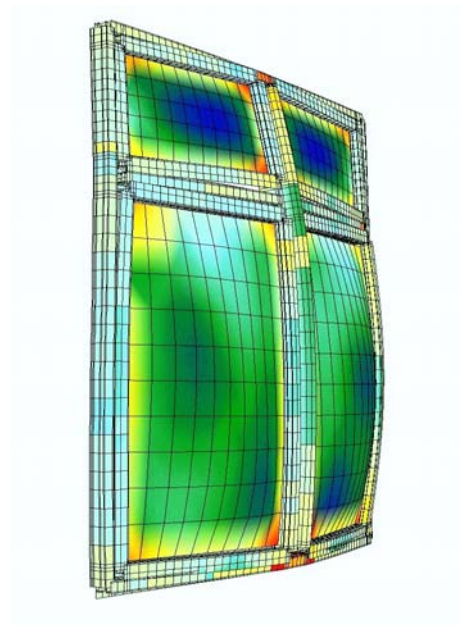
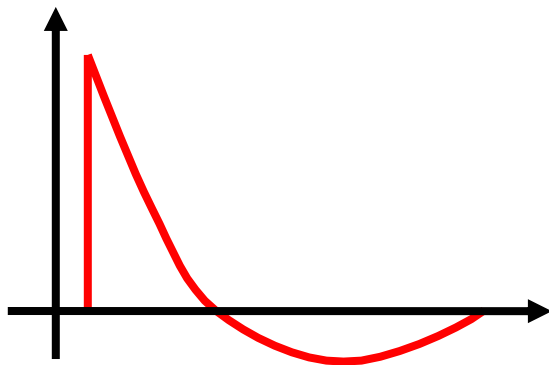


Berechnung explosionshemmender Fenster- und Fassadenkonstruktionen



Dr.-Ing. Rüdiger Müller Dipl.-Ing. Matthias Wagner

August 2006

Inhaltsverzeichnis:

Berechnung explosionshemmender Fenster- und Fassadenkonstruktionen.....	1
Inhaltsverzeichnis:.....	2
1. Gefahrenpotential bei Sprengstoffdetonationen.....	3
2. Ermittlung der Einwirkungen.....	4
2.1 Theoretische Kenngrößen einer Detonation.....	4
2.2 Druckwellenausbreitung und Einflussfaktoren.....	6
3. Stand der Normung.....	9
4. Abschätzung des dynamischen Verhaltens von Bauteilen.....	10
5. Schadenskriterien und Versagensmechanismen.....	11
6. Dynamische FE-Berechnungen.....	13
6.1 Verwendete Programmsysteme und Anwendungsbereiche.....	13
6.2 Modellierung.....	14
6.2.1 Fassadenprofile.....	14
6.2.2 Materialverhalten von Verbundglas.....	14
6.2.3 Isolierglasscheiben und Rahmen.....	16
6.2.4 Verriegelungen und Verbindungen.....	16
6.3 Belastung.....	17
6.4 Berechnungsbeispiel.....	17
7. Weitere Entwicklungen und Anregungen zu Forschungen.....	19
8. Fazit und Ausblick.....	19

Copyright:

Das vorliegende Dokument darf nur zu Informationszwecken weitergeleitet oder kopiert werden. Eine auszugsweise Weiterverwendung oder Verwertung ist nur unter Nennung der Quelle bzw. mit schriftlicher Zustimmung durch ibdrm statthaft.

Danksagung:

Die vergleichenden rechnerischen Untersuchungen basieren weitgehend auf Versuchen, die an Fenstern und Fassadenbauteilen der Firma Bollrath, Sandstrasse 37, D-5731 Waltrop in deren Auftrag durchgeführt worden sind (vgl. Quellenangaben). Für die Überlassung der Versuchsdaten und zugehörigen Informationen zum System PRO FORCE sei an dieser Stelle gedankt.



Zusammenfassung:

Der Beitrag beschreibt die auf ein Fenster oder eine Fassade einwirkende Belastung infolge der Explosion eines Sprengsatzes sowie die rechnerische Simulation der Reaktion von komplexen aus vielen Einzelkomponenten aufgebauten Fassadenkonstruktionen unter Erfassung der verschiedenen Bruchvorgänge und Versagensmechanismen. Ziel der Untersuchungen ist es, die sehr aufwändigen Sprengversuche zur Feststellung der Sicherheit gegen Versagen durch rechnerische Simulationen zu ergänzen oder zu ersetzen.

Abstract:

This report describes blast loads acting on a window or a glass facade due to a detonation of an explosive device as well as computational simulations of the behavior of complex facade constructions made out of many single components with attention to the different processes of fracture and damage. Purpose of the studies is to complete or replace the very expensive blast tests in order to determine safety against collapse by computational simulation.

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.



Bild 1 Bersten einfacher Fenster nach einer Explosion (Quelle: US Army Corps of Engineers)

Fig. 1 Burst of a single window after an explosion (source: US Army Corps of Engineers)

Bild 1 verdeutlicht die Wirkung einer Explosion auf normale Fenster. Die Gefährdung von Personen durch fliegende Glassplitter und Fensterteile ist offensichtlich.

2. Ermittlung der Einwirkungen

2.1 Theoretische Kenngrößen einer Detonation

Für einfache Fälle, z.B. für den Fall der Totalreflektion an einer Fassade, lässt sich der Druck-Zeitverlauf mit Hilfe von Formeln, Diagrammen oder einfachen Programmen abschätzen ([2], [17])

Die in der Literatur angegebenen empirischen Formeln und Graphen zur Ermittlung von Druck- und Impulsgrößen basieren teilweise auf unterschiedlichen Versuchen und Messungen. Hierbei können Unterschiede auftreten. Der Gültigkeitsbereich einzelner Literaturangaben, besonders hinsichtlich der skalierten Entfernungen ist dabei zu beachten. Extrapolationen sollten vermieden werden. Weiterhin muss immer darauf geachtet werden um welche Kenngröße es sich handelt, beispielsweise um den Druck in der freien Druckwelle (side-on pressure) oder um den Druck der reflektierten Welle.

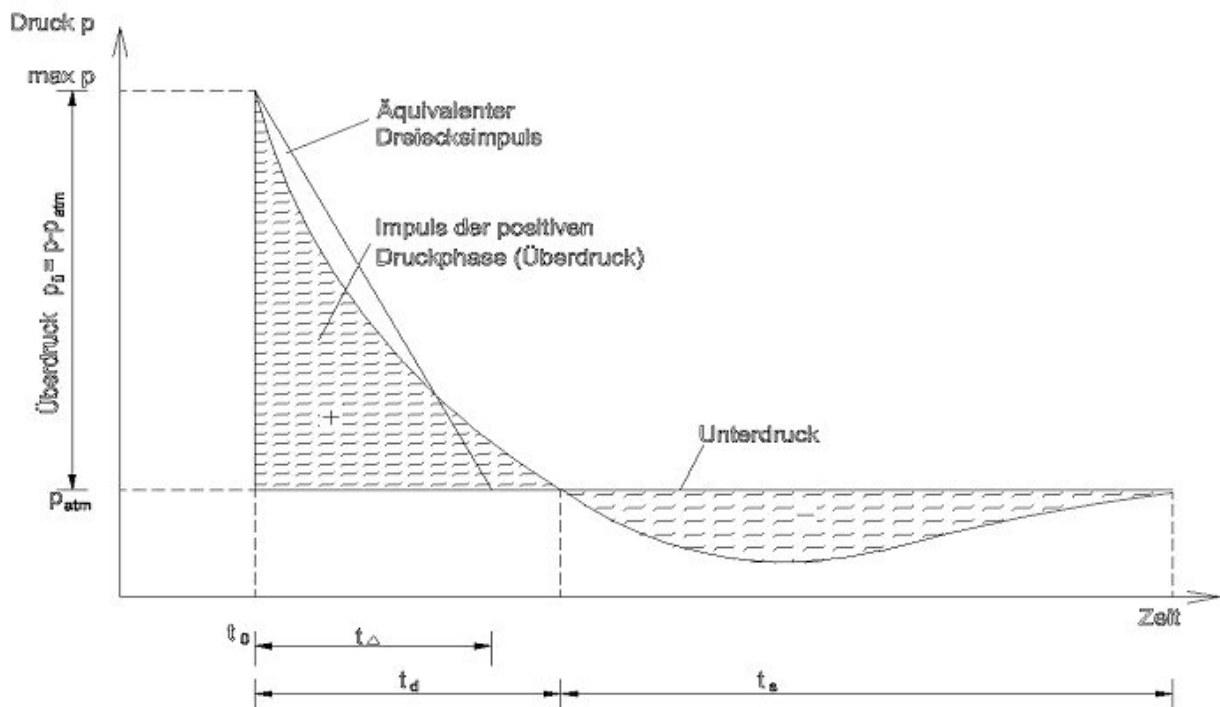


Bild 2 Theoretischer Druck-Zeit-Verlauf einer Explosionswelle

Fig. 2 Theoretical pressure-time-curve of a blast wave

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. Der Verlauf sowie die wesentlichen Parameter einer theoretischen Druckwelle sind Bild 2 zu entnehmen.

Bei den gängigen Fenster- und Fassadenkonstruktionen ist in der Regel nicht so sehr der Spitzenüberdruck $p_0 = \max p - p_{\text{atm}}$, sondern vielmehr der Impuls maßgebend, der die gesamte Krafteinwirkung über die Einwirkungszeit repräsentiert.

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 Überkopfverglasungen), 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.

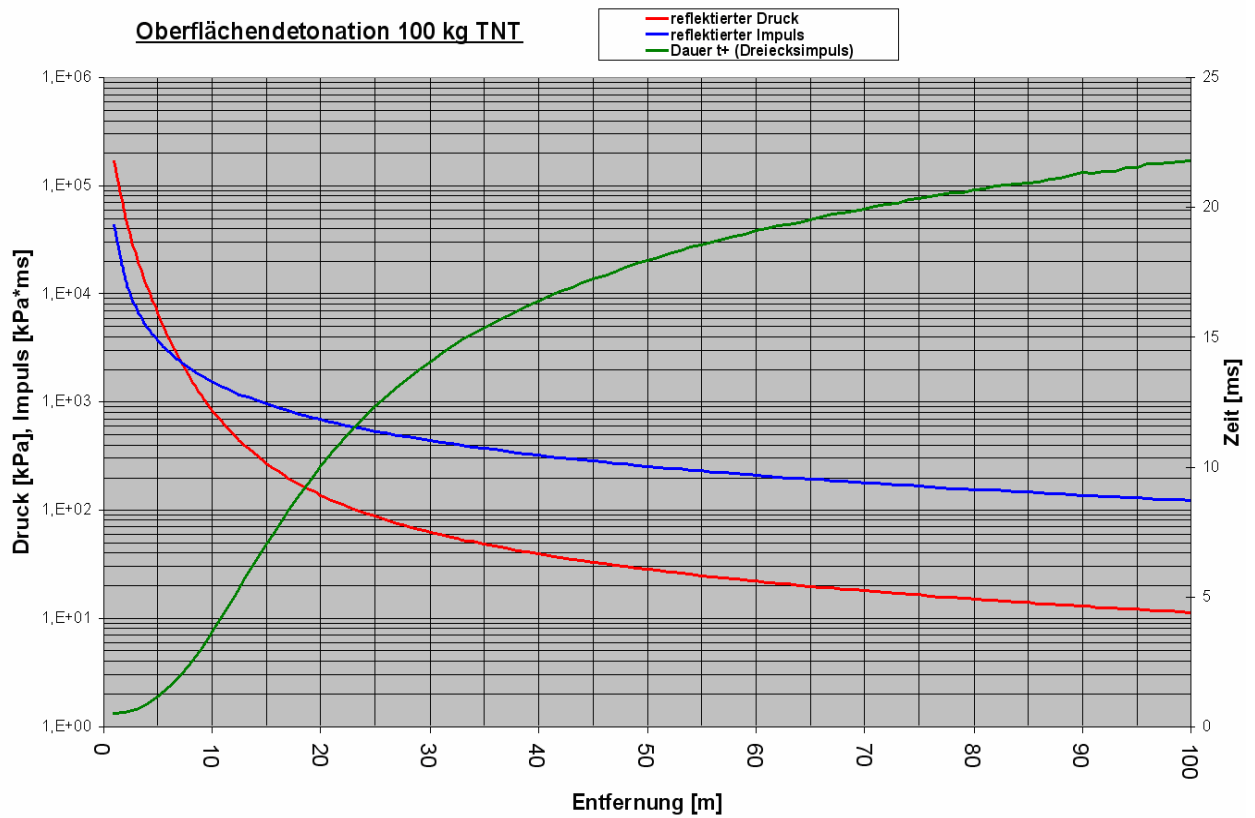


Bild 3 Theoretische Abhängigkeiten von Druck, Impuls und Dauer mit der Entfernung vom Explosionsort
 Fig. 3 Theoretical dependence of pressure, impulse and duration with distance from explosion site

Bild 3 zeigt für den Fall der Totalreflektionen bei einer Sprengung mit 100 kg TNT den maximalen Spitzendruck, den Impuls und die Einwirkungszeit der positiven Druckphase für den Dreiecksimpuls in Abhängigkeit von der Entfernung zum Sprengort.

Die drastische Abhängigkeit von der Entfernung, die sich aus der Theorie der ungestörten dreidimensionalen Wellenausbreitung ergibt, ist deutlich erkennbar.

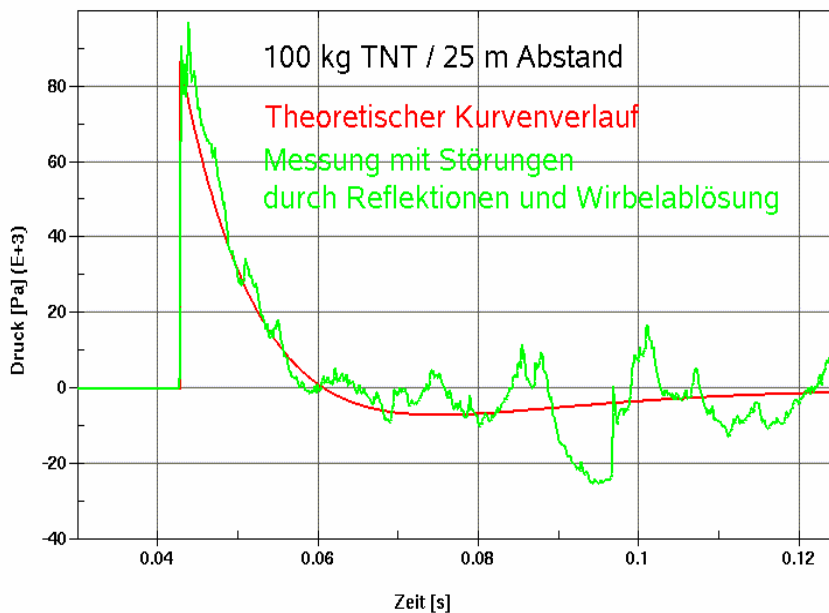


Bild 4 Gemessener und berechneter Druck-Zeit-Verlauf (Quelle: Bollrath PRO FORCE)
 Fig. 4 Measured and computed pressure-time-curve (source: Bollrath PRO FORCE)

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. Diese Störungen mit einzelnen Spitzen im Druckverlauf haben jedoch, wie später gezeigt wird, auf die Reaktion von üblichen Fenster- und Fassadenkonstruktionen nur einen untergeordneten Einfluss.

Deutlichere Abweichungen von den theoretischen Werten hinsichtlich dieser Größen ergeben sich insbesondere bei komplexeren baulichen Situationen. Hier sind genauere Betrachtungen bezüglich möglicher Einwirkungen erforderlich.

2.2 Druckwellenausbreitung und Einflussfaktoren

Wenn eine komplexe und fragile Konstruktion, wie sie eine Fensterkonstruktion darstellt, gegen ein Explosionsereignis auszulegen ist und die Reaktion rechnerisch vorhergesagt werden soll, so muss zunächst die Einwirkung möglichst genau und realistisch bestimmt werden, d.h. der Druck im Zeitablauf, der durch die Druckwelle auf das Bauteil einwirkt.

Bild 5 zeigt ein Beispiel für die Druckwellenausbreitung nach einer Explosion und die Interaktion mit den vorhandenen Bauwerken. Die Berechnungen wurden mit Hilfe des FE-Programms LSDYNA [1] erstellt. 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.

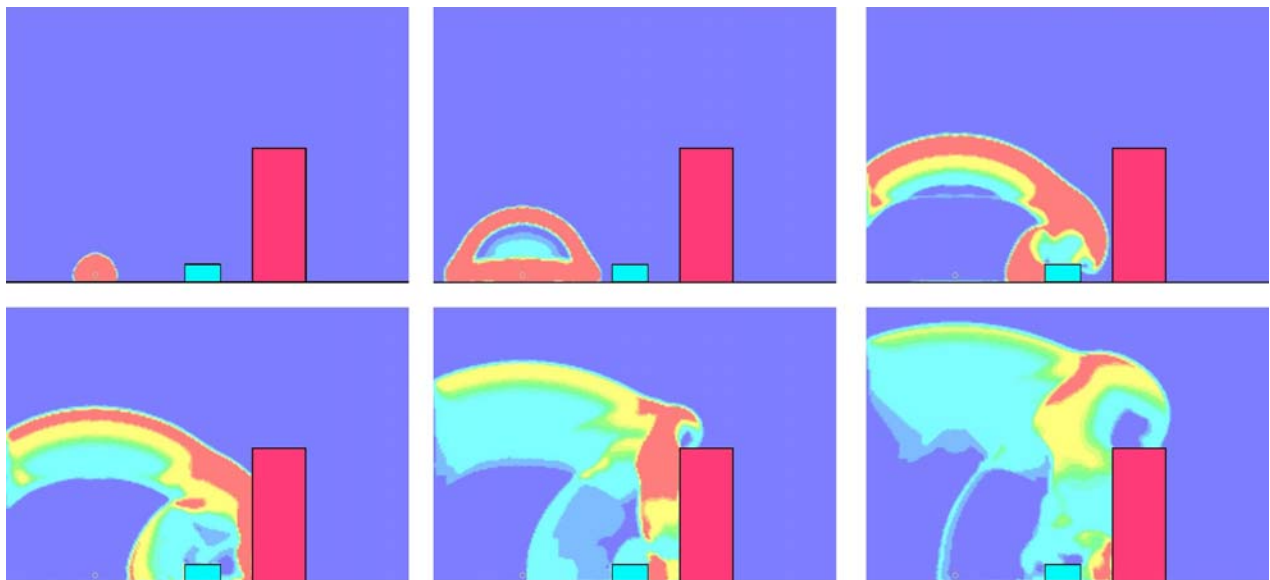


Bild 5 Computersimulation einer Druckwellenausbreitung

Fig. 5 Computational simulation of blast wave propagation

Bei einer realen Explosion entscheiden vor allem Höhe und Entfernung des Detonationsortes, Art und Ausbildung eventueller Hindernisse sowie die Art und 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.

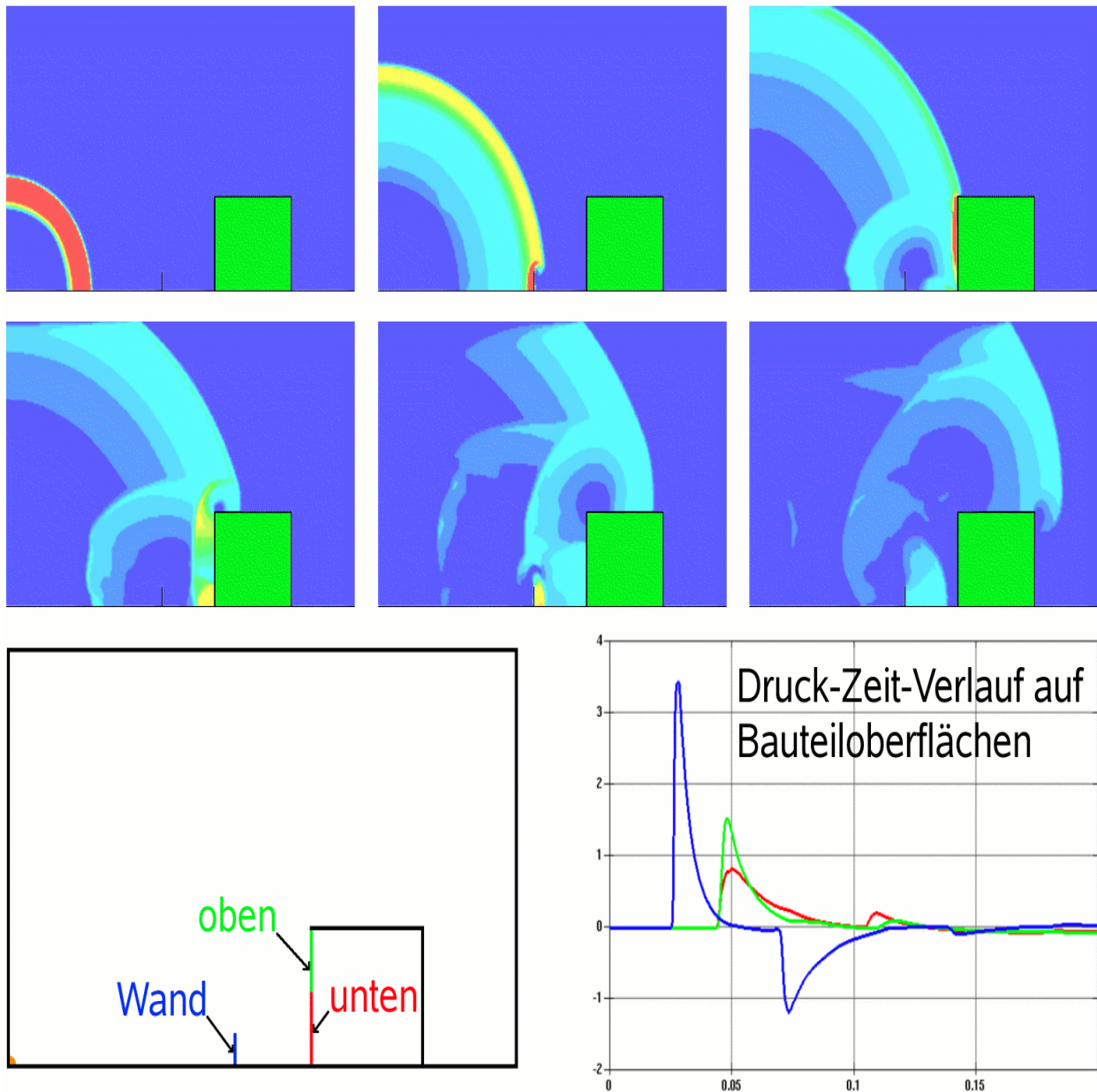


Bild 6 Einfluss einer Schutzwand, Computersimulation
 Fig. 6 Influence of a blast protection wall, computer simulation

So kann z.B. untersucht werden wie eine Schutzwand vor dem Gebäude die Impulsbelastung des Eingangsbereiches reduziert (vgl. Bild 6).

Aus der Simulation lassen sich gezielt Werte zur Bemessung von Schutzwand und Fassade ableiten. Gleichzeitig können Abstand und Wandhöhe optimiert werden.

Rücksprünge in einer Fassade (z. B. Eingangsbereiche oder Innenhöfe) können sich durch Erhöhung des Impulses negativ auswirken (Bild 7). Der Druck kann hier nicht schnell genug zu den Seiten hin abfließen, was eine deutliche Erhöhung der Beanspruchung zur Folge hat. Bei bestimmten Formen besteht die Gefahr einer Verstärkung infolge von Mehrfachreflexionen. Dies ist insbesondere bei engen Straßenzügen mit beidseitiger geschlossener Bebauung zu beachten.

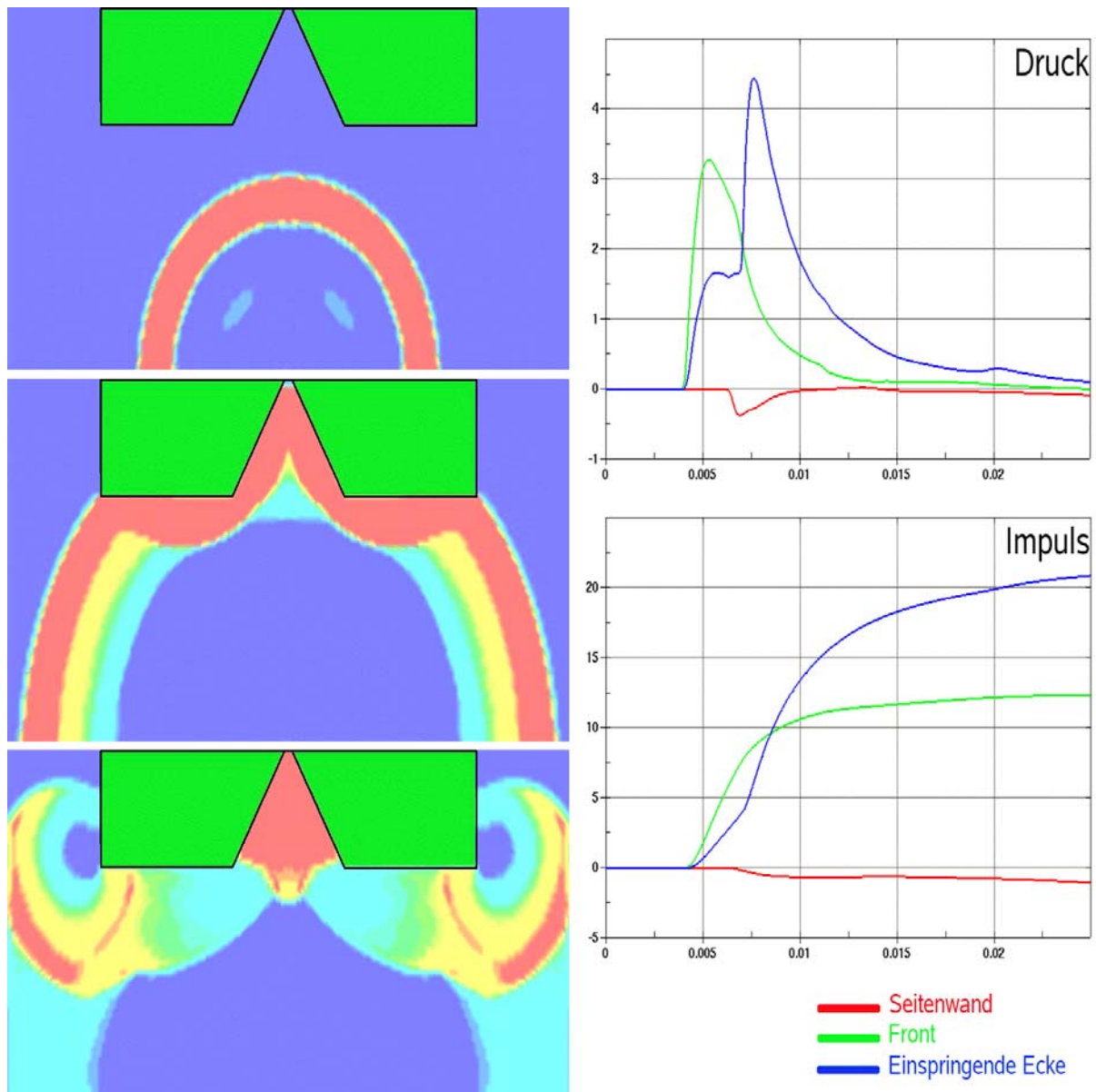


Bild 7 Druckwellenreflektion bei einem Gebäuderücksprung mit Zeit-Verläufen für Druck und Impuls
 Fig. 7 blast wave reflection at a building set-off with curves for pressure and impulse

In vielen Fällen genügt es nicht – wie es in der Regel bei Ausschreibungen üblich ist – theoretische Werte für den max. Druck und den Dreiecksimpuls anzugeben, da sich in der Realität durchaus erhebliche Unterschiede in positiver Hinsicht (sicherheitsrelevant) wie auch in negativer Hinsicht (wirtschaftlich relevant) ergeben können.

Aufgrund der meist idealisierten Versuchsanordnung bei Stoßrohr- und Freifeldversuchen ist das Ergebnis eines einzelnen Sprengversuches nur bedingt aussagekräftig. Mit Hilfe möglichst realistischer rechnerischer Simulationen zur Abschätzung der Versagenskriterien bzw. der Schutzwirkung kann eine sicherheitstechnische und wirtschaftliche Optimierung erfolgen.

Es sei darauf hingewiesen, dass zur rechnerischen Erfassung solcher Effekte insbesondere im dreidimensionalen Raum aufgrund der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle mit mehrfacher Schallgeschwindigkeit in der Nähe des Explosionsortes und der sprunghaften Druckänderung in der Schockfront extreme räumliche und zeitliche Diskretisierungen erforderlich sind. Der numerische Aufwand für solche Untersuchungen ist daher erheblich. Durchführung der Berechnung und Ergebnisbeurteilung bedürfen einiger Erfahrung.

Bereits während der Entwurfsphase sollten Gebäude hinsichtlich ihrer Gefährdung untersucht werden, um gegebenenfalls rechtzeitig erforderliche Schutzmaßnahmen zu integrieren und Anforderungen für einzelne Gebäudeteile festzulegen.

3. Stand der Normung

Zu dem Thema „Explosionsschutz von Fenster- und Fassadenkonstruktionen“ sind die folgenden grundlegenden Normen und Vorschriften zu nennen:

Aktuelle deutsche Normen:

- DIN EN 13123-1 (2001) und DIN 13124-1 (2001), Stoßrohrversuche, [6], [7]
- DIN EN 13123-2 (2004), DIN 13124-2 (2004), Freilandversuche, [6], [7]
- DIN EN 13541 (2001), Sicherheitssonderversglasung, Stoßrohrversuche, [8]
- DIN 1055-9 (2003), [9]

Europäische Normentwürfe:

- ISO/DIS 16933 (2004), Freilandversuche, [10]
- ISO/DIS 16934 (2004), Stoßrohrversuche, [11]

USA-Richtlinien:

- ASTM F 1642 bzw. GSA-TS01 (2003), [12]

Aus den zur Verfügung stehenden Normen lassen sich Angaben über Einwirkungen (Druck und Impuls) entnehmen, die bei Sprengversuchen im Freiland oder mit einem Stoßrohr erreicht werden müssen, um eine Konstruktion in eine bestimmte Klasse einzustufen.

Hinsichtlich der Klasseneinteilung und Bezeichnung bestehen in den Normen deutliche Unterschiede, was bei teilweise gleichen Bezeichnungen und unterschiedlichen Anforderungen schnell zu Verwechslungen führen kann (vgl. ISO/DIS 16934 und DIN EN 13541 Klassenbezeichnung ER).

Insbesondere die Normen zu den Stoßrohrversuchen dienen im Wesentlichen zum Vergleich unterschiedlicher kleinformatiger Konstruktionen mittels vorhandener Versuchsanlagen. Die hier geforderten Druck-Zeit-Verläufe haben für übliche baupraktische Gefährdungsszenarien nur geringe Bedeutung. In Tab. 1 sind zur Verdeutlichung neben der Klasseneinteilung nach DIN EN 13541 für den Stoßrohrversuch angenähert äquivalente Sprengereignisse im Freifeld angegeben. Man kann erkennen, dass sich aufgrund der geforderten positiven Druckphasendauer ziemlich unrealistische Sprengungen ereignen müssten, um die gleiche Wirkung wie im Stoßrohrversuch zu erzielen.

Klassifizierung DIN EN 13541	max pr [kPa]	I [kPa*ms]	t+ [ms]	Äquivalente Ladung [kg]	Äquivalenter Abstand [m]
ER 1	50 – 100	370 – 900	≥ 20	300	50
ER 2	100 – 150	900 – 1500	≥ 20	600	40
ER 3	150 – 200	1500 – 2200	≥ 20	900	40
ER 4	200 – 250	2200 – 3200	≥ 20	1900	45

Tabelle 1 Klassifizierung nach DIN EN 13541 für den Stoßrohrversuch mit Angabe äquivalenter Freifeldexplosion
Table 1 Classification acc. to DIN EN 13541 for shock tube tests with specification of equivalent arena blast

Im Wesentlichen sind die vorhanden Normen auf den experimentellen Vergleich unterschiedlicher Konstruktionen ausgerichtet und erfassen die Bandbreite der baupraktisch relevanten Einwirkungen nur unzureichend.

Zur rechnerischen Behandlung von Bauteilen unter Explosionsbeanspruchung sind in den Normen keine konkreten Angaben enthalten. Lediglich in der neuen DIN 1055-9 sind einige allgemeine Hinweise gegeben.

Für die rechnerische Erfassung und Vorhersage der Reaktion von Fenster- und Fassadenkonstruktionen in realen Gebäuden ist es sinnvoller, als Anforderung hypothetische Sprengsätze in einer bestimmten Entfernung vorzugeben. Im Vergleich zur Vorgabe von Druck und Impuls wird hier eine gezielte Berücksichtigung der baulichen Situation ermöglicht.

Die auf die Konstruktion einwirkende Belastung ergibt sich dann daraus - für einfache Fälle auf theoretischem Wege über Diagramme - oder für komplexere Fälle als Ergebnis einer rechnerischen Simulation entsprechend der konkreten baulichen Situation (vgl. Kap. 2.2).

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 (Tab. 2) sind Schadensklassen bzw. Gefährdungsstufen A (kein Bruch) bis F (hoher Schaden mit weit fliegenden Glasteilen) angegeben.

Gefahrenstufe	Beschreibung	Definition
A	kein Bruch	Kein Glasbruch und kein sichtbarer Schaden
B	keine Gefährdung	Glas bricht aber bleibt vollständig im Rahmen, keine Öffnungen und keine Splitterablösung im Innenraum
C	minimale Gefährdung	Glas bricht aber bleibt im Rahmen, Summe der Risslänge im Glas und am Glasaufleger unter 20 % des Scheibenumfanges, nicht mehr als 3 Perforationen in der Rückwand Summe der max. Bruchstückdurchm. im Bereich 1 und 3 m liegt unter 250 mm
D	sehr geringe Gefährdung	Glas bricht und befindet sich maximal 1m hinter der Ursprungsposition, nicht mehr als 3 Perforationen in der Rückwand, Summe der max. Bruchstückdurchm. im Bereich 1 und 3 m liegt unter 250 mm
E	geringe Gefährdung	Glas bricht und Bruchstücke befinden sich bis zu 3 m hinter dem Fenster, nicht mehr als 10 Perforationen über 0,5 m Höhe in der Rückwand, keine Perforationen tiefer als 12 mm in der Rückwand
F	hohe Gefährdung	Glas bricht, mehr als 10 Perforationen über 0.5 m Höhe in der Rückwand, Perforationen tiefer als 12 mm

Tabelle 2 Gefahrenstufen nach ISO / DIS 16933

Table 2 Hazard level acc. to ISO / DIS 16933

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. Abschätzung des dynamischen Verhaltens von Bauteilen

Um die Reaktion einer Konstruktion gefühlsmäßig einschätzen zu können, ist es hilfreich, die Reaktion eines Einmassenschwingers stellvertretend für die Grundschwingung des zu untersuchenden Bauteiles auf einen Dreiecksimpuls zu betrachten.

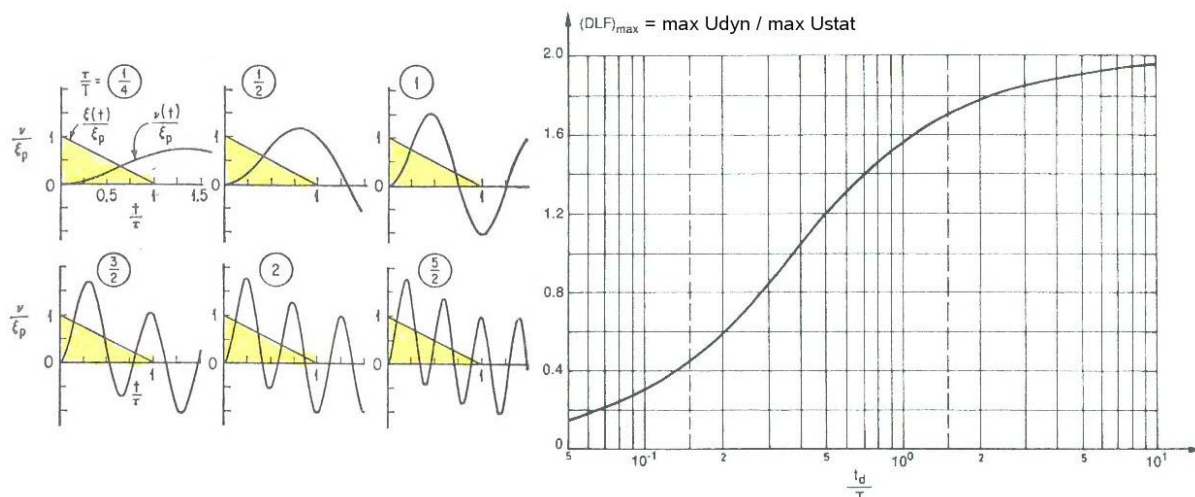


Bild 8 Dynamischer Korrekturfaktor für den linear-elastischen Schwinger (aus [13])

Fig. 8 Dynamic correction factor for a linear-elastic-vibration system (from [13])

In Bild 8 ist die Reaktion eines Einmassenschwingers auf einen Dreiecksimpuls bei linear-elastischem Verhalten dargestellt.

Man erkennt die sehr starke Abhängigkeit der Reaktion vom Schwingungsverhalten des Bauteiles, d.h. vom Verhältnis der Lasteinwirkungszeit zur Eigenschwingzeit des Bauteiles in der betrachteten Grundschwingung.

Bei einer im Verhältnis zur Eigenschwingzeit langen Lasteinwirkungszeit ($t_d/T \gg 1$) kann die dynamische Reaktion bis zum zweifachen Wert der statischen Reaktion unter der maximalen Last ansteigen, d.h. dass in einem solchen Fall der dynamische Korrekturfaktor DLF 2,0 beträgt - dies entspricht der dynamischen Reaktion bei einer plötzlichen und anhaltenden Lastaufbringung gemäß einer Sprungfunktion.

Bei einer sehr kurzzeitigen Einwirkung, wie sie in der Regel bei einer Explosion vorliegt, kann dieser Wert jedoch auf unter 1/10 bei $t_d/T < 0,025$ der statischen Reaktion absinken. Daraus lässt sich die enorme Bandbreite in der Bauteilbeanspruchung bei gleicher Einwirkung erkennen.

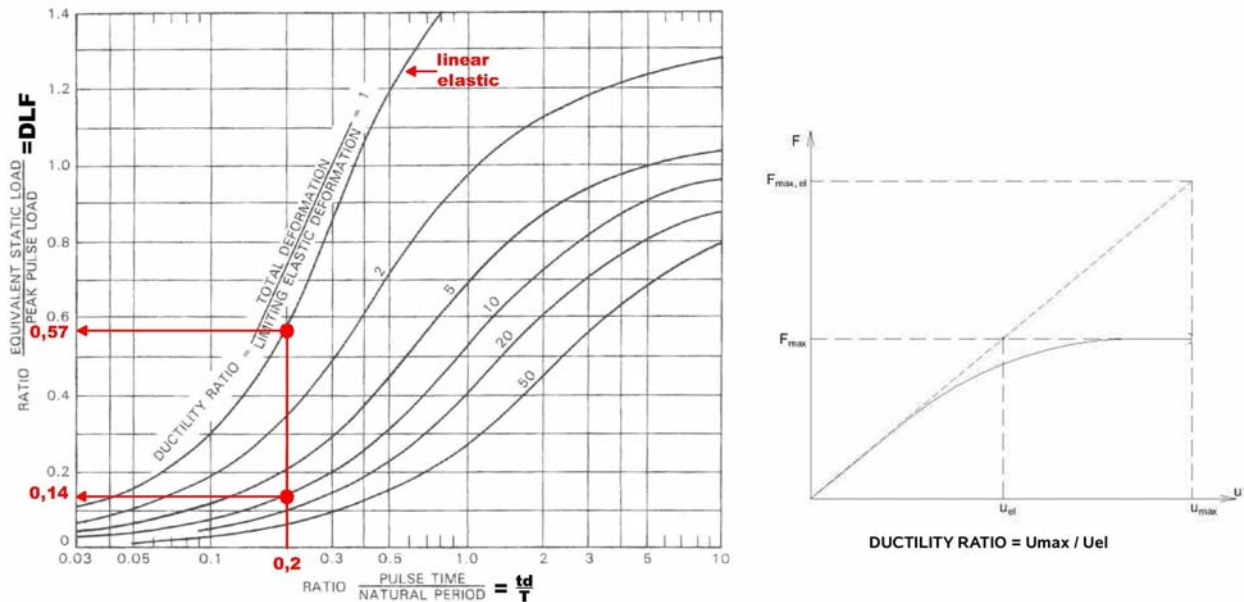


Bild 9 Dynamischer Korrekturfaktor für den elastisch-plastischen Schwinger (aus [2])

Fig. 9 Dynamic correction factor for a elastic-plastic vibration system (from [2])

Falls ein Bauteil duktil bzw. elastisch-plastisch reagieren kann, wie z.B. bei Stahlprofilen, Verbundglas-scheiben oder bei entsprechend konstruierten Fassaden, bei denen nach den ersten Rissen oder Brüchen große Verformungen entstehen können, ohne dass das Bauteil im Ganzen versagt, dann verringert sich der dynamische Korrekturfaktor aufgrund des Erreichens der Fließspannung weiter. Dies lässt sich aus dem Diagramm in Bild 9 überschlägig in Abhängigkeit vom Verhältnis der Lasteinwirkungszeit eines Dreiecksimpulses zur Eigenschwingzeit entnehmen.

So ergibt sich beispielsweise bei einem Verhältnis td/T von 0,2 und einem Duktilitätsfaktor von 10 eine Reduzierung des dynamischen Faktors von ca. 0,57 auf ca. 0,14.

Selbstverständlich können solche Abschätzungen nur dazu dienen, ein Gefühl für das voraussichtliche Verhalten der Konstruktion zu erhalten. Aussagen über das tatsächliche Bruchverhalten oder das Versagen lassen sich auf der Basis einer linear-elastischen Berechnung wegen der völlig unterschiedlichen Duktilität einzelner Komponenten selbstverständlich nicht ableiten.

Durch die innerhalb einer Fassade verwendeten Komponenten mit unterschiedlichsten Materialeigenschaften ergeben sich eine Vielzahl von Faktoren, die das tatsächliche Versagen entscheidend beeinflussen. Diese Faktoren gilt es möglichst zielgerichtet zu variieren und positiv auszunutzen.

5. Schadenskriterien und Versagensmechanismen

Für die spätere rechnerische Beurteilung ist es erforderlich, dass die Konstruktion einer Gefährdungsstufe zugeordnet ist (vgl. Tabelle 2) und ein entsprechendes Teilversagen akzeptiert bzw. bewusst einkalkuliert wird.

Von dieser Einstufung ist der rechnerische Aufwand abhängig wie die nachfolgende Aufstellung zeigt.

Einstufung in Kategorie A (kein Bruch bzw. Schaden zulässig):

- Linear-elastisches Materialverhalten mit Überprüfung von Spannungsgrenzen für Kurzzeitbeanspruchung
- Berechnungen mit aus Tabellen abgeleiteten statischen Ersatzlasten können in bestimmten Fällen ausreichen

- Ggf. sind geometrisch nichtlineare Berechnungen zur Berücksichtigung von Membrantragwirkungen bei größerer Verformung sinnvoll
- Bei großen Belastungen ergeben sich meist sehr massive und schwere und daher unwirtschaftliche Konstruktionen. Die Einstufung in Kat. A ist meist unrealistisch, da z.B. ein Schaden durch Trümmer anderer Bauteile nicht ausgeschlossen werden kann.

Einstufung in Kategorie B / C: (Glasbruch bei VSG und plastische Verformungen zulässig):

- Erfassung der nichtlinearen Materialeigenschaften und Nutzung der Verformungskapazitäten
- Statische Ersatzsysteme sind aufgrund der Nichtlinearitäten nicht mehr zutreffend
- Nutzung der Dämpfungseffekte durch plastische Formänderungen
- Kalibrierung von Materialparametern durch Versuche erforderlich
- Regelanforderung aufgrund des wirtschaftlich günstigen Kosten-Risiko-Verhältnisses

Einstufung in Kategorien D bis F (Abgang von grösseren Bruchstücken zulässig):

- Genauere Erfassung von Versagenskriterien einzelner Komponenten erforderlich
- Extrem feine Diskretisierung erforderlich
- Genaueste Erfassung von Kontaktbedingungen / Schlupf / Reibung erforderlich
- Aufgrund der Streubreite der Einwirkung und der Materialparameter selbst bei „richtiger Berechnung“ wahrscheinlich nicht durch Versuche verifizierbar bzw. stark schwankend
- Versuchsergebnisse für diese Kategorie sind nur schwer reproduzierbar

Für den Regelfall der Anforderungen nach Kat. B und C 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. Hierbei haben eine Vielzahl von Materialparametern entscheidenden Einfluss. Sie sind im Idealfall durch möglichst separate Versuche an einzelnen Bauteilen unter dynamischer Belastung zu kalibrieren.

Vergleiche und Nachweise, die mittels statischer Ersatzlasten oder einfacher Vergleiche im Bereich des nichtlinearen Materialverhaltens arbeiten, sollten stets kritisch hinterfragt werden. Dynamische Berechnungen und Versuche zeigen, dass diese Verfahren auch für Vergleiche ähnlicher, kleinerer Konstruktionen mit Testergebnissen nicht immer zutreffende und ausreichend sichere Ergebnisse liefern. Sie erfassen keinesfalls die stark schwankenden und sehr unterschiedlichen Belastungen einzelner Konstruktionsteile während des Explosionsvorganges.

Schließlich können auch noch rechnerische Untersuchungen durchgeführt werden, die ein vollständiges Versagen und Herausfliegen z.B. von ganzen Scheiben oder Fensterflügeln bewusst zulassen und bei denen die Fragestellung darauf abzielt, wie weit die Scheibe nach einem Versagen in den Raum fliegen wird oder welche Kräfte z.B. in einem Glasfänger entstehen (Bild 10).

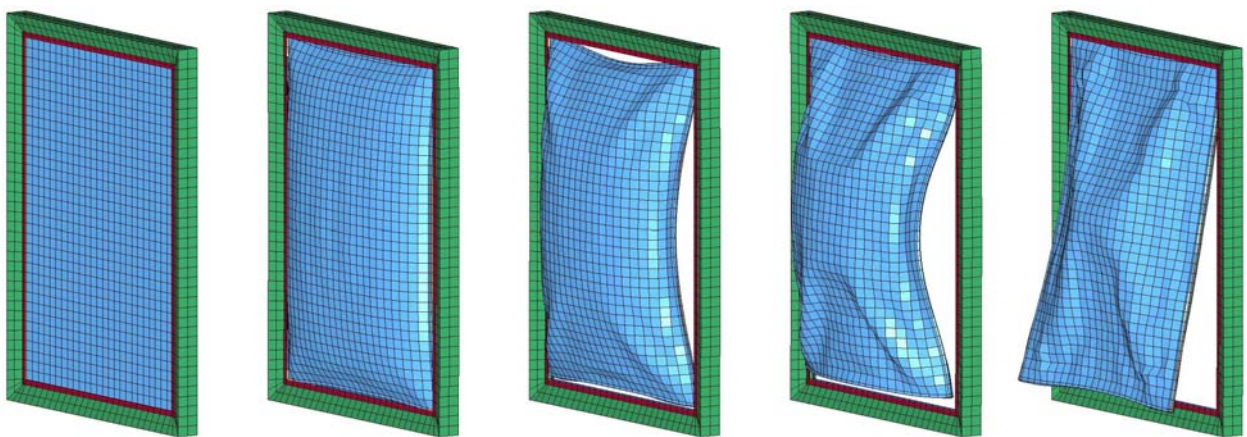


Bild 10 Fenster mit integrierter Glasfangvorrichtung
Fig. 10 Window with integrated glass catcher

Wenn man eine typische Fensterkonstruktion für den Nachweis im Regelfall (Kat. B und C) betrachtet, so sind folgende Bauteile für die Frage eines Versagens von Bedeutung und in einer rechnerischen Simulation zu erfassen:

- Bruch der Verglasungen
- Riss von PVB-Folien
- Ablösung von Splintern an der Scheibenseite
- Versagen der Randaufleger durch Ablösung von den Glasleisten bzw. Versagen von Verklebungen (structural sealant glazing)
- Bruch der Beschläge und der Verriegelungen
- Verbundversagen der Verbundprofile durch 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.

6. Dynamische FE-Berechnungen

Die rechnerische Erfassung der oben genannten Effekte in ihrer Gesamtheit erfordert ein komplexes rechnerisches Modell mit detaillierter Abbildung der Einzelteile.

Beispielsweise können Rahmenteile aufgrund der Exzentrizitäten der örtlichen Verbindungselemente, des örtlichen Beulens bei Punktbeanspruchungen und wegen möglicher Teilplastifizierungen nicht durch einfache Stäbe erfasst werden. Hier werden nichtlineare Faltwerksmodelle verwendet, die es erlauben, örtliche Querbiegeeffekte, Verbundversagen, örtliche Plastifizierungen, Brechen, Ausbeulen, Abrutschen etc. zu erfassen.

Durch rechnerische Simulation kann die Anzahl der äußerst kostenintensiven Explosionsversuche minimiert werden. Die durchgeführten Vergleiche von Prognosen und Versuchsergebnissen bestätigen die bereits erreichte hohe Qualität der Modellbildung.

Für ähnliche Konstruktionen und Konstruktionsteile wird bei anderweitiger Verwendung ein rechnerischer Nachweis geführt. Auf Versuche wird hier häufig ganz verzichtet.

6.1 Verwendete Programmsysteme und Anwendungsbereiche

Berechnungen mit einem herkömmlichen impliziten FE-Programm für nichtlineare Tragwerksanalysen, bei denen die Fassadenprofile durch Stäbe abgebildet und die Scheiben durch nichtlineare Federn und Kopplungen mit den Stäben verbunden werden, haben bei den geometrisch nichtlinearen Berechnungen einige entscheidende Nachteile. Lokales Profilversagen jeglicher Form kann nicht erfasst werden. Eine Erfassung der Verbundprofile durch Faltwerke mit plastischen Materialverhalten führt zu extrem großen Elementanzahlen.

Die Größe der Zeitschritte muss wegen der extrem schnellen Laständerungen sowie der auftretenden großen Geschwindigkeiten extrem begrenzt werden um numerische Instabilitäten zu vermeiden.

Aufgrund der auftretenden Probleme mit numerischen Instabilitäten und ausufernden Rechenzeiten zur realistischen Erfassung des Tragverhaltens der Verbundprofile der Lagerung der Scheiben, des Bruchverhaltens der Isolierverglasung etc. wurde vom Verfasser ein neuer Weg eingeschlagen.

Für die weitere Entwicklung der numerischen Simulation wurde das auch aus der Crashsimulation bekannte explizite FE-Programm LS-DYNA gewählt, bei dem die o.g. numerischen Schwierigkeiten bei großen Verformungen innerhalb extrem kurzer Zeit, extrem unterschiedlichen Steifigkeiten sowie stark nichtlinearem Materialverhalten nicht auftreten. Das Programm bietet neben der Erfüllung der o.g. Anforderungen eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Lösung von Kontaktproblemen, netzfreie Berechnungsalgorithmen etc. Die große Anzahl der implementierten Materialmodelle sowie die Möglichkeit zur Integration eigener Modelle sind von Vorteil.

Ein weiteres Kriterium für die Programmwahl war die Möglichkeit der Untersuchung von Druckwellenausbreitungen und Strömungen im Raum mittels Fluid-Struktur-Interaktionen durch Kopplung von Euler- und Lagrange-Netzen.

6.2 Modellierung

6.2.1 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 11) kalibriert.

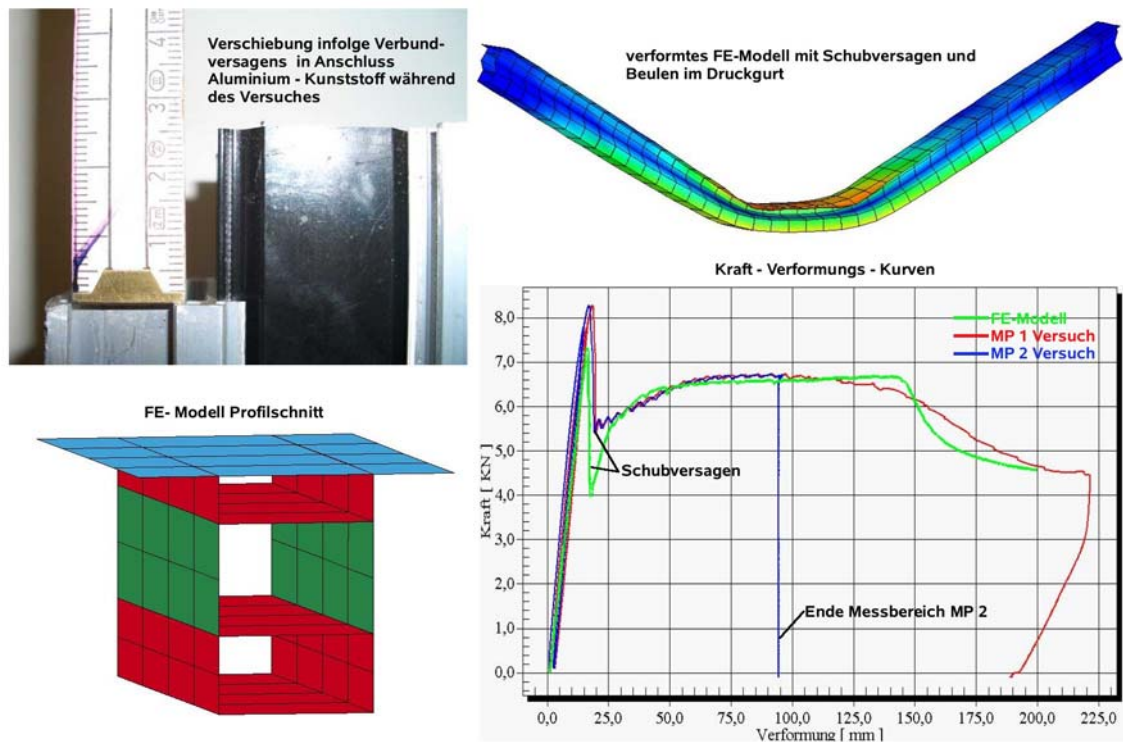


Bild 11 Kraft-Verformungskurve eines Fassaden-Verbundprofiles, Vergleich Versuch mit Rechnung
Fig. 11 Force-deflection-curve of a facade profile, comparison of test with computation

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.

6.2.2 Materialverhalten von 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 wirkt 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. LS-Dyna bietet hierfür die Möglichkeit, eigene Integrationsregeln (*INTEGRATION_SHELL [1]) für die Elemente zu definieren. Die einzelnen Integrationspunkte werden mit unterschiedlichen Materialpa-

rametern (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 Risswinkel 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 Rissspannung 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 der Hersteller 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.

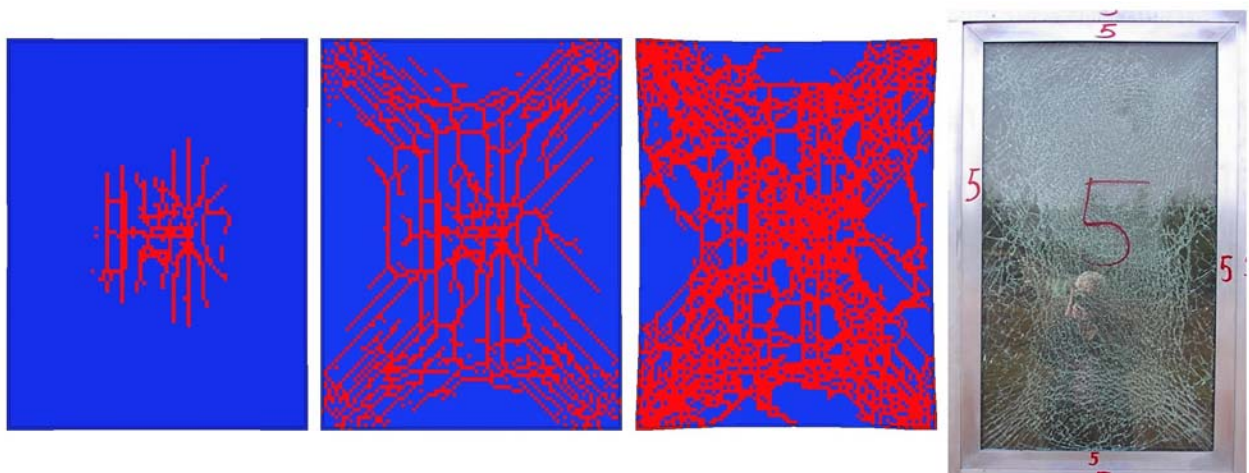


Bild 12 Rissausbreitung in einer Verbundglasscheibe / Modell und Versuch
Fig. 12 Propagation of cracks in a laminated glass pane / model and test

Bild 12 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 aufwändigere 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.

6.2.3 Isolierglasscheiben und Rahmen

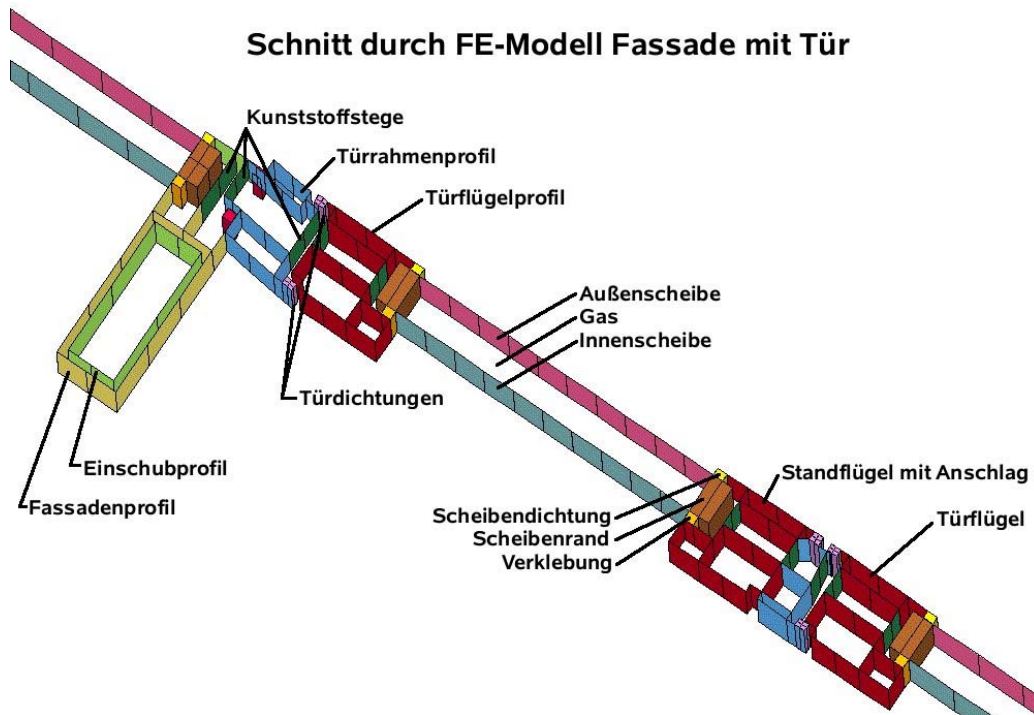


Bild 13 Schnitt durch Fassade mit Profilen und Isolierglasscheibe (FE-Modell)
 Fig. 13 Facade - cross section with frame and insulated glass pane (FE-model)

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 13 zeigt einen Ausschnitt des Modells aus Abschnitt 6.4. Die einzelnen Komponenten des FE-Netzes sind erkennbar und verdeutlichen den hohen Aufwand bei der Generierung regelmäßiger Netze.

6.2.4 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 Federelemente verwendet (*MAT_NONLINEAR_PLASTIC_DISCRETE_BEAM*, [1]), die für alle 6 Freiheitsgrade separate Federkennlinien ermöglichen und über zwei gleichzeitig wirkende Versagenskriterien verfügen. Mit den unabhängig voneinander wirkenden Mechanismen für Kräfte und Verformungen werden dabei beliebige Freiheitsgrade kombiniert.

6.3 Belastung

Wie bereits erläutert sind die real gemessenen Druck-Zeitverläufe aufgrund vieler Einflüsse deutlichen Schwankungen unterworfen. Dazu zählen vor allem die Umströmungsbedingungen und Reflektionen am realen Objekt, die Form der Ladung und die Lage der Zündkapsel, der Untergrund, die Lage der Drucksensoren etc. Dabei sind auch bei sonst gleichen Bedingungen durchaus Schwankungen von ca. 10 bis 15 % möglich.

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 für die vorgegebene Sprengstoffmenge und den definierten Abstand verwendet (vgl. Bild 4).

6.4 Berechnungsbeispiel

Für den Nachweis neuer Konstruktionen werden zunächst Rechenmodelle auf Basis der Nachrechnung von bisher begleiteten Versuchsergebnissen [16] erstellt. Die Ergebnisse werden über Variation der Materialparameter und Gesetze an diese Versuche angepasst bis eine zufrieden stellende Übereinstimmung entsteht. Diese Variationen sind erforderlich, da noch nicht für alle Materialien und Bauelemente ausreichende Daten für das Verhalten unter Kurzzeitbeanspruchung vorliegen und das komplexe Zusammenwirken der Komponenten eine versuchstechnische Überprüfung erfordert.

Im Folgenden wird ein Beispiel für dieses Verfahren vorgestellt.

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.

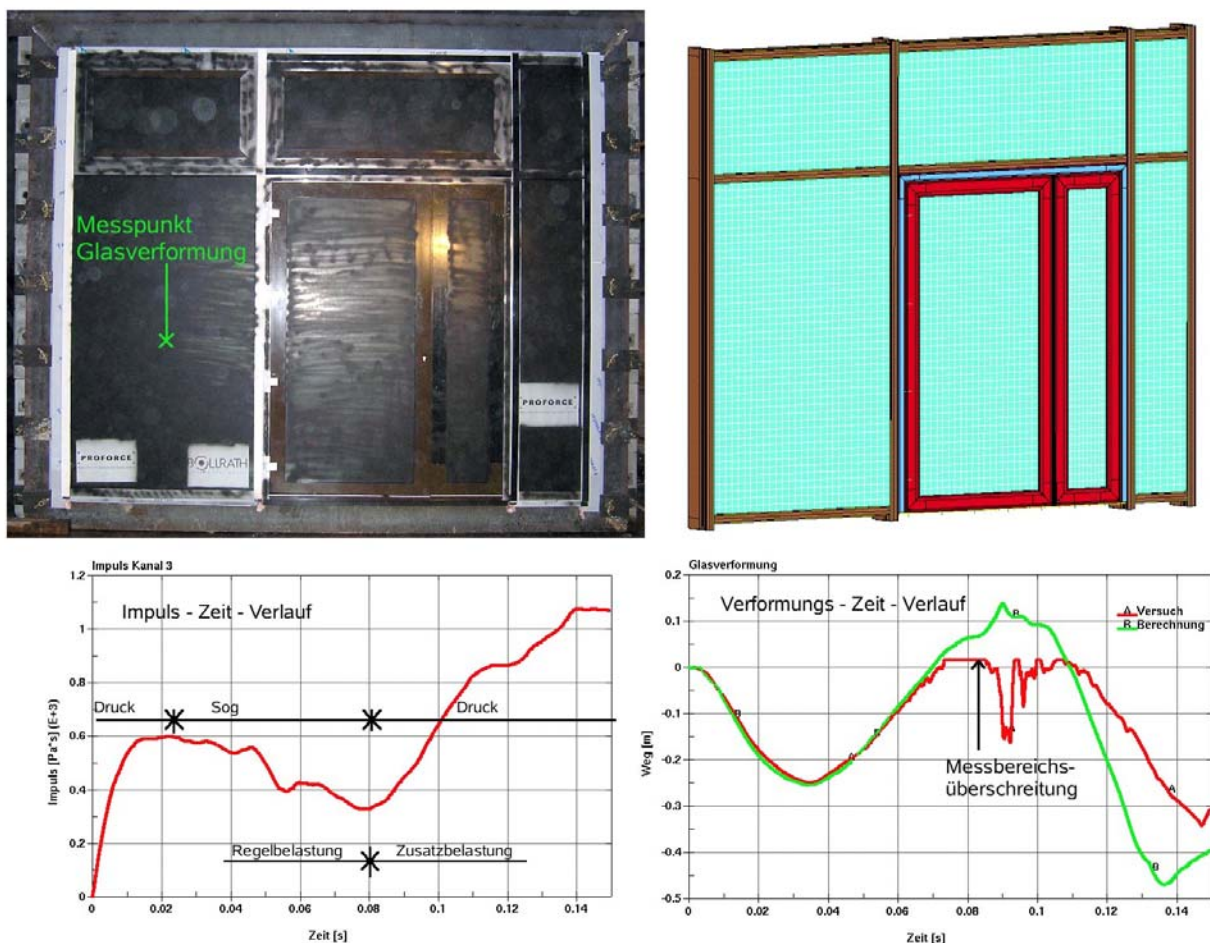


Bild 14 Nachrechnung Sprengtest Fa. Bollrath / PRO FORCE 2006 mit Verformungsvergleich

Fig. 14 Post computation of blast test company Bollrath / PRO FORCE 2006 with comparison of deflection

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 Druckwellenreflektionen 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 Reflektionen 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 14 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 14 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 15). 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.

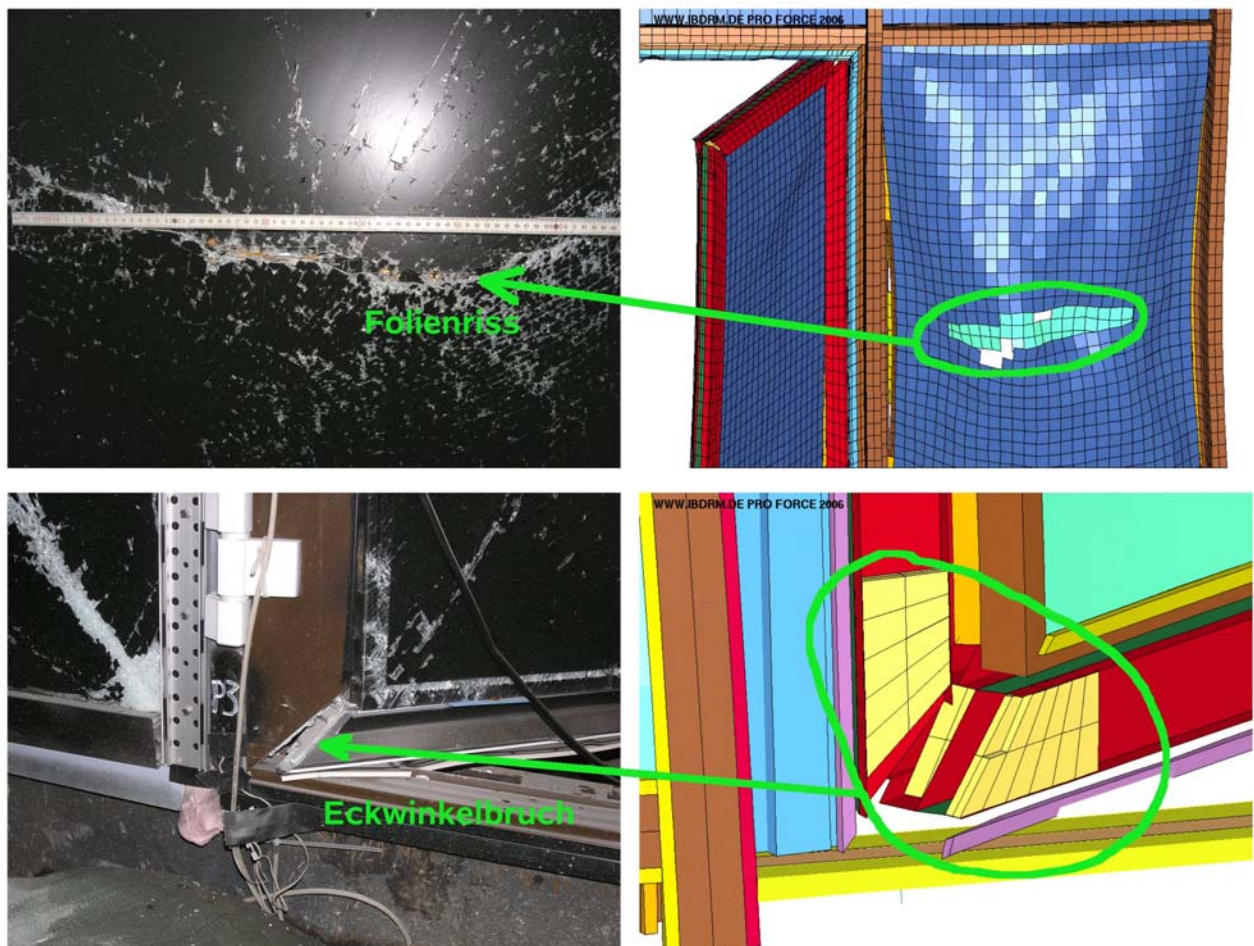


Bild 15 Vergleich Versuch - Simulation Details Folienriss und Bruch der Eckverbinder
Fig. 15 Comparison test - computation details membrane failure and break of joint

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, Scheibenauflagern 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. Je nach Wahl der Elementansätze und Elementgröße, Dichte und E-Modul variiert der Zeitschritt stark. Daher ist ein regelmäßiges Elementnetz unabdingbar.

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.

7. Weitere Entwicklungen und Anregungen zu Forschungen

Die weiteren Entwicklungen zielen neben einer Verfeinerung des rechnerischen Modells durch Berücksichtigung eines weiter verbesserten und realistischeren Materialverhaltens auf die genauere rechnerische Simulation des Versagensvorganges ab.

Dazu werden dringend Forschungsergebnisse und Materialuntersuchungen zum Kurzzeitverhalten der einzelnen Bauteile während des Bruchvorganges benötigt. Anregungen hierfür soll die nachfolgende Aufstellung geben.

- Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Materialverhalten der Komponenten
- Verhalten von den verschiedenen Folien im Verbund mit gebrochenem Glas
- Bestimmung von Beschleunigungsgrenzwerten, bei denen eine Splitterablösung auf der Scheibenseite erfolgt
- Einfluss der Rissausbreitungsgeschwindigkeit beim Glasbruch
- Verhalten von Verklebungen und Reibungswirkung von Zwischenlagen aus Elastomer
- Verformungsverhalten der Verbindungsmittel im Zusammenwirken mit den Profilen
- Verbundwirkung durch die Kunststoffstege im Bruchzustand unter Kurzzeitbelastung
- Entwicklung und Validierung dehnratenabhängiger Materialmodelle insbesondere für die Folien im Verbund mit den Glasscheiben
- Untersuchungen zur Innendruckverteilung in Isoliergläsern unter Kurzzeitbelastung

8. Fazit und Ausblick

Mit den in diesem Beitrag vorgestellten Modellen zur numerischen Simulation von Explosionsereignissen und ihren Auswirkungen auf Baukonstruktionen ist es möglich, deutlich verbesserte und realistischere Vorhersagen hinsichtlich des Versagens baulicher Strukturen zu treffen.

Dies ist insbesondere hinsichtlich der Festlegung der einwirkenden Druck-Zeitverläufe noch nicht in den Normen erfasst bzw. erwähnt.

Die bislang durchgeführten rechnerischen Simulationen zeigen, dass es meist nicht ausreicht Ergebnisse einzelner Sprengversuche auf andere Konstruktionen zu übertragen, auch wenn diese scheinbar nur leicht gegenüber den Testelementen verändert sind. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge sind rechnerische Simulationen erforderlich, mit denen die Gleichwertigkeit mit bereits getesteten Elementen nachgewiesen wird. Nicht in jedem Fall ist kleiner auch günstiger!

Für eine weitere Verbesserung der Simulationsmodelle werden Ergebnisse von Forschungsarbeiten zum Materialverhalten der Einzelkomponenten unter hohen Dehnungsgeschwindigkeiten benötigt.

Die Möglichkeiten, komplexe Fenster und Fassadenkonstruktionen unter Explosionsbelastungen in der Zusammenwirkung aller Einzelteile rechnerisch zutreffend und wirklichkeitsnah zu erfassen, wurden aufgezeigt. Die noch vorherrschende Skepsis gegenüber der Anerkennung von Berechnungen als Ersatz bzw. Ergänzung für Sprengversuche erscheint überdenkenswert.

Die numerischen Simulationen versetzen den entwerfenden Ingenieur bei größeren Fassadenteilen bereits jetzt 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] „Explosive Shocks in Air“, Kinney/Graham, Springer-Verlag New York 1985
- [3] „Explosion Hazards and Evaluation“, Baker, Cox, u.a., Elsevier SPC 1992
- [4] Handbuch Workshop „Bau-Protect“, Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik (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 Kurzzeitdynamik (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] „Shock and Vibration Handbook“, Fifth Edition, Harris & Piersol, Mc Graw Hill, 2002
- [14] „Numerische und experimentelle Untersuchungen des Tragverhaltens einer Verbund-Sicherheitsglasscheibe unter Berücksichtigung des gerissenen Zustandes“, F. Schneider, B. Sonntag, S. Kolling, Bauingenieur, Band 79, November 2004
- [15] „Dynamische Untersuchungen an tragenden Verklebungen“, G. Krüger, Vortrag „Vitrum Protect“ Freiburg 2006
- [16] Versuchsberichte von Sprengversuchen der Firmen Bollrath und Oskomera
- [17] „Blast and Ballistic Loading of Structures“, P.D.Smith, J.G. Hetherington, Butterworth/Heinemann 2003

Autoren:

Dr.-Ing. Rüdiger Müller
Inhaber des gleichnamigen Ingenieurbüros, Beratender Ingenieur (VBI, BYIK-Bau),
Prüfingenieur für Baustatik, Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger
für Schwingungen und Erschütterungen im Bauwesen
Gravelottestr. 8, D-81667 München
r.mueller@ibdrm.de
www.ibdrm.de



Dipl.-Ing. Matthias Wagner
seit 1999 Mitarbeiter im Ingenieurbüro Dr. R. Müller
Gravelottestr. 8, D-81667 München
e-mail: m.wagner@ibdrm.de
www.ibdrm.de