

Berechnung sprengwirkungshemmender Fenster- und Fassadenkonstruktionen

Matthias Wagner, Dr. Rüdiger Müller

Ingenieurbüro Dr. R. Müller, München, Deutschland

www.ibdrm.de

Abstract:

Numerical simulations of blast resistant windows and facades will be presented and compared with test results.

The focus of the presentation is the prediction of different processes of fracture and damage. The numerical model includes a new developed nonlinear material model for laminated glass, special contact definitions and a detailed mesh. Additionally some aspects of blast wave propagation and determination of structural blast loads will be mentioned.

Keywords:

LOAD_BLAST, MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS, INTEGRATION_SHELL
laminated glass, window, façade, thermally insulated profile, explosion, blast wave

1 Gefahrenpotential bei Sprengstoffdetonationen

Angesichts der immer größer werdenden Gefährdung durch Sprengstoffanschläge und der Tatsache, daß mehr als 80 bis 90 % der Verletzungen bei Explosionen in dicht bebauten Gebieten durch Splitterwirkung von Glas oder durch umher fliegende Bruchstücke von Fenstern und Fassaden hervorgerufen werden, bekommen explosionshemmende Fenster- und Fassadenkonstruktionen eine zunehmende Bedeutung. Aufgrund der meist großen Anzahl von Verletzten ist dabei häufig keine schnelle individuelle Erstversorgung möglich, so das auch vergleichsweise leichte Verletzungen schwere Folgen haben können.



Bild 1 Bersten eines einfachen Fensters nach einer Explosion (Quelle - Kinon Porz / Saint-Gobain)

Bild 1 verdeutlicht die Wirkung einer Explosion auf ein normales Fenster. Die Gefährdung von Personen durch fliegende Glassplitter und Fensterteile ist offensichtlich. Deshalb wurden in den letzten Jahren viele teure Explosionsversuche zur Entwicklung von druckwellenhemmenden Fassaden durchgeführt. Ziel der vorgestellten numerischen Simulationen ist die Reduktion bzw. der weitgehende Ersatz der erforderlichen praktischen Versuche.

2 Ermittlung der Einwirkungen

2.1 Theoretische Kenngrößen einer Detonation

Der Druckverlauf ist gekennzeichnet durch den plötzlichen Anstieg des Druckes beim Auftreffen der Druckwelle und einem nachfolgenden exponentiellen Abfall mit Übergang in die negative Druckphase. Für einfache Fälle, läßt sich der Druck-Zeitverlauf mit Hilfe von Formeln, Diagrammen oder einfachen Programmen abschätzen ([2], [17]). Der Verlauf sowie die wesentlichen Parameter einer theoretischen Druckwelle sind Bild 2 zu entnehmen.

Bei den üblichen Berechnungen wird in der Regel nur die positive Druckphase mit einem Dreiecksimpuls als Ersatz für den genauen Verlauf betrachtet, da nur ein Versagen des Fensters nach innen in das Gebäude hinein von Interesse ist.

Bei Fensterkonstruktionen, die nicht nur dem Druck standhalten sollen und auch nicht nach außen aus dem Rahmen oder der Verankerung gerissen werden sollen (z. B. bei Verglasungen von Innenhöfen oder Überkopferglasungen), ist jedoch auch die negative Druckphase von großer Bedeutung, da sie länger andauert und auf eine bereits vorgeschädigte Konstruktion einwirkt. Die negative Druckphase kann sich bei bestimmten Konstruktionen auch günstig in einer Begrenzung der Vorwärtsbewegung auswirken, so daß sie bei der Nachrechnung von realen Sprengversuchen nicht vernachlässigt werden sollte.

Bei Messungen an Versuchsobjekten zeigen sich auch bei nahezu idealen Bedingungen teilweise deutliche Abweichungen von den theoretischen Kurven. Sie sind auf Wirbelablösungen und Sogwirkungen an den Kanten räumlich begrenzter Objekte, den Untergrund sowie den nicht gleichmäßig ablaufenden Detonationsvorgang zurückzuführen. Deutlichere Abweichungen von den theoretischen Werten insbesondere hinsichtlich des Impulses ergeben sich bei komplexeren baulichen Situationen. Hier sind genauere Betrachtungen bezüglich möglicher Einwirkungen erforderlich.

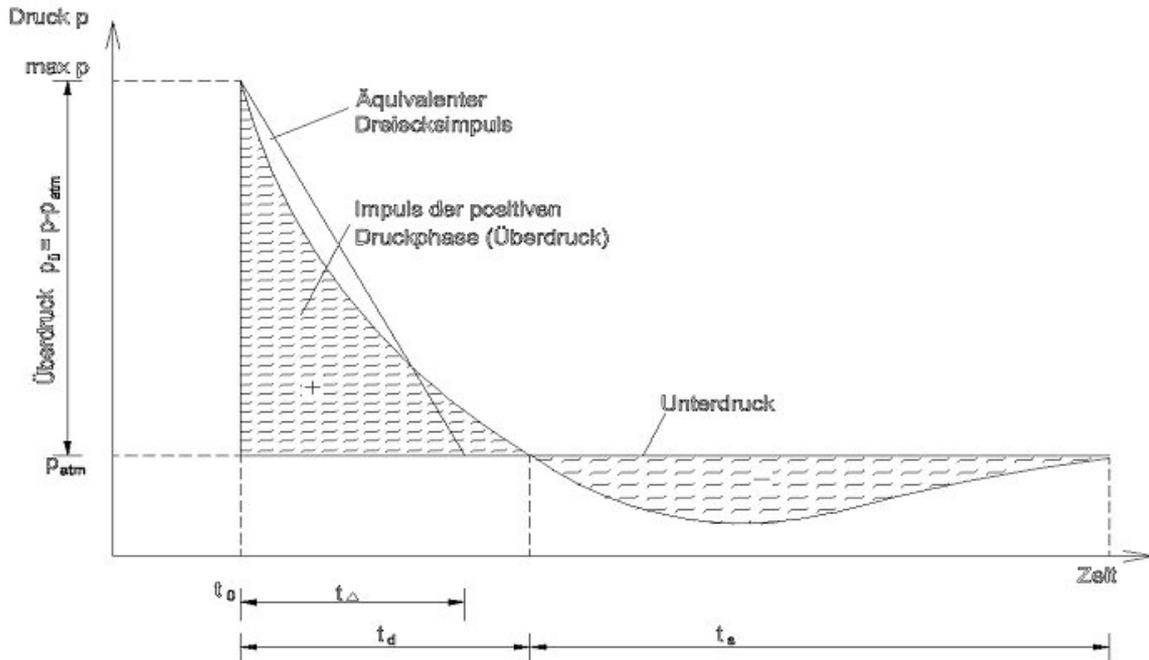


Bild 2 Theoretischer Druck-Zeit-Verlauf einer Explosionswelle

2.2 Druckwellenausbreitung und Einflußfaktoren

Bild 3 zeigt ein Beispiel für die Druckwellenausbreitung nach einer Explosion und die Interaktion mit den vorhandenen Bauwerken. Die Wellenausbreitung und ihre Reflektion zunächst am Boden, dann an dem vorgelagerten Gebäude und schließlich an der Fassade des Hauptgebäudes ist visualisiert. Art und Ausmaß der am Boden, an Hindernissen und an der Fassade entstehenden Reflektionen haben entscheidenden Einfluß auf die resultierende Bauwerksbelastung.

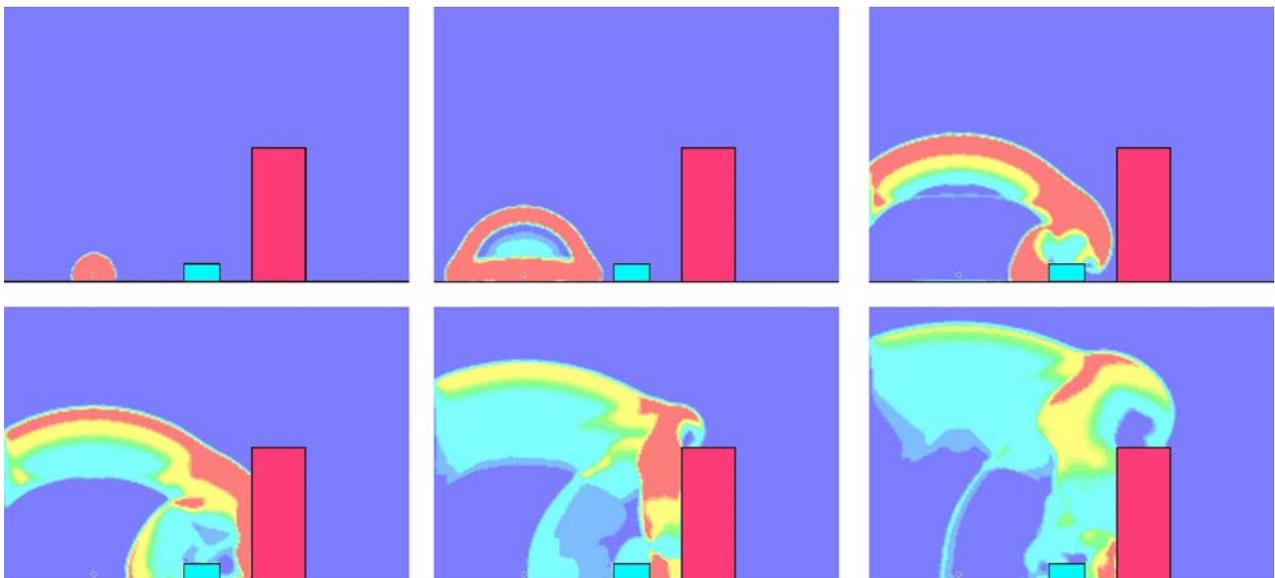


Bild 3 Simulation einer Druckwellenausbreitung

Bei einer realen Explosion entscheiden vor allem Größe der Ladung und Entfernung des Detonationsortes, Art und Ausbildung eventueller Hindernisse sowie die Geometrie der Gebäudefassade über die Größe und Form des Druckimpulses.

Für besonders gefährdete oder schützenswerte Einrichtungen ist es daher sinnvoll, Berechnungen zur Ermittlung von Einwirkungen unter Beachtung der örtlichen Gegebenheiten durchzuführen.

Wechselwirkungen mit benachbarten Gebäuden (Mehrfachreflektionen), Einflüssen von Gebäuderücksprüngen etc. können damit abgeschätzt werden.

Es sei erwähnt, dass der Stand der internationalen Normung auf diesem Gebiet unbefriedigend ist und nur für einfache Fälle eine bedingte Quantifizierung der Einwirkungsgrößen erlaubt.

3 Anforderungskategorien für Fassaden und Fenster

Wesentlich für die rechnerische Behandlung ist es, die Fensterkonstruktionen bestimmten Gefährdungsklassen zuzuordnen, je nachdem, welche Gefährdung zugelassen wird bzw. welches Schadensbild nach der Explosion noch als akzeptabel angesehen wird.

In der Norm ISO/DIS 16933 sind Schadensklassen bzw. Gefährdungsstufen A (kein Bruch) bis F (hoher Schaden mit weit fliegenden Glasteilen) angegeben.

Aus der für viele Konstruktionen vor allem im Ausland verbindlichen amerikanischen Vorschrift „Standard Test Method for Glazing and Window Systems“ (US General Services Administration / GSA) lassen sich nahezu analoge sog. „performance conditions“ 1 bis 5 entnehmen.

4 Schadenskriterien und Versagensmechanismen

Für die spätere rechnerische Beurteilung ist es erforderlich, daß die Konstruktion einer Gefährdungsstufe zugeordnet ist und ein entsprechendes Teilversagen akzeptiert bzw. bewußt einkalkuliert wird.

Von dieser Einstufung ist der rechnerische Aufwand abhängig. Falls kein Bruch und kein sichtbarer Schaden zugelassen sind, können linear elastische Berechnungen mittels statischer Ersatzlasten ausreichen. Diese Ersatzlasten können beispielsweise mittels Diagrammen nach [2] und [13] auf Basis der dominierenden Eigenfrequenz bestimmt werden. Die Einstufung in Kat. A erfolgt eher selten, da z.B. ein Schaden durch Trümmer anderer Bauteile nicht ausgeschlossen werden kann und üblicherweise sehr massive und teure Konstruktionen erforderlich sind. Die Regelanforderung aufgrund des wirtschaftlich günstigen Kosten-Risiko-Verhältnisses liegt im Bereich der Kategorien B bis C mit sehr geringer bis geringer Gefährdung. Hier sind Brüche und extreme plastische Verformungen erlaubt. Die Bildung von Splintern ist jedoch ausgeschlossen bzw. extrem begrenzt. Dabei ist eine möglichst realistische Erfassung des nichtlinearen Verhaltens der Materialien und der Bauelemente von entscheidender Bedeutung. Es müssen alle Details der Konstruktion, die zu einem Versagen führen können, rechnerisch realistisch erfaßt werden. Ihre Materialparameter sind im Idealfall durch möglichst separate Versuche an einzelnen Baugruppen unter dynamischer Belastung zu kalibrieren.

Alle wesentlichen Elemente einschließlich verschiedener möglicher Versagensmechanismen müssen erfaßt werden:

- Bruch der Verglasungen
- Riß von PVB-Folien
- Ablösung von Splintern an der Scheibenrückseite
- Versagen der Randaufleger durch Ablösung von den Glasleisten bzw. Versagen von Verklebungen (structural sealant glazing)
- Bruch der Beschläge und der Verriegelungen
- Verbundversagen der Verbundprofile und Ausriß oder Bruch der Kunststoffstege
- Bruch oder Ausriß von Profilverbindungen
- Bruch oder örtliches Versagen der Aluminiumprofile
- Versagen der Befestigungen an der Unterkonstruktion

Für das Verhalten einer komplexen Fensterkonstruktion ist es entscheidend, daß kein Teilversagen zu einem Versagen der gesamten Konstruktion führt. Die Konstruktionen müssen im Detail so ausgelegt sein, daß alle Teile eine möglichst große Verformungskapazität besitzen und alle Verbindungspunkte über ausreichende Tragreserven verfügen.

5 Dynamische FE-Berechnungen

5.1 Modellierung

5.1.1 Fassadenprofile

Die Fassadenprofile werden durch Falterwerkelemente abgebildet. Der Elementansatz für die Kunststoffstege der Verbundprofile für das Verhalten im plastischen Bereich sowie das Verbundversagen wurde durch Nachrechnung von Kraft-Verformungs-Versuchen der Firma Bollrath [16] (Bild 4) kalibriert.

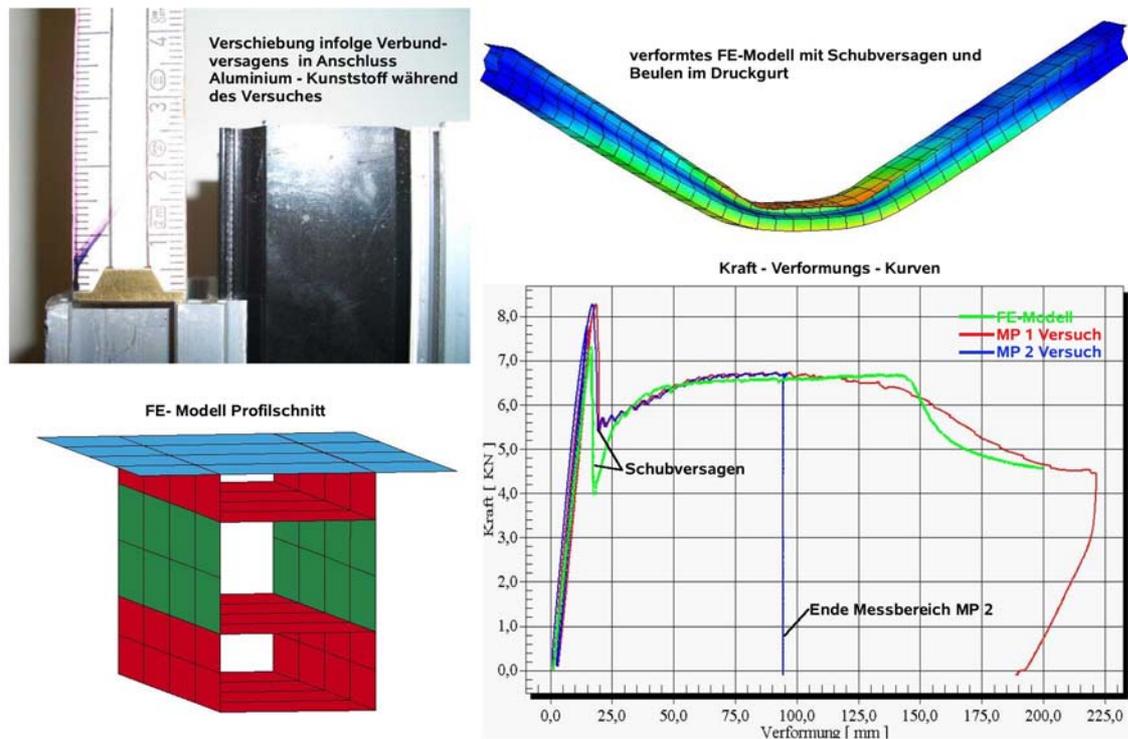


Bild 4 Kraft-Verformungskurve eines Fassaden-Verbundprofils, Vergleich Versuch mit Rechnung

Das Verbundversagen, das örtliche Beulverhalten des Druckgurtes und der Kunststoffstege sowie das elastisch-plastische Verhalten des Aluminiums einschließlich Materialbruch bei Überschreitung der Dehnungsgrenzen kann, wie der obige Vergleich der Kurven zeigt, annähernd realistisch abgebildet werden.

5.1.2 Verbundglas

Wesentlich bei Verbundglas ist die Erfassung des unterschiedlichen Tragverhaltens vor und nach dem Bruch der beiden Glasscheiben. Vor dem Bruch ist aufgrund des angenommenen vollen Verbundes bei extrem kurzzeitigen Belastungen eine linear elastische Spannungsverteilung über die Scheibendicke auch bei relativ hohen Temperaturen annähernd gegeben.

Nach dem Bruch, der beim Überschreiten einer Zugspannungsgrenze im Glas als plötzlich über das gesamte Element wirkend angenommen wurde, wirken im Bereich der Risse nur noch die PVB-Folie auf Zug und die Kanten der auf Druck beanspruchten Gläser.

Zur Abbildung der Isolierglasscheiben aus Verbundglas werden wahlweise je nach Netzfeinheit einfach oder voll integrierte 4-knotige Schalenelemente (Element Typ 2 bzw. 16 [1]) verwendet. Dabei werden sowohl Biege- als auch Membranbeanspruchungen berücksichtigt.

Der zunächst verwendete Ansatz mittels koinzidenter Elemente nach [14] führte zu unrealistisch hohen Scherbeanspruchungen in den Scheibenauflagern. Neben dem im Modell berücksichtigten Einfluß der Biegesteifigkeit $E \cdot I$ hat bei anwachsenden Verformungen auch die korrekte Abbildung der Membransteifigkeit $E \cdot A$ eine zunehmende Bedeutung. Diese wurde nicht ausreichend erfaßt.

Zur realistischeren Berücksichtigung dieser Effekte wurde ein eigenes Materialgesetz für Shell-Elemente entwickelt (*MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS [1]). Dabei werden zunächst

einzelne Integrationspunkte über die Dicke des Elements definiert und entsprechend ihrem Anteil an der Gesamtdicke gewichtet (*INTEGRATION_SHELL [1]). Die einzelnen Integrationspunkte werden mit unterschiedlichen Materialparametern (Glas / Folie) verknüpft. Bei dem entwickelten Modell erfolgt bis zum Bruch der Verglasung nach jedem Zeitschritt ein linear elastisches Spannungsupdate für den nächsten Zeitschritt. Zusätzlich werden die Hauptspannungen permanent in jedem Integrationspunkt ermittelt. Übersteigt eine der beiden Hauptzugspannungen die vorgegebene Bruchspannung, so erfolgt der Bruch senkrecht zur betreffenden Spannungsrichtung. Die Spannungen aller Integrationspunkte im Element, die mit dem Material Glas belegt sind, werden in dieser Richtung zu null gesetzt (Bruch über gesamte Scheibendicke). Der Hauptspannungswinkel, der dem Reißwinkel entspricht, wird „eingefroren“ und die zugehörigen Dehnungen ermittelt. Die Dehnungen werden über die weiteren Zeitschritte summiert und nur bei auftretenden Druckdehnungen werden Druck- und Schubspannungen zurückgegeben. Zugspannungen sind nicht mehr erlaubt.

Die zweite Hauptspannungsrichtung bleibt optional weiterhin intakt. In dieser Richtung können weiter Druck- und Zugkräfte übertragen werden, bis auch hier die Bruchspannung überschritten wird. Danach sind nur noch Druckspannungen übertragbar.

Die Integrationspunkte innerhalb der Folie verhalten sich generell linear elastisch. Dies scheint vertretbar, da sich bei durchgeführten Versuchen gezeigt hat, daß die Folie mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit deutlich elastischer wird. Daher wird mangels vorliegender Daten zur Dehnratenabhängigkeit der Folie in Verbindung mit Glas ein rein elastisches Materialmodell verwendet. Bei Überschreiten der definierten Reißspannung innerhalb der Folie wird das gesamte Element gelöscht.

Die Mitwirkung der Verglasung zwischen den Rissen über die Folie wird über einen Verbundfaktor berücksichtigt mit dem der E-Modul der Folie modifiziert wird. Vergleichsberechnungen mit diesem Materialmodell zeigen eine deutliche Abnahme der Auflagerbelastungen in Scheibenebene und stimmen besser mit den Versuchskennwerten zur Tragfähigkeit von Klebeverbindungen [15] überein. Für die untersuchten Glaskonstruktionen wurde eine relativ gute Übereinstimmung hinsichtlich des Verformungs-Zeitverlaufes mit den experimentell untersuchten Gläsern festgestellt.

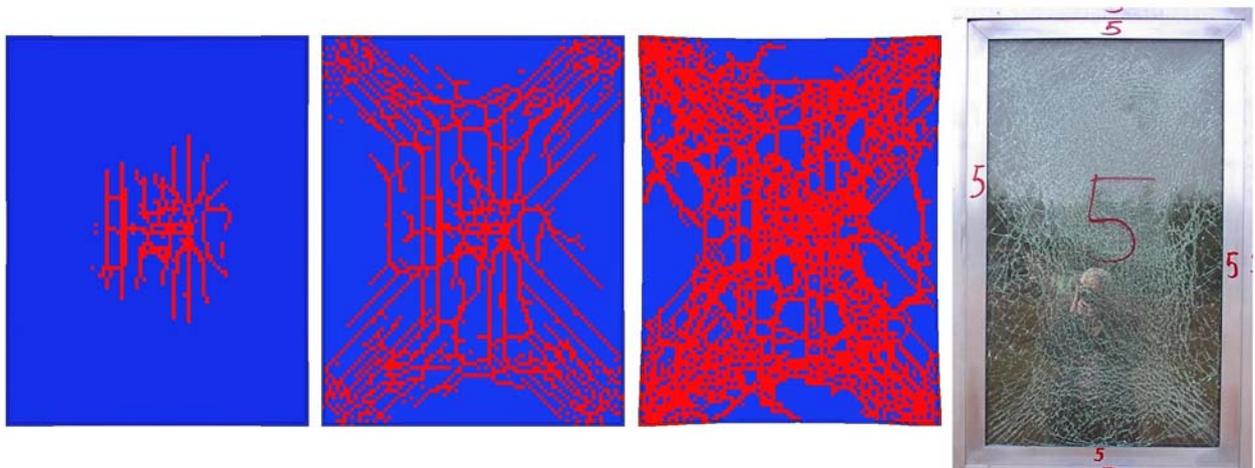


Bild 5 Rißausbreitung in einer Verbundglasscheibe / Modell und Versuch

Bild 5 zeigt die Rißausbildung in einer Scheibe durch Einfärbung der gebrochenen Elemente. Verlauf und Verteilung der Risse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Bruchbildern von Explosionsversuchen [16].

Die in der Verbundfolie vor dem Bruch auftretenden Schubverformungen können im Rahmen dieses Modells nicht erfaßt werden. Da jedoch bereits die Glasbruchspannungen extremen Schwankungen unterliegen und Vergleichsberechnungen mit Variation der Bruchspannung nur geringe Unterschiede hinsichtlich der maximalen Durchbiegung und der Auflagerbelastung zeigen, erscheint es nicht sinnvoll, im Rahmen der gewünschten Aussagen aufwendigere Modelle zu verwenden.

Für eine Formulierung über Volumenelemente mit mehreren Elementen über die Scheibendicke sind aufgrund der üblichen Scheibengrößen erhebliche Elementanzahlen erforderlich. Auch hier wäre ein nichtlineares Materialgesetz für die Mitwirkung der gebrochenen Verglasung auf Druck erforderlich.

Der Berechnungsaufwand für eine gesamte Fassade würde sich potenzieren und steht dann nach Ansicht der Verfasser in keinem Verhältnis zur Verbesserung des gewünschten Ergebnisses insbesondere unter Berücksichtigung der großen natürlich bedingten Schwankungen der Materialparameter für Glas und Folie.

5.1.3 Isolierglasscheiben und Rahmen

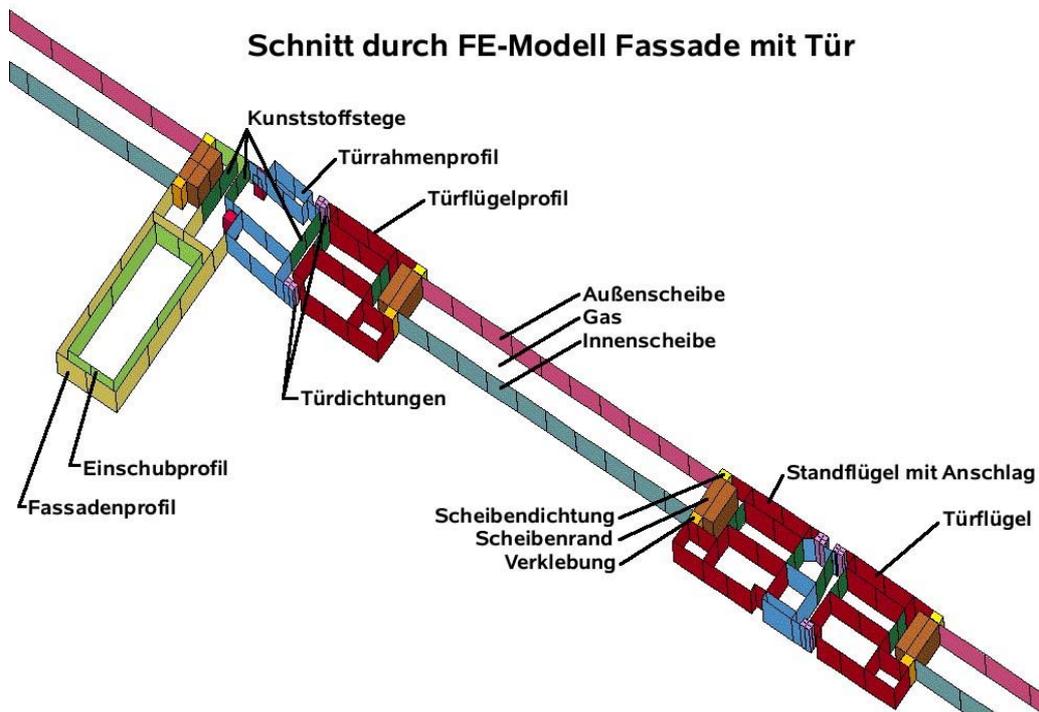


Bild 6 Schnitt durch Fassade mit Profilen und Isolierglasscheibe (FE-Modell)

Bei Isolierverglasungen wird die Interaktion der beiden Scheiben über das eingeschlossene Gasvolumen berücksichtigt. Da sich mit einer Belastung die äußere Scheibe verformt, ändert sich auch das Volumen des zwischen den Scheiben eingeschlossenen Gases. Durch die damit verbundene Änderung des Innendruckes erfolgt auch eine Belastung der Innenscheibe. Dieser Effekt wird über die Kontrolle des eingeschlossenen Gasvolumens und die zugehörige Anpassung des Innendruckes ebenfalls berücksichtigt.

Während der Simulation werden ständig mögliche Kontakte zwischen Innen- und Außenscheibe sowie zwischen Rahmen und Flügel überprüft und durch entsprechende Kontaktkräfte berücksichtigt.

Die Auflagerung der Scheiben an den Profilen bzw. Glasleisten erfolgt über Verklebungen bzw. Gummidichtungen die über Volumenelemente mit entsprechenden Versagenskriterien erfasst werden [15]. Bei Gummidichtungen kann der Verbund über Kontaktbedingungen mit entsprechenden Werten für Haft- und Gleitreibung realisiert werden. Bild 6 zeigt einen Ausschnitt des Modells aus Abschnitt 5.4. Die einzelnen Komponenten des FE-Netzes sind erkennbar und verdeutlichen den hohen Aufwand bei der Generierung regelmäßiger Netze.

5.1.4 Verriegelungen und Verbindungen

Die Verriegelungen bzw. Beschläge der Fenster können nur innerhalb der Überdeckung der Verriegelungspunkte Kräfte übertragen. Die Größe und die Richtungen der übertragbaren Kräfte und die zugehörigen Steifigkeiten unterscheiden sich je nach Verriegelungstyp. Gleiches gilt für Eckverbinder, Profilstöße und Auflagerwinkel.

Für diese Elemente werden nichtlineare Federerlemente verwendet (*MAT_NONLINEAR_PLASTIC_DISCRETE_BEAM*), die für alle 6 Freiheitsgrade separate Federkennlinien ermöglichen und über zwei gleichzeitig wirkende unabhängige Versagenskriterien verfügen.

5.1.5 Belastung

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurden die jeweiligen Druck-Zeitverläufe an den realen Strukturen gemessen. Für die Nachrechnung von Versuchsergebnissen wird der gemessene Druck-Zeitverlauf als Lastfunktion zugrunde gelegt. Falls keine Messergebnisse vorliegen, z.B. für eine Vordimensionierung vor einem Versuch, werden alternativ theoretische Druck-Zeit-Verläufe (*LOAD_BLAST) für die vorgegebene Sprengstoffmenge und den definierten Abstand verwendet.

5.2 Berechnungsbeispiel

Bei der Konstruktion handelt es sich um eine Fassadenkonstruktion mit Abmessungen von 3,6 x 3,1 m. In der Fassade ist eine 2-flügelige asymmetrische Tür integriert. Die größte Glasscheibe hat Abmessungen von ca. 1,3 x 2,2 m. Für dieses Element wurde in der Vorbereitung für einen Explosionsversuch mittels Simulationsrechnung auf Basis theoretischer Belastungskurven eine Dimensionierung der Isolierglasaufbauten, Fassadenprofile und Befestigungspunkte vorgenommen. Als Grundlage für die Modellbildung diente die Nachrechnung von verschiedenen kleineren Fenster- und Fassadenkonstruktionen. Mit ihrer Hilfe konnten fehlenden Materialdaten zu Verbindungspunkten usw. abgeschätzt werden.

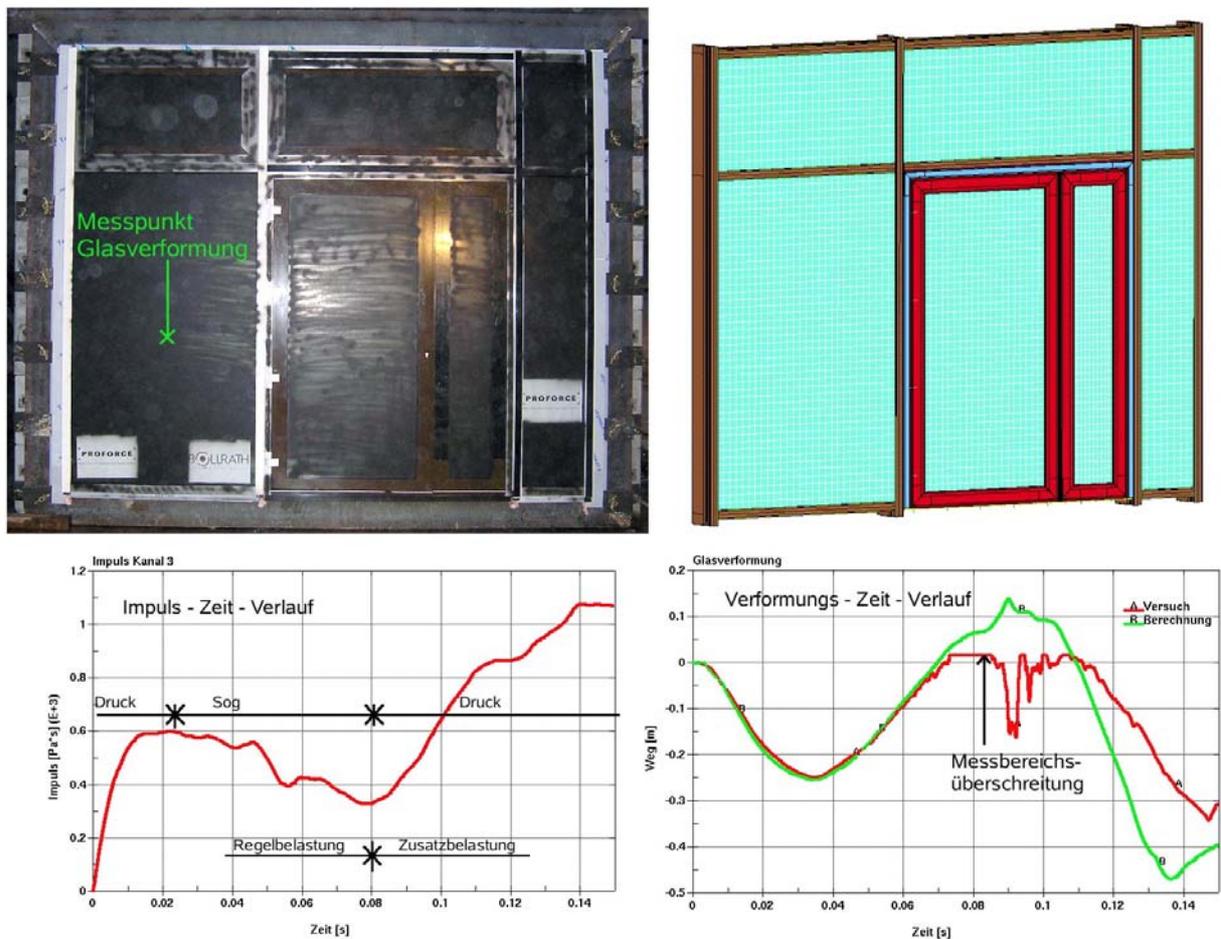


Bild 7 Nachrechnung Sprengtest Fa. Bollrath / PRO FORCE 2006 mit Verformungsvergleich

Während des Versuches wurde direkt auf der Oberfläche der Fassade der reflektierte Druck an mehreren Punkten gemessen. Die Durchbiegung der größten Scheibe wurde mittels Laserdistanzmessung aufgezeichnet. Das Ereignis wurde mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt. Aufgrund der Versuchsanordnung in einem Stollen wurde quasi nebenbei auch der Einfluß von mehrfachen Druckwellenreflexionen untersucht. Nach der ersten Überdruckphase von ca. 15 ms Länge folgte eine ca. 65 ms andauernde Sogphase. Die Druck und Impulswerte entsprachen dabei etwa einer Detonation von 100 kg TNT in einer Entfernung von 25 m auf freiem Feld. Infolge von Reflexionen innerhalb der Versuchsanlage kam es anschließend zu einer erneuten Druckbelastung, die nochmals nahezu die gleiche Impulsänderung bewirkte wie die eigentliche Detonation und nun auf die bereits vorgeschädigte Struktur einwirkte (vgl. Bild 7 unten links).

Nachträglich wurde die Struktur nochmals, unter Berücksichtigung der tatsächlich gemessenen Belastungsfunktion einschließlich der zweiten Druckphase berechnet und mit den gemessenen Scheibendurchbiegungen verglichen. Dabei zeigte sich trotz des komplexen Modells eine gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen (vgl. Bild 7 unten rechts).

Gleiches gilt auch hinsichtlich der bleibenden plastischen Verformungen der Fassadenbauteile, der auftretenden Risse in den Folien der gebrochenen VSG-Scheiben sowie dem Bruch von einzelnen Verbindungsmitteln (vgl. Bild 8). Insbesondere der horizontale Verlauf der Risse, die sowohl in der

Simulation als auch im Versuch auftreten, ist aufgrund der Scheibengeometrie überraschend. Hier würde man ohne Berücksichtigung der Scheibenlagerung eher einen vertikalen Rißverlauf erwarten. Der zeitliche Verlauf der Verformung tragender Fassadenprofile sowie die Öffnung der Tür infolge der Mehrfachreflektion decken sich weitgehend mit der Auswertung der High-Speed-Aufnahme. Diese Schädigungen traten mit Ausnahme des Glasbruches im Wesentlichen erst während der 2. Impulsbelastung auf.

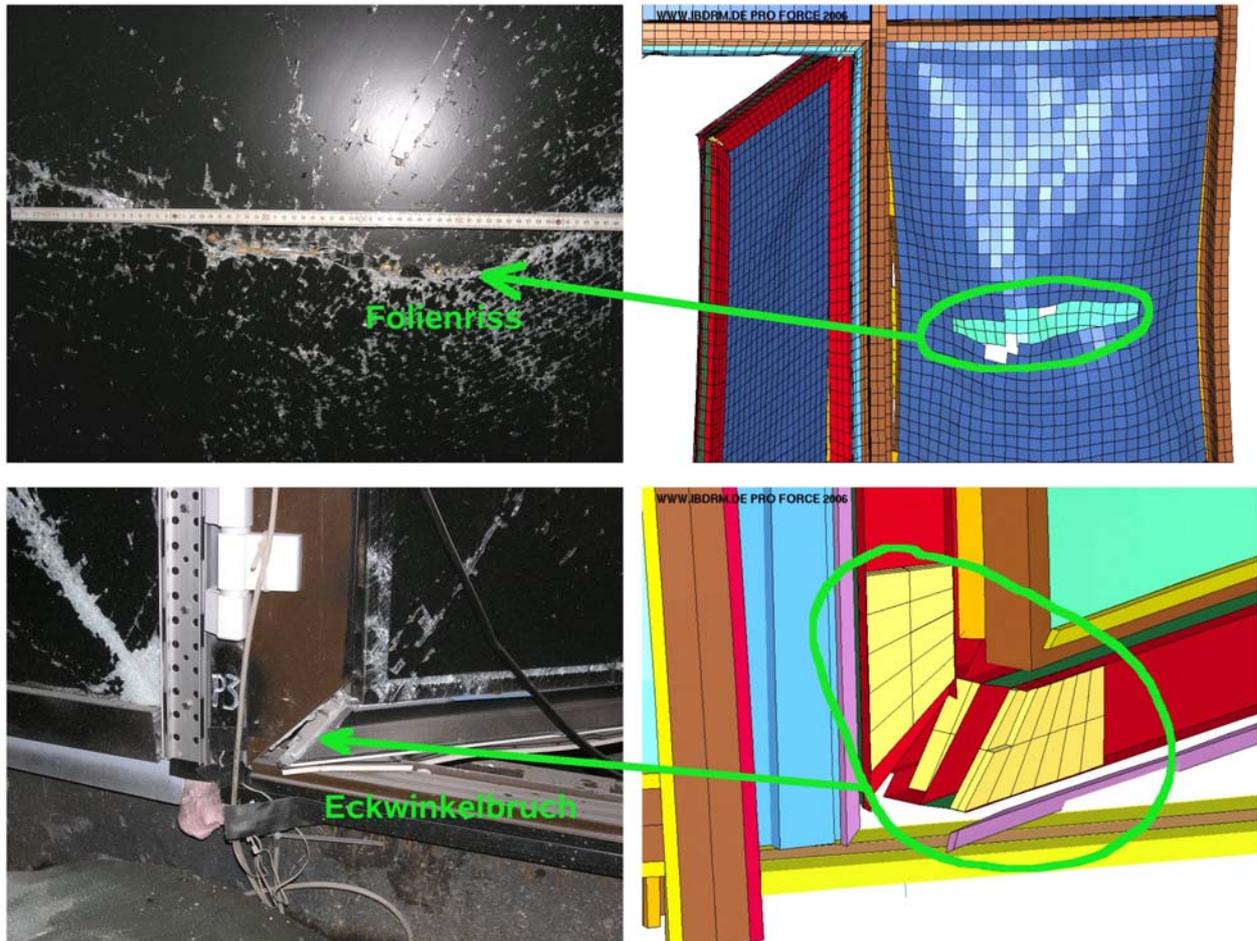


Bild 8 Vergleich Versuch - Simulation Details Foliensri und Bruch der Eckverbinder

Wie durch den Versuch erfolgreich gezeigt wurde, ist es durch gezielte Abstimmung einzelner Komponenten hinsichtlich ihrer Nachgiebigkeit möglich, lokale Spitzenbelastungen zu minimieren. Damit wird das Risiko des vorzeitigen Versagens von Verbindungen, Scheibenauflegern etc. deutlich verringert und ein weitgehend duktiler Verhalten der Gesamtkonstruktion sichergestellt. Dadurch ist es möglich, auch großflächige Fassadensysteme auf hohem Sicherheitsniveau bei wirtschaftlich vertretbarem Materialaufwand herzustellen und die derzeit noch erforderlichen kostenintensiven Sprengversuche auf ein Minimum zu reduzieren.

Für die vorgestellte Konstruktion lag der Rechenzeitbedarf bei 45000 Elementen und ca. 150 ms Untersuchungszeit bei ca. 9 Stunden. Daher ist ein regelmäßiges Elementnetz zur Optimierung der Rechenzeiten unabdingbar.

Für eine weitere Verbesserung der Simulationsmodelle werden weitere Daten zum Materialverhalten der Einzelkomponenten unter höheren Dehnungsgeschwindigkeiten benötigt:

- Verhalten von den verschiedenen Folien im Verbund mit gebrochenem Glas
- Bestimmung von Grenzwerten, bei denen eine Splitterablösung auf der Scheibenrückseite erfolgt
- Verhalten von Verklebungen und Reibungswirkung von Zwischenlagen aus Elastomer
- Verformungsverhalten der Verbindungsmittel im Zusammenwirken mit den Profilen
- Entwicklung und Validierung dehnratenabhängiger Materialmodelle insbesondere für die Folien im Verbund mit den Glasscheiben
- Untersuchungen zur Innendruckverteilung in Isoliergläsern unter Kurzzeitbelastung

Für die Berechnungen zur Druckwellenausbreitung sowie zu Interaktionen zwischen Druckwellen und Bauteilen (FSI) sind bei 3D-Problemen extrem hohe Elementanzahlen erforderlich. Dabei sind Rechenzeiten bis zu mehreren Tagen notwendig.

Für die in diesem Beitrag vorgestellten Berechnungen wird derzeit ein 64-bit Suse Linux Betriebssystem auf einem PC mit einem AMD Athlon 64 4000+ Prozessor 2,4 GHz mit 4 GB RAM verwendet.

6 Fazit und Ausblick

Die Möglichkeiten, komplexe Fenster und Fassadenkonstruktionen unter Explosionsbelastungen in der Zusammenwirkung aller Einzelteile rechnerisch zutreffend und wirklichkeitsnah zu erfassen, wurden aufgezeigt. Die häufig verwendeten und akzeptierten Abschätzungen mittels linearer Einmassenschwinger globaler Duktilitätsfaktoren und statischen Ersatzlasten werden dem komplexen nichtlinearen Systemverhalten nicht ausreichend gerecht und führen zu erheblichen Unsicherheiten im Ergebnis. Die im Bereich des Bauwesens noch vorherrschende Skepsis gegenüber der Anerkennung von dynamischen Berechnungen als Ersatz bzw. Ergänzung für Versuche erscheint überdenkenswert.

Die numerischen Simulationen versetzen den entwerfenden Ingenieur bei größeren Fassadenteilen erst in die Lage, zutreffende Prognosen für eine wirtschaftliche Lösung bei gleichzeitig hohem Sicherheitsniveau zu erstellen.

Literatur:

- [1] Software-Code und Handbuch LSDYNA, Livermore Software Technology Corporation
- [2] Kinney/Graham: „Explosive Shocks in Air“, Springer-Verlag New York 1985
- [3] Baker, Cox, u.a.: „Explosion Hazards and Evaluation“, Elsevier SPC 1992
- [4] Handbuch Workshop „Bau-Protect“, Fraunhofer Institut für Kurzzeiddynamik (Ernst-Mach-Institut), Oktober 2004
- [5] Gebbeken, N.: „Grundsätzliche Ideen und Konzepte zur Blast-Sicherheit von Glas-Membran-Fassaden“, Handbuch Workshop „Vitrum-Protect“, Fraunhofer Institut für Kurzzeiddynamik (Ernst-Mach-Institut), Februar 2006
- [6] DIN EN 13123 Fenster, Türen, Abschlüsse, Sprengwirkungshemmung -Anforderungen und Klassifizierung, Teil 1: Stoßrohr, Okt. 2001), Teil 2: Freilandversuch, Mai 2004
- [7] DIN EN 13124 Fenster, Türen, Abschlüsse, Sprengwirkungshemmung – Prüfverfahren, Teil 1: Stoßrohr, Okt. 2001), Teil 2: Freilandversuch, Mai 2004
- [8] DIN EN 13541 Sicherheits-Sonderverglasung, Februar 2001
- [9] ISO/DIS 16933 Glass in Building - Explosion Resistant Security Glazing, Test and Classification for Arena Air Blast Loading, Mai 2004
- [10] ISO/DIS 16934 Glass in Building - Explosion Resistant Security Glazing, Test and Classification by Shock Tube Loading, Mai 2004
- [11] DIN 1055 Einwirkung auf Tragwerke, Teil 9: Außergewöhnliche Einwirkungen, Anhang C, August 2003
- [12] ASTM F 1642 “Standard Test Method for Glazing and Window Systems Subject to Air Blast Loadings“, GSA – U.S. General Services Administration, Jan. 2003
- [13] Harris, C., Piersol A.: „Shock and Vibration Handbook“, Fifth Edition, Mc Graw Hill, 2002
- [14] Schneider, F., Sonntag, B., Kolling, S.: „Numerische und experimentelle Untersuchungen des Tragverhaltens einer Verbund-Sicherheitsglasscheibe unter Berücksichtigung des gerissenen Zustandes“, Bauingenieur, Band 79, November 2004
- [15] Krüger, G.: „Dynamische Untersuchungen an tragenden Verklebungen“, Vortrag „Vitrum Protect“ Freiburg 2006
- [16] Versuchsberichte von Sprengversuchen der Firmen Bollrath und Oskomera
- [17] Smith, P.D. u.a.: „Blast and Ballistic Loading of Structures“, Butterworth/Heinemann 2003