen sind großflächige Fassadentragwerke. Weniger günstig sind Element-Fassaden zu beurteilen, insbesondere wenn sie sich gegen relativ steife Stahlbetondecken abstützen.

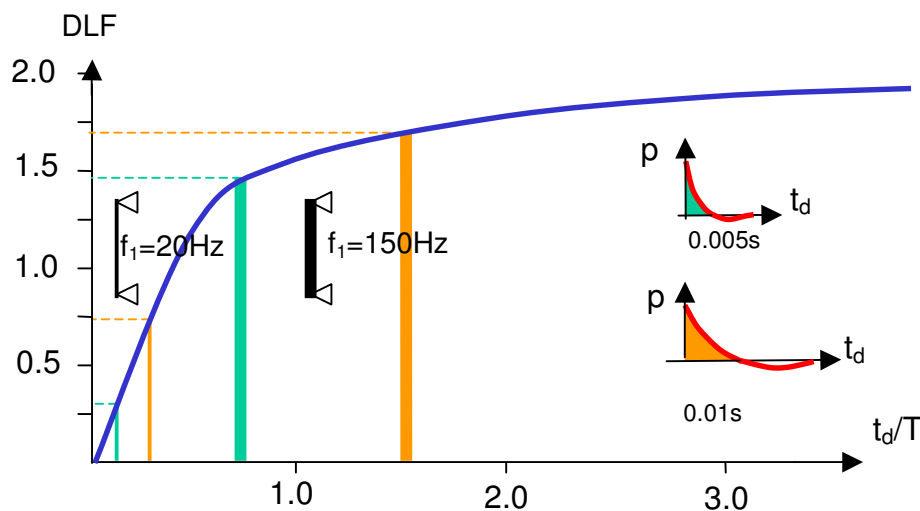


Bild 4: Tragwerkseinfluss

3. Geklebte Fassaden

Im Hinblick auf das Ziel, Menschen innerhalb des Gebäudes zu schützen, ist sicherzustellen, dass weder kleinere Glassplitter noch größere Trümmer infolge gebrochener Glasscheiben umherfliegen, noch dass von außen anprallende Teile die Verglasung durchdringen. Dieses Schutzziel kann zunächst in Verbindung mit Konstruktionen erreicht werden, welche den entstehenden Explosionseinwirkungen standhalten. Dies ist nicht für alle Szenarien grundsätzlich möglich. Inwiefern Fassadenverglasungen unter derartigen Einwirkungen zu Bruch gehen, hängt zum einen von der zeitabhängigen Glas-Festigkeit und zum anderen von der Höhe des reflektierten Druckes ab. Als weiterer wichtiger Parameter kommt die Größe des Impulses hinzu. Hier drückt sich der Einfluss der Frequenzabstimmung der Fassadenverglasung aus. Daraus ergeben sich für den Entwurf eine Reihe möglicher Maßnahmen zur Ertüchtigung explosionsbeanspruchter Konstruktionen:

- Vergrößerung des Abstandes zwischen Fassade und Explosion (allgemeine Sicherheitsmaßnahmen wie Zufahrtskontrollen und Zufahrtsbeschränkungen)
- Optimierung des dynamischen Verhaltens der Verglasung, wobei die Interaktion von Verglasung und Tragstruktur die gemeinsame Behandlung dieser Bereiche erfordert

Neben diesen Maßnahmen, welche das Glas intakt lassen, kommen solche in Betracht, welche bewusst einen Bruch der Gläser in Kauf nehmen. Vorteilhaft bei einem solchen Konzept sind zunächst die Energievernichtung, die durch das Brechen von Glas entsteht und die höhere Tragfähigkeit einer membranartig wirkenden Struktur, wie sie sich infolge der großen Deformation nach dem Brechen des Glases einstellt. Eine in dieser Art verformte Glasscheibe zeigt Bild 5.



Bild 5: Glasbruch durch Explosionsbelastung

Zusätzlich sei auf den wirtschaftlichen Vorteil hingewiesen, der sich insofern ergibt, als größere Druck-Belastungen mit dünneren Gläsern ertragen werden können. An Nachteilen sind die wesentlich höheren Anforderungen an die Haftung zwischen Folie und Glas anzusprechen, nachdem ein Splitterabgang ins Innere vermieden werden soll. Hinzu kommen Fragen nach der zuverlässigen Rückhaltung der gebrochenen Scheibe im Rahmen. Sofern davon ausgegangen werden kann, dass es gelingt, diese Anforderungen konstruktiv zu erfüllen, kommen weitere Möglichkeiten zur Erhöhung explosionsbeanspruchter Fassaden in Betracht:

- Optimierung der Glasart, des Aufbaus und der Verankerung
- Einrichtung von Rückhaltmaßnahmen

Die beschriebenen Schutzziele erfordern Maßnahmen, die sicherstellen, dass die Verglasung nicht aus dem Rahmen gerissen werden kann. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Rückhaltmaßnahmen sorgfältig zu planen. Dies gilt insbesondere

re, wenn der sich einstellende Membranzustand gezielt zur Lastabtragung herangezogen werden soll.

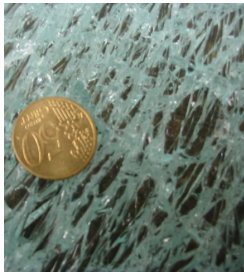
Grundsätzlich kommen Klebungen oder Klemmungen, wobei letztere in der Regel hohe Vorspannkräfte benötigen, um über Reibung Haltekräfte zu erzeugen, in Betracht. Aufgrund der sich einstellenden Krümmungsverläufe entstehen am Rande der Klemmungen oftmals feinkrümelige Bruchstrukturen mit dem Risiko des Abscherens des Glases zusammen mit der Folie. Zudem lässt sich die für die Klemmung notwendige Vorspannung der Schrauben im Rahmen üblicher Fassadensysteme auf Dauer nur schwer realisieren.

Klebungen haben sich im Bereich moderner Fassaden auch unter schwierigen Einsatzbedingungen wie Erdbeben und Hurrikan-Belastungen bewährt. Im Rahmen der Forschungsarbeit des Fachverbandes Konstruktiver Glasbau (FKG) wird intensiv an Optimierungen und an der Materialbeschreibung mit dem Ziel geforscht, numerische Simulationen verstärkt einzusetzen. Erkenntnisse aus der Praxis und aus den beschriebenen Arbeiten im FKG fließen nun in die Arbeit des Arbeitskreises Explosionsschutz ein, dem der Autor dieses Beitrages vorsteht, um das Potential geklebter Rückhaltesysteme zu nützen.

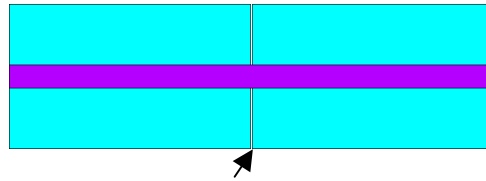
4. Numerische Simulation

Die angesprochenen Nachteile von Versuchen können vorteilhaft mit Hilfe von geeigneten Berechnungen überwunden werden. Zur Simulation des Strukturverhaltens von Glasfassaden, die durch Explosionen belastet werden, die nicht im unmittelbaren Nahfeld stattfinden, können finite Element-Codes wie auch Hydro-Codes herangezogen werden. Die Simulation von Innenraum-Detonationen und zur Beschreibung des unmittelbaren Nahbereichs der Explosion bleibt Hydro-Codes vorbehalten. Grundsätzlich ist infolge der notwendigen detaillierten Modelle und der transienten Analysen mit entsprechend feiner Zeitinkrementierung von einem erhöhten Berechnungsaufwand auszugehen. Für die numerischen Lösungen ist grundsätzlich eine hohe Prognosesicherheit zu fordern und insbesondere auch nachzuweisen. Bild 6 zeigt die Nachrechnung eines Stoßrohrversuches [4], bei welchem das Glas zu Bruch ging.

**Bruchbild VSG 2'6mm SPG
der gebrochenen Verglasung**



**Integrales Werkstoffmodell
0,76mm PVB-Folie**



möglicher Riss

- Massen- und Steifigkeitstreue
- Beanspruchung des Glases
- Beanspruchung der Folie
- Beanspruchung der Verklebung

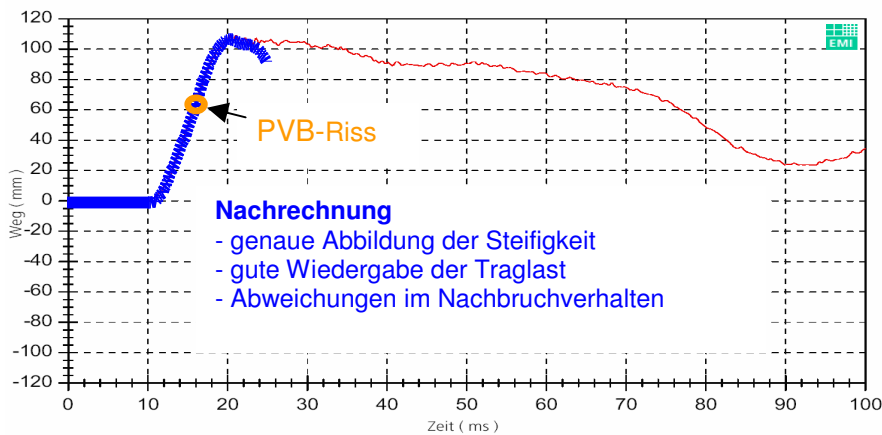


Bild 6: Nachrechnung einer brechenden VSG-Scheibe (Stoßrohrversuch [4])

5. Fazit

Anhand ausgewählter Beispiele wurden Wege zur Problemlösung, zur Prognosesicherheit und -qualität aufgezeigt. Nach der Erfahrung der Autoren können auch nicht alltägliche Fluid-Struktur-Interaktionsprobleme, die zu kurzzeitigen Belastungen von Bauwerken führen, praxisgerecht gelöst werden. Um Prognosesicherheit zu gewährleisten, werden rechnerische Modelle in Verbindung mit transienten Analysen empfohlen, die durch geeignete Maßnahmen für die jeweilige Aufgabenstellung zu validieren sind.

6. Literatur

- [1] G.F. Kinney, K.J. Graham: Explosive Shocks in Air. Springer, 1985
- [2] DIN EN 13123-1, 2001-10
Fenster, Türen und Abschlüsse - Sprengwirkungshemmung, Anforderungen und Klassifizierung – Teil 1: Stoßrohr
- [3] Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut
Glas-Bruch-Verhalten im Stoßrohrversuch, 2003
- [4] Burmeister, A., Rahm, H.: Simulation explosionshemmender Fassadenkonstruktionen, Seminar „Glas im Konstruktiven Ingenieurbau 4“ der FH München, 17.9.2004
- [5] Timmel, M.: Numerische Simulation von Verbundsicherheitsglas unter Crashbeanspruchung. Diplomarbeit. Lehrstuhl für Statik und Dynamik, BTU Cottbus, 2003
- [6] Burmeister, A., Reitinger, R.: Innovative Lösungen für moderne Isolierverglasungen. Glasklar. München: Deutsche Verlagsanstalt 2003