

Explosionsschutz moderner Glasfassaden

Dr.-Ing. **Albrecht Burmeister**, DELTA-X GmbH Ingenieurgesellschaft,
70182 Stuttgart

Dr.-Ing. **Heiko Rahm**, DELTA-X GmbH Ingenieurgesellschaft, 70182
Stuttgart

Kurzfassung

Explosionsschutz durch gläserne Fassaden klingt unrealistisch. Im Rahmen des Beitrages soll auf aktuelle Entwicklungen zu diesem Thema eingegangen werden, die zum Ziel haben, auch in Verbindung mit Glasfassaden Menschen vor den Auswirkungen von Explosionen z. B. infolge terroristischer Angriffe zu schützen. Hierzu werden Tragwerks-Konzepte der Fassaden und der Verglasung vorgestellt und auf Möglichkeiten eingegangen, diese Anforderungen zu erfüllen. So sollen die Einwirkungen aus Explosionen erläutert und die daraus resultierenden Druck-Auswirkungen auf die Fassade vorgestellt werden. Darüber hinaus ist vorgesehen, Konzepte zu präsentieren, welche es erlauben, in Verbindung mit gebrochenen Glasscheiben das Schutzziel zu erreichen. Angesprochen sind die rechnerische Behandlung gebrochener Glasscheiben und die notwendigen Materialgesetze sowie die konstruktiven Voraussetzungen zur Fixierung der Gläser. Zudem soll über Projekterfahrungen in diesem Bereich berichtet werden.

1. Einleitung

Die Aufgabe einer Fassade besteht üblicherweise darin, den Raum abzuschließen und das Gebäudeinnere vor Beeinträchtigungen durch Klimaschwankungen inklusive Feuchtigkeit, Schall und vor zu starker Sonneneinstrahlung zu schützen. Hierzu steht den Planern und Bauausführenden eine breite Palette unterschiedlicher Materialien und Systeme zur Verfügung, um selbst komplexe bauphysikalische Anforderungen bei gleichzeitiger Befriedigung hoher gestalterischer Ansprüche zu erfüllen.

Wie die jüngere Geschichte gezeigt hat, sind leider sowohl Menschen als auch Bauwerke durch Detonationen bedroht. Eine besondere Rolle spielen Sprengstoff-Explosionen infolge terroristischer Angriffe. 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, Ausbreitung der Druckwelle im Nahbereich

einer Explosion. Diese sowie Innenraumexplosionen sollen in dem vorliegenden Beitrag ausgeklammert werden.

2. Stand der Technik

Die Abhängigkeiten der wesentlichen Blast-Parameter: Impuls, Spitzendruck und Dauer der Überdruckphase können der einschlägigen Literatur entnommen werden. Beispielhaft sind diese in Bild 1 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 1).

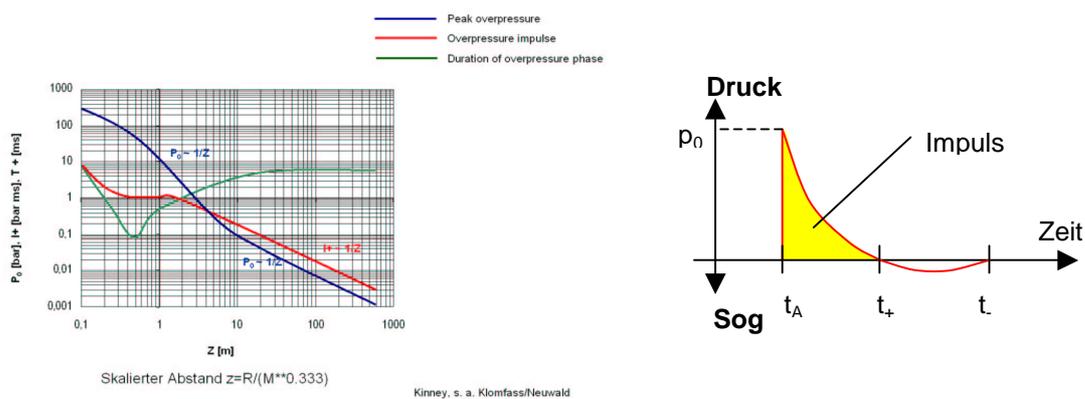


Bild 1: Cube-Root-Gesetz (1kg TNT-Kugel),
Druck-Zeit-Verlauf einer Detonation im Freifeld

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.

Für einfache Fälle von Schutzverglasungen legt die DIN EN 13123-1:2001 [2] Klassen mit unterschiedlicher Beanspruchbarkeit fest. Die Höhe des positiven Maximaldruckes der reflektierten Druckwelle ist auf 200 kPa begrenzt. Zudem sei auf die einschlägige Literatur verwiesen, welche die Tragfähigkeiten typischer Fenster unter Explosionsbelastungen angibt.

Als Standard-Prüfmethode für durch Explosion belastete Gläser ist der Versuch anzusprechen. Einen typischen Aufbau zeigt Bild 2.



Bild 2: Freifeldversuch

©W. Bollrath

Der Freifeldversuch bietet die Möglichkeit, im Prinzip beliebig große Prüflinge zu testen. Allerdings sind, um Aussagesicherheit zu gewährleisten, aufwendige Instrumentierungen notwendig, um beispielsweise den sich einstellenden Druck-Zeit-Verlauf zu ermitteln. In dieser Hinsicht günstiger, aber in Bezug auf die Prüfkörpergröße und die Höhe der Druckbelastung beschränkt, sind Stoßrohrversuche. Allerdings gestatten sie nur in Grenzen eine Einstellbarkeit des Druck-Zeit-Verlaufes. Im Stoßrohrversuch wird am Ende eines langen Zylinders der Prüfling eingebaut und am gegenüberliegenden Rohr-Ende eine Explosion gezündet. Auf diese Weise entsteht eine ebene Druckwelle, welche die dynamische Belastung des Prüfkörpers darstellt. Typische Stoßrohr-Aufbauten können den Veröffentlichungen z. B. des Ernst-Mach-Institutes in Efringen-Kirchen [3] entnommen werden.

Nachteilig bei den experimentellen Verfahren sind die Kosten für Prüflinge, die Prüfeinrichtung und die Versuchsdurchführung, die bereits ohne Anspruch auf statistische Aussagefähigkeit relativ hoch sind. Hinzu kommt die Gefahr von Fehlversuchen. Dies führt insgesamt auf das Problem fehlender Kosten- und Planungssicherheit bis zur Durchführung bzw. Auswertung der Versuche. Damit verbieten sich konsequente Optimierungen von selbst. Vielmehr zwingen Termin-Vorgaben zu nicht optimalen Lösungen, die unter den genannten Randbedingungen so gewählt werden, dass die Versuche mit hoher Wahrscheinlichkeit bestanden werden.

3. Strukturverhalten moderner Fassaden

Moderne Fassaden sind in aller Regel geprägt durch großflächige Verglasungen mit filigranen und optimierten Tragstrukturen. Derartige Tragwerke reagieren komplexer in ihrem Strukturverhalten auf die in Bild 1 skizzierte Druck-Zeit-Funktion als einfache Fenster. In der Regel ist von einer Interaktion von Verglasung und Tragstruktur auszugehen. Die vorstehend

erwähnten einfachen Bemessungsdiagramme verlieren vor diesem Hintergrund ihre Gültigkeit.

Im Hinblick auf das Schutzziel, 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 – wie eingangs erwähnt – nicht grundsätzlich möglich. Inwiefern Fassadenverglasungen unter derartigen Einwirkungen zu Bruch gehen, hängt zum einen von der zeitabhängigen Glasfestigkeit 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 3.



Bild 3: 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 Ertüchtigung explosionsbeanspruchter Fassaden in Betracht:

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

4. Numerische Simulation

Die angesprochenen Nachteile von Versuchen können vorteilhaft mit Hilfe von geeigneten Berechnungen überwunden werden. In Betracht kommen FE- oder Hydro-Codes, wobei infolge der notwendigen detaillierten Modelle und der transienten Analysen mit entsprechend feiner Zeitinkrementierung von einem erhöhten Berechnungsaufwand auszugehen ist. Für die numerischen Lösungen ist grundsätzlich eine hohe Prognosesicherheit zu fordern und insbesondere auch nachzuweisen. Bild 4 zeigt die Nachrechnung eines Stoßrohrversuches [4], bei welchem das Glas zu Bruch ging.

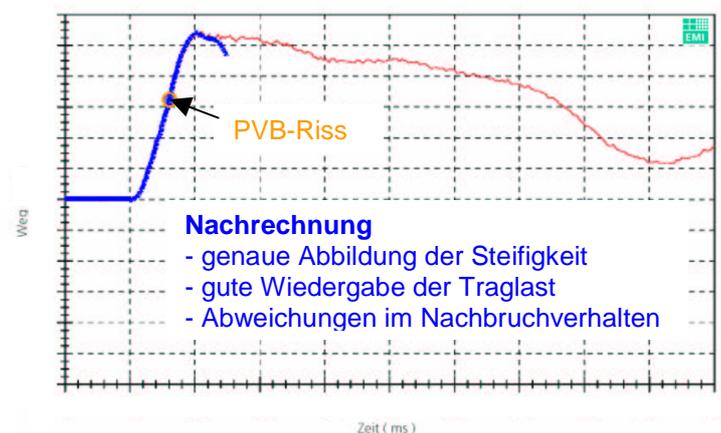


Bild 4: Nachrechnung einer brechenden VSG-Scheibe (Stoßrohrversuch [4])

Diese Untersuchung wurde mit Hilfe einer Finite-Element-Modellierung durchgeführt. Verwendet wurde eine vollständige Abbildung des Verbundsicherheitsglases mit der dreidimensionalen Darstellung der Gläser zusammen mit der Folie in Verbindung mit einem Glas-Werkstoffgesetz, welches die Ausbildung von Rissen gestattet. Alternative Modelle

finden sich in [5]. Derartige Ansätze gestatten reproduzierbare Untersuchungen im praktisch relevanten Druck-Bereich unter Einschluss von Glasbruch. Weitergehende Untersuchungen mit sich ablösenden Glas-Splintern sind in Verbindung mit expliziten Codes dem Grunde nach ebenfalls möglich. Damit wird die Berücksichtigung der Interaktion von Glas und Tragstruktur möglich. Zudem gelingt es auch, die Glasdicke zusammen mit der Art der Folien festzulegen. Über entsprechende Detaillierungen der Lagerung kann die Bemessung der sensitiven Verankerungsbereiche erfolgen. Letztere sind in Anbetracht der Schutzziele und der sich zwingend einstellenden Membraneffekte wesentlich. Als vorteilhaft bei der numerischen Problemlösung ist die Möglichkeit hervorzuheben, die Fluid-Struktur-Interaktion zu erfassen. Damit können ortsabhängige reale Drücke ebenso berücksichtigt werden wie Bereiche besonderer Gefährdung. Auf dieser Grundlage können hinsichtlich Kosten und Personenschutz optimale Lösungen entwickelt und bewertet werden.

5. Anwendungsbeispiel

Im Rahmen des baupraktischen Anwendungsbeispiels [4] soll zunächst auf das Fluid-Struktur-Interaktionsproblem eingegangen werden.

Trifft eine Druckwelle auf ein Hindernis, so wird diese reflektiert. Durch die Überlagerung der hin- und rücklaufenden Welle kommt es zu einer Verstärkung des maximalen Druckwertes. Das Verhältnis zwischen reflektiertem Druck und Primärdruck („Side-On“) wird als Reflexionsfaktor bezeichnet (vgl. Bild 5). Die Reaktion der Scheibe wird von ihren dynamischen Eigenschaften bestimmt.

Zur numerischen Beschreibung des Fluid-Struktur-Interaktionsproblems wird einerseits die Einfachverglasung mit Hilfe von Schalenelementen beschrieben. Andererseits wird eine Luftsäule mit Hilfe von Fluidelementen abgebildet. Letztere beinhalten lediglich Druck-Freiheitsgrade bzw. Druck- und Verschiebungs-Freiheit an den Struktur-Oberflächen (Bild 5). Über eine massenlose, starre Platte wird der Primärdruck („Side On“) eingeleitet. Zwischen Luft und Scheibe werden die Verformungen von Luft und Struktur gekoppelt, so dass eine Übertragung des Impulses auf die Scheiben erfolgen kann.

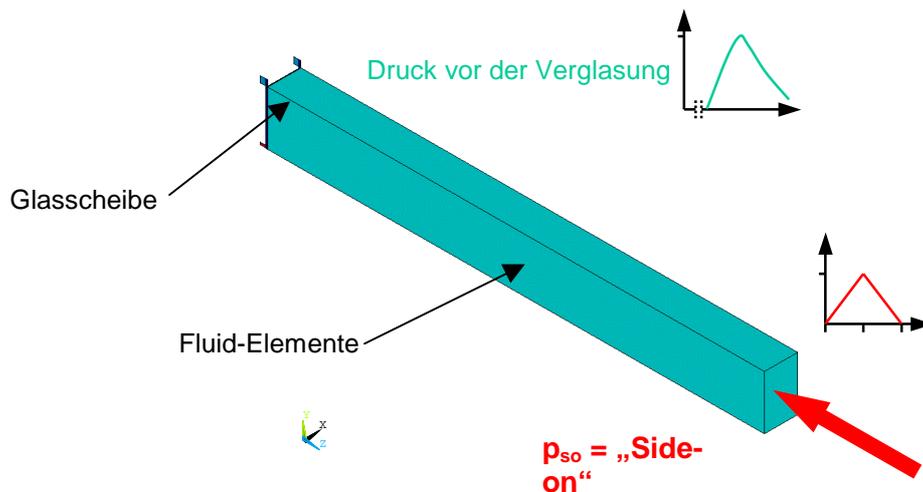


Bild 5: FE-Modell einer Prallscheibe mit Luftsäule

Das dynamische Verhalten der Einfachverglasung ist in Bild 6 in Abhängigkeit von der Gesamtglasdicke dargestellt. Aufgrund der Kurzzeitigkeit der Druck-Einwirkung wurde hierbei von vollem Schubverbund ausgegangen.

Bezogener Druck

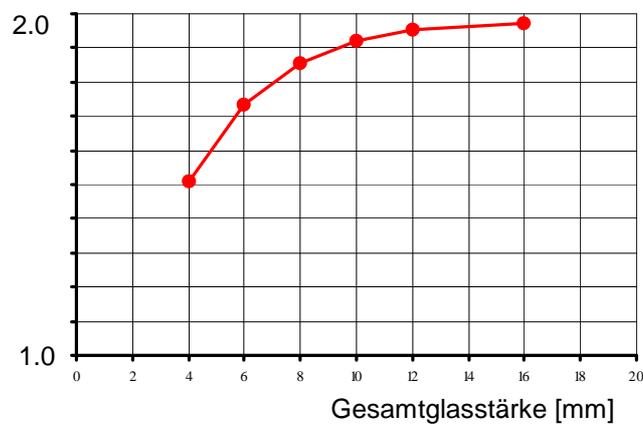


Bild 6: Bezogener Druck vor der Verglasung in Abhängigkeit der Gesamt-Glasstärke

Transiente Berechnung

Die untersuchte Verbundsicherheitsglas-Scheibe (VSG aus 2x4mm SPG, $b \times h \cong 1.4 \times 2.2$ m) wird mit Hilfe von Schalenelementen abgebildet. Die Dichtungsprofile zwischen Glas und Al-Rahmen stellen Volumenelemente dar. Zwischen Glas und Dichtungsprofil werden Kontaktelemente eingesetzt, die lediglich Kräfte senkrecht zur Glasebene übertragen, d.h. ein Gleiten der Scheibe auf dem EPDM-Profil ist reibungsfrei möglich.

Die Modellierung der Al-Rahmenprofile erfolgt mit Schalenelementen. Die Deckleisten (Clipverbindung) werden ohne Schubverbund aber fest in Normalenrichtung der Scheiben an die Rahmen angekoppelt. Zwischen Al-Rahmen und Glas werden stirnseitig Kontaktelemente eingesetzt, die die Darstellung eines Anschlages des Glases gegen den Rahmen ermöglichen.

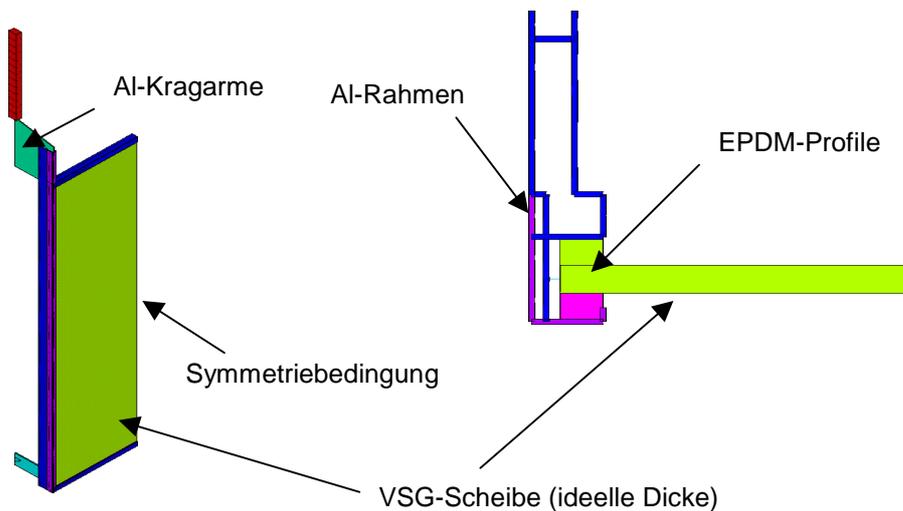


Bild 7: FE-Modell

In Bild 7 ist das FE-Modell dargestellt. Die Lagerung erfolgt an den Enden der Kragarme, an denen die Fassadenelemente mit der Unterkonstruktion verbunden sind. Die transiente Berechnung erfolgt geometrisch (Kontaktansätze, Gleichgewicht am verformten System) und materiell nichtlinear (elasto-plastisches Werkstoffgesetz für das Aluminium). Aus Symmetriegründen wird nur eine Hälfte der Fassadenelemente modelliert und das FE-Modell mit Symmetrie-Randbedingungen versehen.

Nachweis der Spannungen im Glas

Zum Nachweis des Spiegelglases (Float) unter kurzzeitiger Belastung werden höhere zulässige Spannungen ($zul\sigma$) als im statischen Fall angesetzt.

An den Spannungsplots in Bild 8 ist zu erkennen, dass die Verteilung der Spannungen in Abhängigkeit von Glas-Aufbau und Druck-Amplitude nicht affin zueinander sind. Vielmehr kommt es durch die plastischen Deformationen in den horizontalen Al-Profilen zu einer Veränderung des Tragverhaltens der Scheiben. Die Stelle der maximalen Spannung wandert zum oberen Scheibenrand; das obere Horizontalprofil entzieht sich durch die plastischen Verformungen der Beanspruchung.

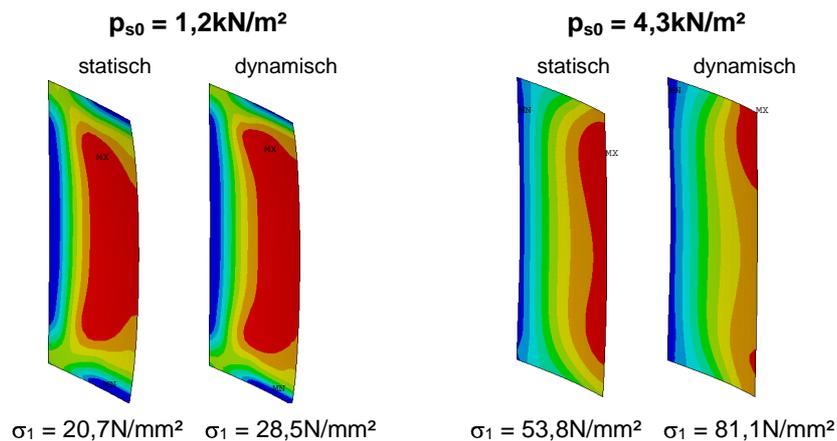


Bild 8: VSG – Hauptspannungen σ_1 im Glas

6. 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.

7. 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 Kurzzeiddynamik, 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