

## Dynamisches Verhalten von Bauteilen unter kurzzeitigen Einwirkungen

Albrecht Burmeister<sup>1</sup>, Heiko Rahm<sup>1</sup>, Ekkehard Ramm<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> DELTA-X GmbH Ingenieurgesellschaft

<sup>2</sup> Institut für Baustatik, Universität Stuttgart

**Zusammenfassung:** Der vorliegende Beitrag behandelt Bauteile unter kurzzeitigen Belastungen, wie sie für eine Vielzahl aktueller Aufgabenstellungen eine wichtige Rolle spielen. Kurzzeitige Einwirkungen, die durch die Interaktion der Bauwerke mit der Umgebungsluft, sei es durch die Vorbeifahrt von Hochgeschwindigkeitszügen an Lärmschutzwänden oder durch die Ausbreitung von Druckwellen infolge einer Explosion, entstehen, können mit Standard-Software und qualifizierten Rechenmodellen wirklichkeitsnah beschrieben werden. Anhand zweier baupraktischer Beispiele sollen Wege zur Problemlösung, zur Prognosesicherheit bzw. –qualität aufgezeigt werden, um als übergeordnetes Ziel die Schutzfunktion der Gebäude auch in Verbindung mit modernen Bauweisen und vor dem Hintergrund aktueller Bedrohungen zu gewährleisten.

### 1 EINLEITUNG

Kurzzeitige Einwirkungen entstehen durch Stoß-Vorgänge. Klassische Probleme sind der Gabelstapler-Anprall gegen Stützen oder der in Zusammenhang mit Kernkraftwerken intensiv diskutierte Flugzeugabsturz [1]. Als typische Bauaufgaben sind es Szenarien des Personenanpralls gegen absturzsichernde Verglasungen. Hinzu kommen Fluid-Struktur-Probleme, wie sie durch die Hochgeschwindigkeits-Vorbeifahrt an Lärmschutzwänden oder durch die Ausbreitung von Explosions-Druckwellen und deren Auftreffen auf bauliche Strukturen entstehen. Eine entkoppelte Behandlung des Interaktionsvorganges zwischen Druckwelle und Bauwerk ist zwar möglich, bedeutet aber in der Regel konservative Annahmen hinsichtlich des Reflektionsverhaltens. Gerade bei modernen Hochbauten mit weitgespannten und großflächigen Verglasungen bedeutet dies eine Überschätzung der Einwirkungen und damit einen Verzicht auf Wirtschaftlichkeit. Nicht allein aus Wirtschaftlichkeitsgründen – in diesem Zusammenhang ist auch die Unsicherheit hinsichtlich anzusetzender Sprengstoffmengen anzusprechen – sondern insbesondere auch im Hinblick auf Vorgänge mit gebrochenen Gläsern empfiehlt sich deshalb die Lösung des gekoppelten Problems. Derartige Probleme sind heute lösbar, da nach den Erfahrungen der Autoren mit Hilfe rechnerischer Simulationen eine hohe Prognosesicherheit einhergeht.

Damit werden auch konstruktive Fragen in Verbindung mit der Detailgestaltung beispielsweise von Fassaden beantwortbar. Eine besondere Bedeutung kommt diesen Methoden angesichts von Explosions-Szenarien zu, wenn die Schutzfunktion von Gebäuden aufrecht erhalten werden soll.

## 2 LÄRMSCHUTZWÄNDE UNTER KURZZEITIGEN EINWIRKUNGEN

### 2.1 Phänomenologische Beschreibung

Lärmschutzwände stellen baulich relativ einfache Konstruktionen dar. Üblicherweise werden Bohrpfähle benutzt, um darin Stahlprofile (Doppel-T-Querschnitte) am Fußpunkt einzuspannen. Zwischen diese auskragenden Pfosten werden die Lärmschutz-Elemente eingestellt. Üblich sind Ausführungen aus Blech oder Stahlbeton. Im Folgenden sollen lediglich Blech-Elemente in Verbindung mit Gleisanlagen und Zugverkehr betrachtet werden.

Schnell fahrende Fahrzeuge verdrängen die umgebende, ruhende Luft seitlich und nach oben. Hierdurch wird eine zeitlich veränderliche Belastung der gleisnahen Lärmschutzwände erzeugt, welche die betroffenen Wände (Paneele und Pfosten) zu Schwingungen orthogonal zur Gleisrichtung anregt. Der bei einer Vorbeifahrt eines Zuges entstehende Druck-Zeit-Verlauf nach DS 804 [2] ist in Abb. 1 dargestellt, wobei die Druck-Sog-Welle mit der Geschwindigkeit des Zuges über die Lärmschutzwand wandert. Die Impulslänge der Wechselbelastung beim Passieren des Bugs beträgt etwa 0,12s. Dies würde, unterstellt man eine harmonische Anregung, einer Frequenz von 8,3Hz entsprechen. Dies führt zu einer Anregung der Lärmschutzelemente über unterschiedliche Beanspruchungspfade.

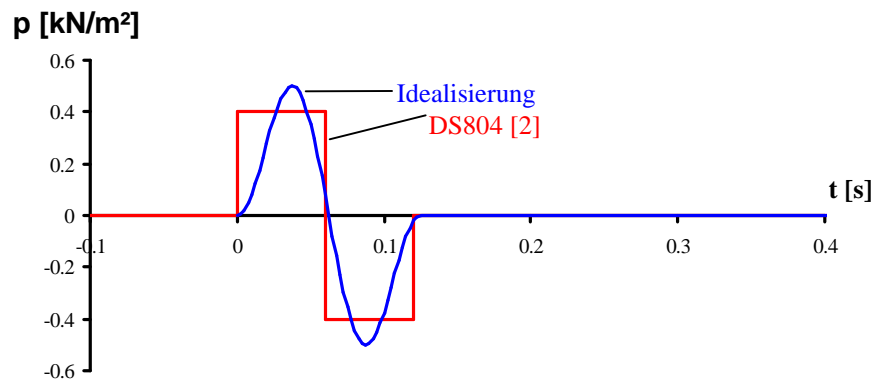


Abbildung 1: Belastung durch Zugvorbeifahrt

Die direkte Einwirkung der Druckwerte auf das Element führt zu Lagerreaktionen gegen den Pfosten mit den jeweils zugehörigen Deformationen. Diese stellen Fußpunkt-Anregungen für die Nachbarelemente dar, welche sich mit den direkten Einwirkungen auf die Elemente aus den Druck-Unterschieden überlagern. Aufgrund der Komplexität des Strukturverhaltens und der Konsequenzen, die sich für den schlussendlich zu führenden

Betriebsfestigkeitsnachweis ergeben, empfehlen sich transiente Analysen, die die wandernde Belastung abbilden. Dabei sind Finite-Element-Modellierungen zu verwenden, welche die Struktur detailliert beschreiben. Insbesondere wird für die Pfosten eine Schalen-Formulierung gewählt, um auch Effekte der Wölbkrafttorsion einzubeziehen.

Hinsichtlich des mechanischen Verhaltens solcher Wände sind folgende Teilaspekte hervorzuheben:

- Boden-Bauwerk-Interaktion
- Interaktion zwischen Pfosten und Wandelementen
- Schwingungsverhalten der Wandelemente allein

## 2.2 Konstruktionsbeschreibung

Die untersuchte Lärmschutzwand besteht aus Stahlpfosten (HEB200), die in Stahlbeton-Bohrpfähle eingespannt sind. Die entstehenden Felder zwischen den Pfosten werden mit 6m langen, übereinander gestapelten Paneelen geschlossen [Abb. 2]. Das unterste Element besteht aus Stahlbeton (1,25m hoch), die darüber liegenden aus dünnen Blechelementen (jeweils 0,75m hoch, Dicke: 150 mm). Die in Abb. 2 angegebenen Höhenkoten beziehen sich auf die Schienenoberkante (SOK).

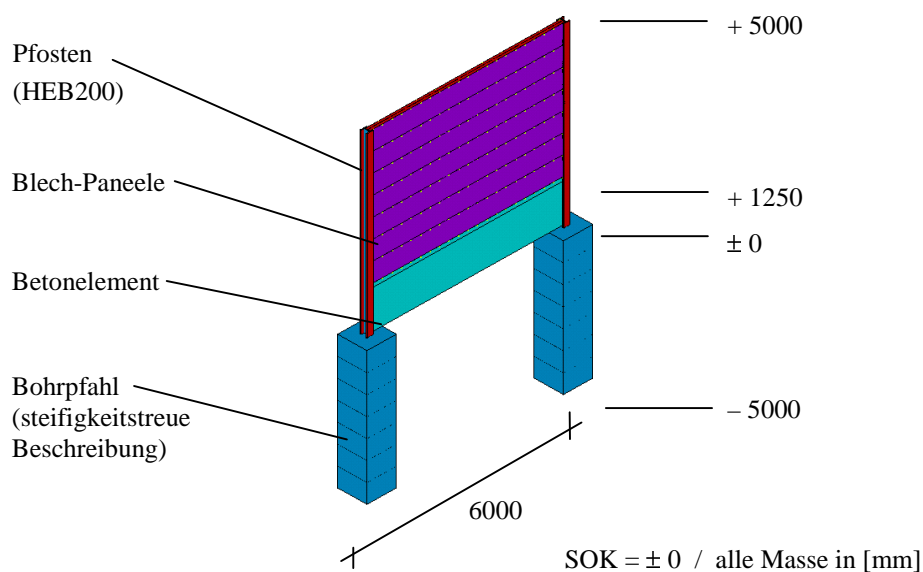


Abbildung 2: Aufbau der Lärmschutzwand

### 2.3 Berechnungskonzept, Modellierung

In einem ersten Schritt werden die Lärmschutz-Elemente (Paneele) ohne Unterkonstruktion untersucht. Hierbei wird das Eigenschwingungsverhalten berechnet.

In einem zweiten Schritt erfolgt die Berechnung eines 120m langen Abschnitts (20 Segmente) der Lärmschutzwand. An diesem komplexen Modell werden zunächst erneut die Eigenfrequenzen ermittelt. Im Anschluss erfolgt die Simulation der Vorbeifahrt eines Zuges. Hierzu wird die zeitlich und örtlich variable Belastung im Rahmen einer transienten Analyse auf die Lärmschutzwand aufgebracht und die Deformationen der Wand im mittleren Bereich ausgewertet (ungestörter Bereich).

Zur Durchführung der angesprochenen Analysen werden Rechenmodelle entwickelt, welche die Paneele, die Pfosten sowie deren Gründungssituation in ihren Abmessungen, Steifigkeiten und Massen erfasst. Die Berechnung erfolgt mit dem Finite-Element-Programm ANSYS, wobei dreidimensionaler FE-Modelle verwendet werden.

Die Paneele werden mittels Schalenelementen modelliert. Die Pfosten und Bohrpfähle werden mit Schalen- bzw. Balkenelementen abgebildet. Die elastische Bettung im Erdreich wird durch diskrete Feder-Dämpfer-Elemente realisiert.

### 2.4 Eigenfrequenzen und Eigenformen

In Abb. 3 ist die erste Eigenform des Blechelements mit der ersten Eigenfrequenz bei 4,2Hz dargestellt; es handelt sich um die typische Biegeschwingung des Einfeldträgers. Demgegenüber ergibt die erste Eigenfrequenz für die reale Lärmschutzwand einen deutlich geringeren Wert von 3,2Hz, wobei es sich bei der zugehörigen Eigenform um die Biegeschwingung der auskragenden Pfosten handelt.

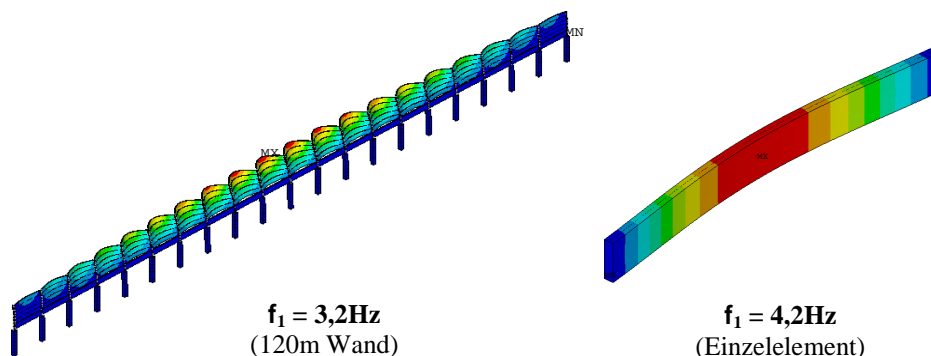


Abbildung 3: Erste Eigenform der Lärmschutzwand und eines Blechelements

## 2.5 Dynamisches Verformungsverhalten

In Abb. 4 sind die zeitabhängigen Verformungen dargestellt. Die angegebenen Ergebnisse beziehen sich jeweils auf das Feld zwischen 60 und 66m des FE-Modells. Die Verformungen werden auf der Höhe des Schwerpunkts des obersten Paneels ausgewertet. Die Deformationen in Feldmitte sind mit „F60-66“ gekennzeichnet (durchgezogene Kurve). Die zugehörigen Pfosten werden im Diagramm mit „S60“ (gestrichelte Kurve) und „S66“ (strichpunktierte Kurve) bezeichnet.

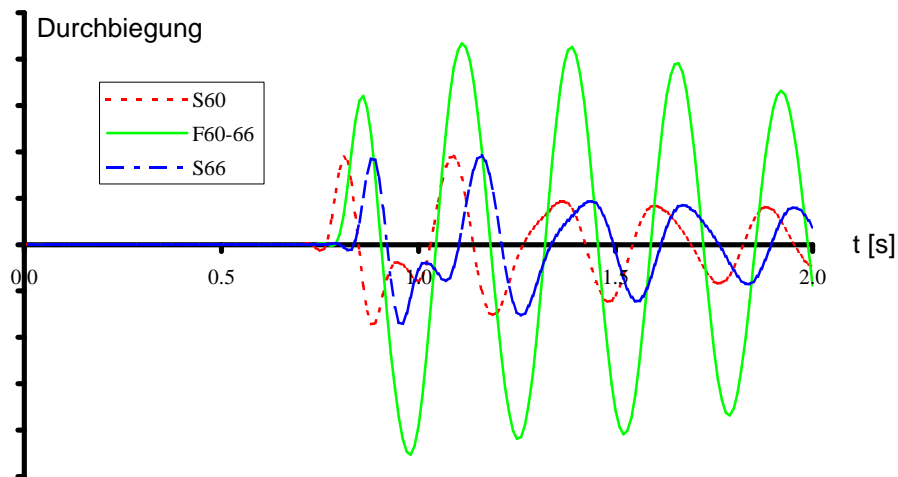


Abbildung 4: Zeit-Verformungs-Diagramm der Lärmschutzwand mit Blechelementen

Bei einer Geschwindigkeit von 300km/h (=83,3m/s) erreicht der Zug nach 0,72s die Mitte des FE-Modells bei 60m. Durch die Druckbelastung wird die Wand zunächst vom Zug weg verformt (positive Durchbiegungen). Beim Zurückfedern in Kombination mit der Sogbelastung verformt sich die Wand hin zum Zug. Die Verformungsverläufe der beiden betrachteten Pfosten sind näherungsweise affin mit einem Zeitversatz von 72ms, in der der Zug den Abstand von 6 m zurücklegt. Die Durchbiegungen der Paneele sind in etwa um den Faktor 2 größer als diejenigen der Stützen. Dabei ist berücksichtigt, dass die Durchbiegungen der Paneele als absolute Verschiebungsgrößen aufgetragen sind und Anteile aus der Pfostendeformation enthalten. Nach dem Passieren des Zuges kommt es zu einem Ausschwingen der Wand, wobei hier erneut die Paneele deutlich größere Amplituden als die Pfosten aufweisen.

Aus dem Verhältnis von statischer Durchbiegung zur maximalen dynamischen Durchbiegung der Pfosten kann der „dynamische Lastfaktor“ (DLF) bestimmt werden. Die starke dynamische Überhöhung für das Blechelement kann auf das ungünstige Abstimmungsverhältnis zurückgeführt werden.

Ein zur Verifizierung des Rechenmodells durchgeführter Vergleich mit gemessenen, zeitabhängigen Auslenkungen bestätigt die Qualität des Rechenmodells und die Prognosesicherheit des gewählten Verfahrens. Dies zeigt die Leistungsfähigkeit des hier gewählten Vorgehens in Verbindung mit realistischen Rechenmodellen.

### 3 FASSADEN UNTER EXPLOSIONSBELASTUNG

#### 3.1 Problembeschreibung

Über lange Zeit bestand die Aufgabe einer Fassade darin, den Raum abzuschließen und das Gebäudeinnere vor Beeinträchtigungen durch Klimaschwankungen inklusive Feuchtigkeit, Schall und vor zu starker Sonneneinstrahlung zu schützen. Diese Aufgaben sind im Prinzip gelöst. Den Planern und Bauausführenden steht eine breite Palette unterschiedlicher Materialien und Systeme zur Verfügung, um selbst komplexe bauphysikalische Anforderungen bei gleichzeitiger Befriedigung hoher gestalterischer Ansprüche zu erfüllen. Allerdings sind moderne Konstruktionen empfindlich gegenüber terroristischen Angriffen, insbesondere in Verbindung mit der Explosion von Sprengstoffen. 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. Das Augenmerk soll vorrangig auf diesen Konstruktionen liegen. Ihre Antwort ist im Wesentlichen abhängig von der Art und der Menge des Sprengstoffes, dem Abstand zur Explosion, vom Tragwerk der Fassade und der Scheibengeometrie. Der Spitzendruck kann in Abhängigkeit von dem skalierten Abstand nach Kinney [3] ermittelt werden.

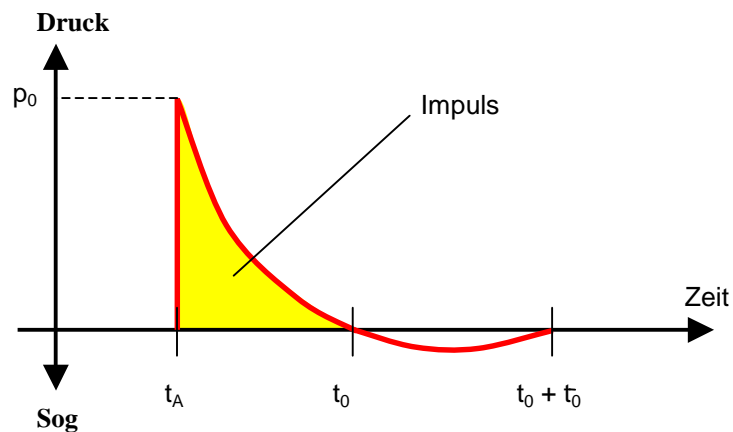


Abbildung 5: Druck-Zeit-Verlauf einer Detonation im Freifeld

Für einfache Fälle von Schutzverglasungen legt die DIN EN 13123-1:2001 [4] Klassen mit unterschiedlicher Beanspruchbarkeit fest. Die Höhe des positiven Maximaldruckes der reflektierten Druckwelle ist auf 200 kPa begrenzt.

Um eine Gefährdung der Menschen im Gebäudeinneren auszuschließen ist sicherzustellen, dass weder kleine Glassplitter noch größere Trümmer infolge gebrochener Glasscheiben umherfliegen, noch dass von außen anprallende Teile die Verglasung durchdringen.

### 3.2 Strukturverhalten

Abb. 5 zeigt einen Druck-Zeit-Verlauf, wie er typischerweise infolge von Explosionen entsteht. Die erste Phase mit steilem Druckanstieg kann näherungsweise als Dreiecks-Impuls angesprochen werden, an die sich ein Bereich mit geringem Unterdruck anschließt. 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
- Optimierung der Glasart, des Aufbaus und der Verankerung
- Einrichtung von Rückhaltemaßnahmen

### 3.3 Lösungsansätze

Als Standard-Prüfmethode für durch Explosion belastete Gläser ist der Versuch anzusprechen. 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.

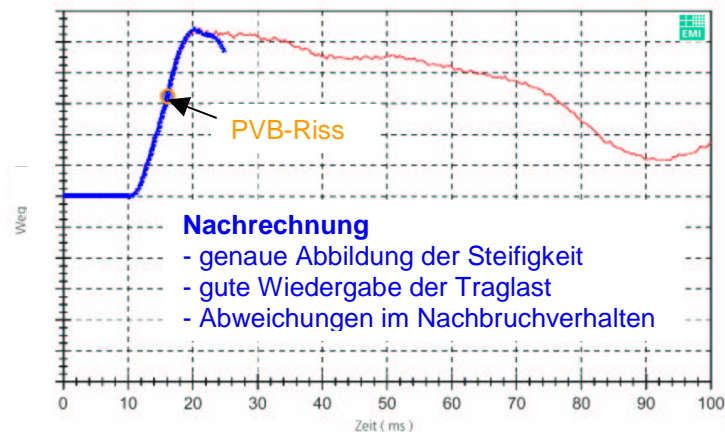


Abbildung 6: Nachrechnung einer brechenden VSG-Scheibe (Stoßrohrversuch [8])

Nachteilig bei beiden 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.

Die angesprochenen Nachteile 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. Abb. 6 zeigt die Nachrechnung eines Stoßrohrversuches [8], bei welchem das Glas zu Bruch ging. Diese Untersuchung wurde mit Hilfe einer Finite-Element-Modellierung erzeugt. 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-Splittern sind in Verbindung mit expliziten Codes dem Grunde nach ebenfalls möglich. Damit wird nicht nur die Berücksichtigung der Interaktion von Glas und Tragstruktur möglich, vielmehr gelingt es auch, das Reflexionsverhalten gezielt zu beeinflussen sowie 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.

### **3.4 Anwendungsbeispiel**

Im Rahmen des baupraktischen Anwendungsbeispiels [6] soll zunächst auf das Reflexionsverhalten 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. Abb. 7). Die Größe des Reflexionsfaktors ist von der Steifigkeit der druckbeaufschlagten Struktur abhängig. Eine starre Struktur führt zu einem Reflexionsfaktor von 2. Eine nachgiebige Struktur führt zu einem Reflexionsfaktor kleiner als 2.

Zur numerischen Berechnung der Beanspruchungen von Fassadenelementen werden im Vorfeld die Reflexionsfaktoren für die Prallscheiben (Linienlagerung, s. Abb. 9) bestimmt. Hierbei wird der Glasaufbau variiert, so dass sich die Reflexionsfaktoren als Funktion des

Glasaufbaus ergeben. Ziel ist es, die so ermittelten Reflexionsfaktoren in einem zweiten Schritt zur nichtlinearen transienten Berechnung der Prallscheiben zu verwenden. Zur Ermittlung der Reflexionsfaktoren wird vor das FE-Modell einer Prallscheibe eine 20m lange Luftsäule (Fluid-Elemente) gesetzt (Abb. 7). Die selben Elemente kommen bei Isolierverglasungen zum Einsatz [7]. 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.

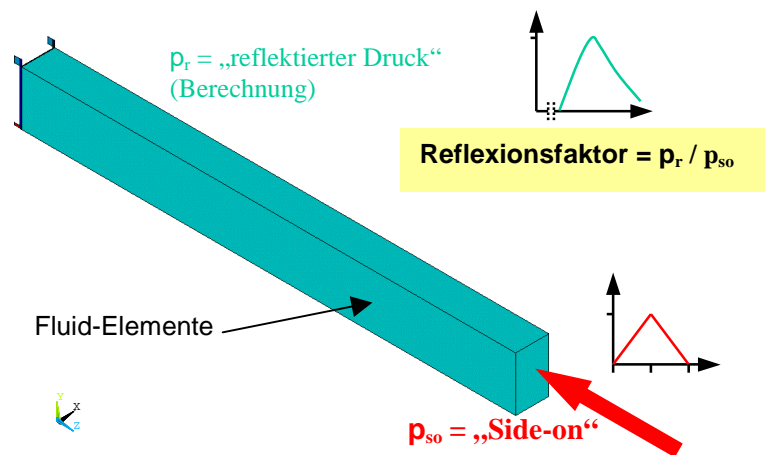


Abbildung 7: FE-Modell einer Prallscheibe mit Luftsäule

In Abb. 8 sind die Reflexionsfaktoren in Abhängigkeit der Glasstärke dargestellt. Auf der sicheren Seite werden für VSG-Scheiben jeweils die Reflexionsfaktoren für die Gesamtglasstärke abgegriffen, d.h. zur Ermittlung des Reflexionsfaktors wird von einem starren Verbund der VSG-Scheibe ausgegangen. Es wird die asymptotische Annäherung der Funktion an die Obergrenze von 2,00 für eine starre Struktur deutlich.

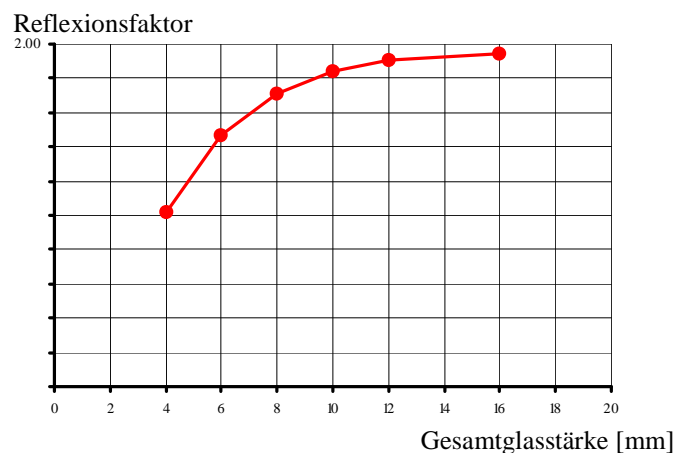


Abbildung 8: Reflexionsfaktoren in Abhängigkeit der Gesamtglasstärke

### 3.5 Berechnung der Prallscheiben

Die Prallscheibe (Verbundsicherheitsglas – VSG aus 2×4mm SPG,  $b \times h \cong 1.4 \times 2.2$  m) wird mit Hilfe von Schalenelementen abgebildet. Bei der Berechnung ohne Schubverbund wird die Scheibe mit einer ideellen Scheibendicke modelliert, deren Biegesteifigkeit der Biegesteifigkeit der beiden Einzelscheiben entspricht. 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 verbunden in Normalenrichtung an die Rahmen angekoppelt. Zwischen Al-Rahmen und Glas werden stirnseitig Kontaktelemente eingesetzt, die die Darstellung eines Anschlages des Glases gegen den Rahmen ermöglichen.

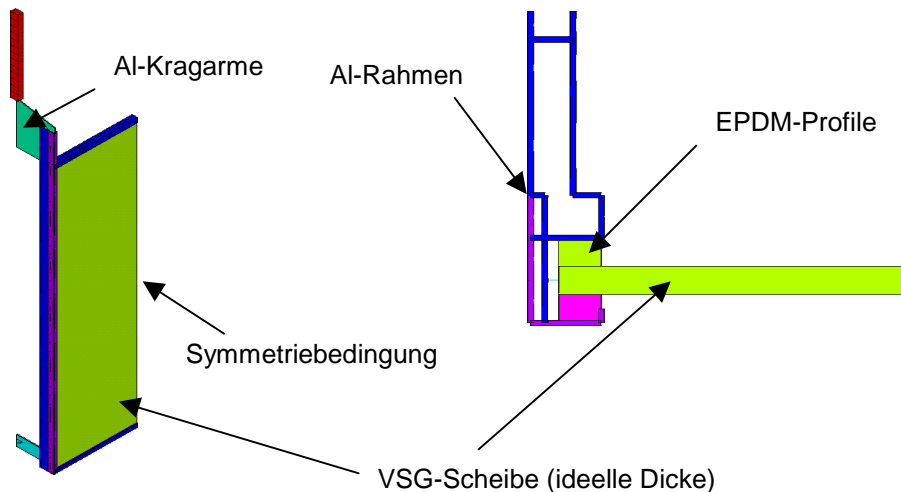


Abbildung 9: FE-Modell der Prallscheibe

In Abb. 9 ist das FE-Modell dargestellt. Die Lagerung erfolgt an den Stellen der Kragarme, an denen diese mit der Unterkonstruktion verbunden sind. Die 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 Abb. 10 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.

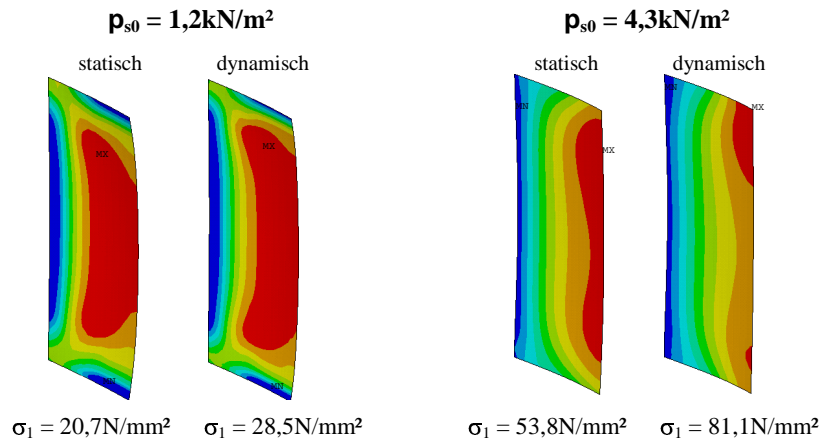


Abbildung 10: Prallscheibe – Hauptspannungen  $\sigma_1$  im Glas

### Nachweis des Glaseinstandes

Es ist ein Mindest-Glaseinstand von 5mm zu garantieren. Hieraus wird die Forderung abgeleitet, dass der planmäßige Glaseinstand unter Berücksichtigung aller Fertigungs- und Montageteranzen größer sein muss als die Summe aus Mindest-Glaseinstand (5mm) und der Relativbewegung zwischen Glas und Dichtung. Die ermittelten Werte liegen auf der sicheren Seite, da im Rechenmodell eine reibungsfreie Verschiebung zwischen Glas und Dichtung angenommen wurde.

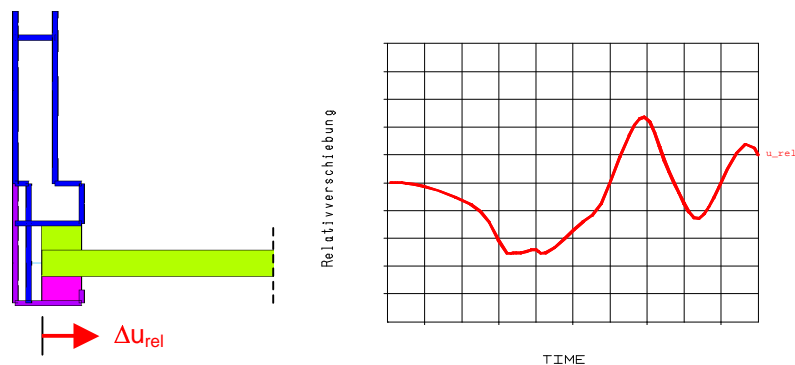


Abbildung 11: Erforderlicher Glaseinstand

In Abb. 11 sind die maximalen Relativbewegungen zwischen Glas und Dichtung zusammengefasst. Die seitlichen AI-Profile bewegen sich unter Belastung aufeinander zu, bis sie in Kontakt mit den Stirnseiten der Scheibe kommen. Beim „Zurückfedern“ der Scheiben neigen diese aus dem AI-Profil herauszugleiten. Es ist sicherzustellen, dass auch in diesem Zustand der Mindest-Glaseinstand gewährleistet ist.

#### **4 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 Aufgabenstellung zu validieren sind.

#### **LITERATUR**

- [1] KTA-GS-75 – BR5, Allgemeine technische Anforderungen  
Regelentwurfsvorlage Fassung Dezember 2002-2
- [2] Richtlinie DS804  
Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke), Deutsche Bahn AG, 2003
- [3] Gebbeken, N., Ruppert, M.  
Ein Beitrag zur Simulation von Baustrukturen unter hochdynamischen  
Kurzzeitbeanspruchungen, Bauingenieur 74 (1999), Nr. 11, S. 461-470
- [4] DIN EN 13123-1, 2001-10  
Fenster, Türen und Abschlüsse - Sprengwirkungshemmung, Anforderungen und  
Klassifizierung – Teil 1: Stoßrohr
- [5] Timmel, M.  
Numerische Simulation von Verbundsicherheitsglas unter Crashbeanspruchung,  
Diplomarbeit, Lehrstuhl für Statik und Dynamik, BTU Cottbus, 2003
- [6] Burmeister, A., Rahm, H.  
Simulation explosionshemmender Fassadenkonstruktionen,  
Seminar „Glas im Konstruktiven Ingenieurbau 4“ der FH München, 17.9.2004
- [7] Burmeister, A., Reitinger, R.  
Innovative Lösungen für moderne Isolierverglasungen, glasklar, Produkte und  
Technologien zum Einsatz von Glas in der Architektur, DVA, 2003
- [8] Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut  
Glas-Bruch-Verhalten im Stoßrohrversuch, 2003